

2021-2022

THÈSE

pour le

DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN MÉDECINE

Qualification en RADIOLOGIE ET IMAGERIE MEDICALE

ULTRASOUND SHEAR WAVE ELASTOGRAPHY: A COMPARISON BETWEEN COMMERCIAL- AVAILABLE SYSTEMS USING A VISCOELASTIC PHANTOM

ELASTOGRAPHIE PAR ULTRASON : COMPARAISON SUR FANTOME DES DIFFERENTS SYSTEMES COMMERCIALISES

EL CHAMMAS Daniel

Né le 27 avril 1994 à BEYROUTH (00)

Sous la direction de M. AUBE Christophe

Membres du jury

M. Le Professeur AUBE Christophe	Directeur
M. Le Professeur WILLOTEAUX Serge	Président
M. Le Professeur BOURSIER Jérôme	Membre
M. Le Docteur Hamel Jean-François	Membre

Soutenue publiquement le :
11 octobre 2022



**FACULTÉ
DE SANTÉ**
UNIVERSITÉ D'ANGERS

ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je, soussigné(e) EL CHAMMAS Daniel
déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une
partie d'un document publiée sur toutes formes de support, y compris l'internet,
constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée.
En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées
pour écrire ce rapport ou mémoire.

signé par l'étudiant(e) le **01/09/2022**

LISTE DES ENSEIGNANTS DE LA FACULTÉ DE SANTÉ D'ANGERS

Doyen de la Faculté : Pr Nicolas Lerolle

Vice-Doyen de la Faculté et directeur du département de pharmacie : Pr
Frédéric Lagarce

Directeur du département de médecine : Pr Cédric Annweiler

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS

ABRAHAM Pierre	Physiologie	Médecine
ANNWEILER Cédric	Gériatrie et biologie du vieillissement	Médecine
ASFAR Pierre	Réanimation	Médecine
AUBE Christophe	Radiologie et imagerie médicale	Médecine
AUGUSTO Jean-François	Néphrologie	Médecine
BAUFRETON Christophe	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire	Médecine
BELLANGER William	Médecine Générale	Médecine
BENOIT Jean-Pierre	Pharmacotechnie	Pharmacie
BIGOT Pierre	Urologie	Médecine
BONNEAU Dominique	Génétique	Médecine
BOUCHARA Jean-Philippe	Parasitologie et mycologie	Médecine
BOUET Pierre-Emmanuel	Gynécologie-obstétrique	Médecine
BOUVARD Béatrice	Rhumatologie	Médecine
BOURSIER Jérôme	Gastroentérologie ; hépatologie	Médecine
BRIET Marie	Pharmacologie	Médecine
CALES Paul	Gastroentérologie ; hépatologie	Médecine
CAMPONE Mario	Cancérologie ; radiothérapie	Médecine
CAROLI-BOSC François-Xavier	Gastroentérologie ; hépatologie	Médecine
CONNAN Laurent	Médecine générale	Médecine
COPIN Marie-Christine	Anatomie et cytologie pathologiques	Médecine
COUTANT Régis	Pédiatrie	Médecine
CUSTAUD Marc-Antoine	Physiologie	Médecine
DE CASABIANCA Catherine	Médecine Générale	Médecine
DESCAMPS Philippe	Gynécologie-obstétrique	Médecine
D'ESCATHA Alexis	Médecine et santé au travail	Médecine
DINOMAS Mickaël	Médecine physique et de réadaptation	Médecine
DIQUET Bertrand	Pharmacologie	Médecine
DUBEE Vincent	Maladies Infectieuses et Tropicales	Médecine
DUCANCELLE Alexandra	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière	Médecine
DUVAL Olivier	Chimie thérapeutique	Pharmacie
DUVERGER Philippe	Pédopsychiatrie	Médecine
EVEILLARD Mathieu	Bactériologie-virologie	Pharmacie
FAURE Sébastien	Pharmacologie physiologie	Pharmacie

FOURNIER Henri-Dominique	Anatomie	Médecine
FURBER Alain	Cardiologie	Médecine
GAGNADOUX Frédéric	Pneumologie	Médecine
GOHIER Bénédicte	Psychiatrie d'adultes	Médecine
GUARDIOLA Philippe	Hématologie ; transfusion	Médecine
GUILET David	Chimie analytique	Pharmacie
GUITTON Christophe	Médecine intensive-réanimation	Médecine
HAMY Antoine	Chirurgie générale	Médecine
HENNI Samir	Médecine Vasculaire	Médecine
HUNAUULT-BERGER Mathilde	Hématologie ; transfusion	Médecine
IFRAH Norbert	Hématologie ; transfusion	Médecine
JEANNIN Pascale	Immunologie	Médecine
KEMPF Marie	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière	Médecine
LACCOURREYE Laurent	Oto-rhino-laryngologie	Médecine
LAGARCE Frédéric	Biopharmacie	Pharmacie
LARCHER Gérald	Biochimie et biologie moléculaires	Pharmacie
LASOCKI Sigismond	Anesthésiologie-réanimation	Médecine
LEGENDRE Guillaume	Gynécologie-obstétrique	Médecine
LEGRAND Erick	Rhumatologie	Médecine
LERMITE Emilie	Chirurgie générale	Médecine
LEROLLE Nicolas	Réanimation	Médecine
LUNEL-FABIANI Françoise	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière	Médecine
MARCHAIS Véronique	Bactériologie-virologie	Pharmacie
MARTIN Ludovic	Dermato-vénéréologie	Médecine
MAY-PANLOUP Pascale	Biologie et médecine du développement et de la reproduction	Médecine
MENEI Philippe	Neurochirurgie	Médecine
MERCAT Alain	Réanimation	Médecine
PAPON Nicolas	Parasitologie et mycologie médicale	Pharmacie
PASSIRANI Catherine	Chimie générale	Pharmacie
PELLIER Isabelle	Pédiatrie	Médecine
PETIT Audrey	Médecine et Santé au Travail	Médecine
PICQUET Jean	Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire	Médecine
PODEVIN Guillaume	Chirurgie infantile	Médecine
PROCACCIO Vincent	Génétique	Médecine
PRUNIER Delphine	Biochimie et Biologie Moléculaire	Médecine
PRUNIER Fabrice	Cardiologie	Médecine
REYNIER Pascal	Biochimie et biologie moléculaire	Médecine
RICHARD Isabelle	Médecine physique et de réadaptation	Médecine
RICHOMME Pascal	Pharmacognosie	Pharmacie
RODIEN Patrice	Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques	Médecine

ROQUELAURE Yves	Médecine et santé au travail	Médecine
ROUGE-MAILLART Clotilde	Médecine légale et droit de la santé	Médecine
ROUSSEAU Audrey	Anatomie et cytologie pathologiques	Médecine
ROUSSEAU Pascal	Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique	Médecine
ROUSSELET Marie-Christine	Anatomie et cytologie pathologiques	Médecine
ROY Pierre-Marie	Médecine d'urgence	Médecine
SAULNIER Patrick	Biophysique et Biostatistiques	Pharmacie
SERAPHIN Denis	Chimie organique	Pharmacie
SCHMIDT Aline	Hématologie ; transfusion	Médecine
TRZEPIZUR Wojciech	Pneumologie	Médecine
UGO Valérie	Hématologie ; transfusion	Médecine
URBAN Thierry	Pneumologie	Médecine
VAN BOGAERT Patrick	Pédiatrie	Médecine
VENARA Aurélien	Chirurgie viscérale et digestive	Médecine
VENIER-JULIENNE Marie-Claire	Pharmacotechnie	Pharmacie
VERNY Christophe	Neurologie	Médecine
WILLOTEAUX Serge	Radiologie et imagerie médicale	Médecine

MAÎTRES DE CONFÉRENCES

ANGOULVANT Cécile	Médecine Générale	Médecine
BAGLIN Isabelle	Chimie thérapeutique	Pharmacie
BASTIAT Guillaume	Biophysique et Biostatistiques	Pharmacie
BEAUVILLAIN Céline	Immunologie	Médecine
BEGUE Cyril	Médecine générale	Médecine
BELIZNA Cristina	Médecine interne	Médecine
BELONCLE François	Réanimation	Médecine
BENOIT Jacqueline	Pharmacologie	Pharmacie
BESSAGUET Flavien	Physiologie Pharmacologie	Pharmacie
BIERE Loïc	Cardiologie	Médecine
BLANCHET Odile	Hématologie ; transfusion	Médecine
BOISARD Séverine	Chimie analytique	Pharmacie
BRIET Claire	Endocrinologie, Diabète et maladies métaboliques	Médecine
BRIS Céline	Biochimie et biologie moléculaire	Pharmacie
CAPITAIN Olivier	Cancérologie ; radiothérapie	Médecine
CASSEREAU Julien	Neurologie	Médecine
CHEVALIER Sylvie	Biologie cellulaire	Médecine
CLERE Nicolas	Pharmacologie / physiologie	Pharmacie

COLIN Estelle	Génétique	Médecine
DERBRE Séverine	Pharmacognosie	Pharmacie
DESHAYES Caroline	Bactériologie virologie	Pharmacie
FERRE Marc	Biologie moléculaire	Médecine
FORTRAT Jacques-Olivier	Physiologie	Médecine
GUELFF Jessica	Médecine Générale	Médecine
HAMEL Jean-François	Biostatistiques, informatique médicale	Médicale
HELESBEUX Jean-Jacques	Chimie organique	Pharmacie
HERIVAUX Anaïs	Biotechnologie	Pharmacie
HINDRE François	Biophysique	Médecine
JOUSSET-THULLIER Nathalie	Médecine légale et droit de la santé	Médecine
JUDALET-ILLAND Ghislaine	Médecine générale	Médecine
KHIATI Salim	Biochimie et biologie moléculaire	Médecine
KUN-DARBOIS Daniel	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie	Médecine
LACOEUILLE Franck	Radiopharmacie	Pharmacie
LANDREAU Anne	Botanique/ Mycologie	Pharmacie
LEBDAL Souhil	Urologie	Médecine
LEGEAY Samuel	Pharmacocinétique	Pharmacie
LEMEE Jean-Michel	Neurochirurgie	Médecine
LE RAY-RICHOMME Anne- Marie	Pharmacognosie	Pharmacie
LEPELTIER Elise	Chimie générale	Pharmacie
LETOURNEL Franck	Biologie cellulaire	Médecine
LIBOUBAN Hélène	Histologie	Médecine
LUQUE PAZ Damien	Hématologie biologique	Médecine
MABILLEAU Guillaume	Histologie, embryologie et cytogénétique	Médecine
MALLET Sabine	Chimie Analytique	Pharmacie
MAROT Agnès	Parasitologie et mycologie médicale	Pharmacie
MESLIER Nicole	Physiologie	Médecine
MIOT Charline	Immunologie	Médecine
MOUILLIE Jean-Marc	Philosophie	Médecine
NAIL BILLAUD Sandrine	Immunologie	Pharmacie
PAILHORIE Hélène	Bactériologie-virologie	Médecine
PAPON Xavier	Anatomie	Médecine
PASCO-PAPON Anne	Radiologie et imagerie médicale	Médecine
PECH Brigitte	Pharmacotechnie	Pharmacie
PENCHAUD Anne-Laurence	Sociologie	Médecine
PIHET Marc	Parasitologie et mycologie	Médecine
POIROUX Laurent	Sciences infirmières	Médecine
PY Thibaut	Médecine Générale	Médecine
RAMOND-ROQUIN Aline	Médecine Générale	Médecine
RINEAU Emmanuel	Anesthésiologie réanimation	Médecine
RIOU Jérémie	Biostatistiques	Pharmacie
RIQUIN Elise	Pédopsychiatrie ; addictologie	Médecine
ROGER Emilie	Pharmacotechnie	Pharmacie
SAVARY Camille	Pharmacologie-Toxicologie	Pharmacie

SCHMITT Françoise	Chirurgie infantile	Médecine
SCHINKOWITZ Andréas	Pharmacognosie	Pharmacie
SPIESSER-ROBELET Laurence	Pharmacie Clinique et Education Thérapeutique	Pharmacie
TESSIER-CAZENEUVE Christine	Médecine Générale	Médecine
TEXIER-LEGENDRE Gaëlle	Médecine Générale	Médecine
VIAULT Guillaume	Chimie organique	Pharmacie

AUTRES ENSEIGNANTS

PRCE		
AUTRET Erwan	Anglais	Médecine
BARBEROUSSE Michel	Informatique	Médecine
BRUNOIS-DEBU Isabelle	Anglais	Pharmacie
FISBACH Martine	Anglais	Médecine
O'SULLIVAN Kayleigh	Anglais	Médecine
PAST		
CAVAILLON Pascal	Pharmacie Industrielle	Pharmacie
DILÉ Nathalie	Officine	Pharmacie
MOAL Frédéric	Pharmacie clinique	Pharmacie
PAPIN-PUREN Claire	Officine	Pharmacie
SAVARY Dominique	Médecine d'urgence	Médecine
ATER		
Arrivée prévue nov 2021	Immunologie	Pharmacie
PLP		
CHIKH Yamina	Economie-gestion	Médecine
AHU		
CORVAISIER Mathieu	Pharmacie Clinique	Pharmacie
IFRAH Amélie	Droit de la Santé	Pharmacie
LEBRETON Vincent	Pharmacotechnie	Pharmacie

Je tiens à remercier le Pr. Aubé Christophe et le Pr. Paisant Anita pour leur précieuse aide qui a été décisive dans la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier le Dr. Jacquemin-Maazouzi Sarah et le Dr. Maazouzi Amine pour leur contribution cruciale dans la réalisation de cette étude.

Je tiens à remercier le Dr. Hamel Jean-François pour son aide qui a été nécessaire pour la réalisation de l'analyse statistique paru dans cet article.

Je tiens à remercier mon père, El Chammas Toni, ainsi que ma mère, El Chammas Leila, leur dévouement pour leurs enfants, leur courage durant la guerre, leur patience face aux privations, leur constance face aux épreuves, leur persévérance dans les peines, sont tous un témoignage poignant de la grâce de Dieu. Je ne peux trouver les mots nécessaires pour exprimer ma reconnaissance pour tout ce qu'ils ont fait.

Afin de remercier mon père, je ne peux que reproduire les paroles qu'emploient les Saintes Écritures dans le Psaume 128 :

¹ *Cantique des degrés.*

Heureux tout homme qui craint l'Éternel, Qui marche dans ses voies !

² **Tu jouis alors du travail de tes mains, Tu es heureux, tu prospères.**

³ **Ta femme est comme une vigne féconde dans l'intérieur de ta maison ;
Tes fils sont comme des plants d'olivier, autour de ta table.**

⁴ **C'est ainsi qu'est béni l'homme qui craint l'Éternel.**

⁵ **L'Éternel te bénira de Sion, et tu verras le bonheur de Jérusalem Tous les jours de ta vie ;**

⁶ **Tu verras les fils de tes fils.**

Que la paix soit sur Israël !

Afin de remercier ma mère, je ne peux que reproduire les paroles qu'emploient les Saintes Écritures dans le Proverbe 31 :

¹⁰ **Qui peut trouver une femme vertueuse ?**

Elle a bien plus de valeur que les perles.

¹¹ **Le cœur de son mari a confiance en elle**

²⁷ **Elle veille sur ce qui se passe dans sa maison,
Et elle ne mange pas le pain de paresse.**

²⁸ **Ses fils se lèvent, et la disent heureuse;**

Son mari se lève, et lui donne des louanges:

²⁹ **« Plusieurs filles ont une conduite vertueuse;**

Mais toi, tu les surpasses toutes. »

³⁰ **La grâce est trompeuse, et la beauté est vaine ;
La femme qui craint l'Éternel est celle qui sera louée.**

³¹ **Récompensez-la du fruit de son travail,
Et qu'aux portes ses œuvres la louent.**

Je tiens à remercier me frère El Chammas David pour toute son affection fraternelle.
Voici les paroles du Psaume 133 :

¹ *Cantique des degrés.*

De David.

Voici, oh! qu'il est agréable, qu'il est doux pour des frères de demeurer ensemble!

² **C'est comme l'huile précieuse qui, répandue sur la tête, descend sur la barbe, sur la barbe d'Aaron, qui descend sur le bord de ses vêtements.**

³ **C'est comme la rosée de l'Hermon, qui descend sur les montagnes de Sion;
Car c'est là que l'Éternel envoie la bénédiction, la vie, pour l'éternité.**

Je tiens à remercier tous les membres de la famille au Liban, en France, en Australie, au Canada et en Allemagne.

⁸ **Si quelqu'un n'a pas soin des siens, et principalement de ceux de sa famille, il a renié la foi, et il est pire qu'un infidèle. – Première Épître de l'Apôtre Paul à Timothée 5 : 8**

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous mes amis chrétiens et particulièrement les chrétiens libanais qui souffrent, depuis des années maintenant de privations, pressions, persécutions et afflictions sachant que la légère affliction du moment présent, produit pour nous un poids éternel de gloire.

⁸ Jésus-Christ est le même hier, aujourd'hui, et éternellement. – *Épître aux Hébreux 13 : 8*

²⁰ Que le Dieu de paix, qui a ramené d'entre les morts le grand berger des brebis, par le sang d'une alliance éternelle, notre Seigneur Jésus, ²¹ vous rende capables de toute bonne œuvre pour l'accomplissement de sa volonté; qu'il fasse en vous ce qui lui est agréable, par Jésus-Christ, auquel soit la gloire aux siècles des siècles! Amen! - *Épître aux Hébreux 13 : 20-21*

Finalement je rends grâce au Dieu véritable, Père, Fils, Saint Esprit de qui proviennent toutes choses et à qui je dois toutes choses.

¹⁷ Au roi des siècles, immortel, invisible, seul Dieu, soient honneur et gloire, aux siècles des siècles! Amen! - *Première Épître de l'Apôtre Paul à Timothée 1 : 17*

List of abbreviations

[illegible]

Plan

RESUME

INTRODUCTION

METHODS

- 1. Overall study protocol**
- 2. Statistical analysis**

RESULTS

- 1. Sphere n°1**
- 2. Sphere n°2**

DISCUSSION

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

TABLE DES MATIERES

ANNEXES

ULTRASOUND SHEAR WAVE ELASTOGRAPHY: A COMPARISON BETWEEN COMMERCIALY- AVAILABLE SYSTEMS USING A VISCOELASTIC PHANTOM

El Chammas Daniel¹, Hamel Jean-François³, Paisant Anita^{1,2}, Jacquemin Sarah¹, Maazouzi Amine¹, Aubé Christophe^{1,2}

1. Département de Radiologie, Centre Hospitalier Universitaire d'Angers, 49933 Angers, France.

2. Laboratoire HIFIH, UPRES 3859, SFR 4208, Université d'Angers, 49045 Angers, France.

3. Maison de la Recherche Clinique, Centre Hospitalier Universitaire, Angers 49000, France.

RESUME

Objectif : Évaluer la variabilité des mesures élastographie de dureté entre différents systèmes d'échographies commercialisés en utilisant un fantôme aux propriétés viscoélastiques simulant des duretés hépatiques normales et pathologiques.

Méthode : Quatre observateurs différents ont effectué des mesures d'élastographie sur des fantômes dont la dureté est de 8 kPa et de 14kPa moyennant 5 systèmes échographiques différents disposant d'une ou deux modalités d'élastographie à savoir p-SWE et 2D-SWE. L'analyse statistique des données recueillies cherche à évaluer des variations significatives des mesures entre observateurs et entre systèmes échographiques par rapport à la dureté théorique en fixant un seuil de significativité (p) à 0.05.

Résultats : La variation des mesures liée à la multiplication des observateurs et la variation liée à la multiplication des mesures n'étaient pas statistiquement significatives aussi bien pour des duretés de 8kPa ou de 14kPa. Concernant la dureté de 8kPa seuls les systèmes SAMSUNG-p-SWE et SEQUOIA – DAX – p-SWE ne montraient pas d'erreur résiduelle significative avec une plus grande précision pour SAMSUNG-p-SWE. Concernant la dureté de 14 kPa, seul SEQUOIA - 2D-SWE ne montrait pas d'erreur résiduelle significative, sinon tous les systèmes échographiques ont présenté une surestimation significative de la dureté allant jusqu'à plus de 71%.

Conclusion : Les variations des mesures de dureté sur fantôme ne sont pas affectées de manière significative par la multiplication des mesures ou des observateurs mais par le système échographique, cette variation est d'autant plus prononcée que la dureté du fantôme utilisé augmente.

INTRODUCTION

Liver stiffness is commonly used in the assessment and the follow-up of chronic liver disease (CLD)(1–5). Beyond the assessment of liver fibrosis, the recent Baveno VI consensus workshop have suggested the use of this technique for the assessment of clinically significant portal hypertension (CSPH). Recent issued international guidelines have integrated liver stiffness in the definition of compensated advanced chronic liver disease (cACLD) using a “double cut-off” model using transient elastography (TE) and the Baveno VII consensus workshop extended the use of these cut-offs for the detection of CSPH (6,7). Hence, liver stiffness is becoming a factor of increasing clinical relevance. Transient elastography was the first reference technique to be used in routine medical practice, and further technical developments across the last decade made it possible for almost all ultrasound device manufacturers to integrated into their machines at least one elastography technique using shear wave speed (SWS) based on acoustic radiation force impulse (ARFI) technology. The most widespread modalities are point shear wave (p-SWE) or two-dimensional shear wave (2D-SWE) elastography.

Recently, the Quantitative Imaging Biomarker Alliance (QIBA) organized by the Radiological Society of North America (RSNA) showed a variability in the measurements of SWS across vendors estimated up to 17% approximately, constituting a potential source of error (8,9). Therefore, the aim of our study is to compare intersystem agreement between different imaging devices with both p-SWE and 2D-SWE using viscoelastic phantoms with area of different stiffness values.

METHODS

1. Overall study protocol

The study was conducted between March 2020 and April 2020 in the department of radiology of the Hospital University of Angers on a phantom (Model 049, Elasticity QA Phantom; Computerized Imaging Reference Systems, Inc) containing 8 viscoelastic spheres (VS) (one set of 4 small spheres and one set of 4 large spheres), having viscoelastic properties simulating the behavior of normal and fibrotic liver tissue. The characteristics of the phantom are referenced in table 1 and figure 1 shows the arrangement of the spheres. The measurements were acquired with 5 different ultrasound systems, all of them available at our institution, using p-SWE and 2D-SWE. Since some machines and probes offered the opportunity for both p-SWE and 2D- SWE, the total amount of modalities was up to 8. Table 2 summarizes the main characteristics of the different proprietary systems and SWE modalities. Imaging was performed using curvilinear low frequency transducers that are routinely used in liver imaging. The small spheres were excluded from the study in accordance with international guidelines (10-15). These spheres did not fill the required dimensions needed to assess their stiffness using the curvilinear probe, the region of interest (ROI) being of at least 1 cm in diameter. Also, these spheres were buried less than 3 cm below the surface. The large spheres were buried 3 cm below the surface to be in perfect accordance with the European Federation of Societies for Ultrasound in Medicine and Biology (EFSUMB)(10,11) and the World Federation for Ultrasound in Medicine and Biology (WFUMB) (12,13) guidelines and the recent update to the Society of Radiologists in Ultrasound liver Elastography Consensus Statement(14,15). Spheres n°3 and n°4 were excluded from the study since their viscoelastic properties were deemed irrelevant for our purposes since their stiffness values are not seen in common forms CLD and hence have no clinical relevance. Spheres n° 1 and n° 2 were included in the study

and their stiffness assessed. Four different observers acquired in one setting series of 10 SWS measures of each sphere amounting to 20 measures per observer and 80 measures in total. The different observers were acquainted with the technique and had at least a 24-month experience in practicing daily routine ultra-sound liver examination in the radiology department. All the measurements were done in accordance with published guidelines (13,16,17) with crucial care taken to minimize the pressure applied to the transducer to avoid any overestimation of stiffness values. Probes with p-SWE offered standard region of interest (ROI) size across all vendors and probes with 2D-SWE offered a circular ROI with a diameter of 1 cm across all vendors. No observer proceeded to any modification of the ROI size even if the system offered the possibility to do so. The observers were not blinded to the stiffness values of the spheres. Any measure was considered a failure when no numerical value or an error message was given by the system. The observers were advised not to repeat any measure in case of failure. The stiffness of each sphere was reported in kPa (Young modulus) as given by all the machines. All values were saved on the Picture Archiving and Communication System (PACS) of the radiology department and could be easily retrieved.

	Background	Sphere 1	Sphere 2	Sphere 3	Sphere 4
Batch ID	CGB3072	CGB3009	CGB3013	CGB3015	CGB3014
Speed of sound (m/s)	1540±6	1530±6	1533±6	1552±6	1573±6
Attenuation (dB/cm/MHz)	0.50±0.05	0.50±0.05	0.50±0.05	0.50±0.05	0.50±0.05
Elasticity (kPa)	25±4	8±3	14±4	45±5	80±8
Small sphere volume (cc)	NA	0.6	0.5	0.5	0.5
Large sphere volume (cc)	NA	4.3	4.2	4.2	4.2

Table 1 : CIRS Elasticity QA Phatom Model 049 - Serial number: D-5143-1, total weight: 3237 g

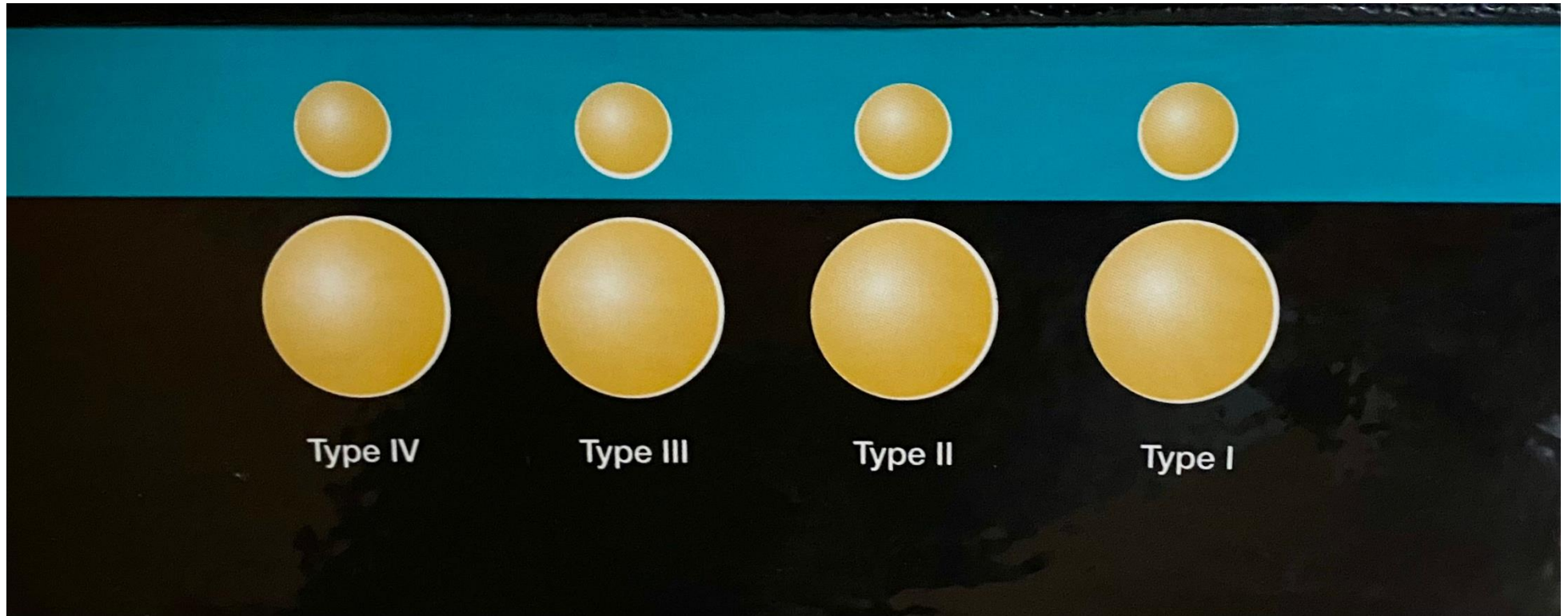


Figure 1 : Photograph showcasing the arrangement of the spheres in the phantom

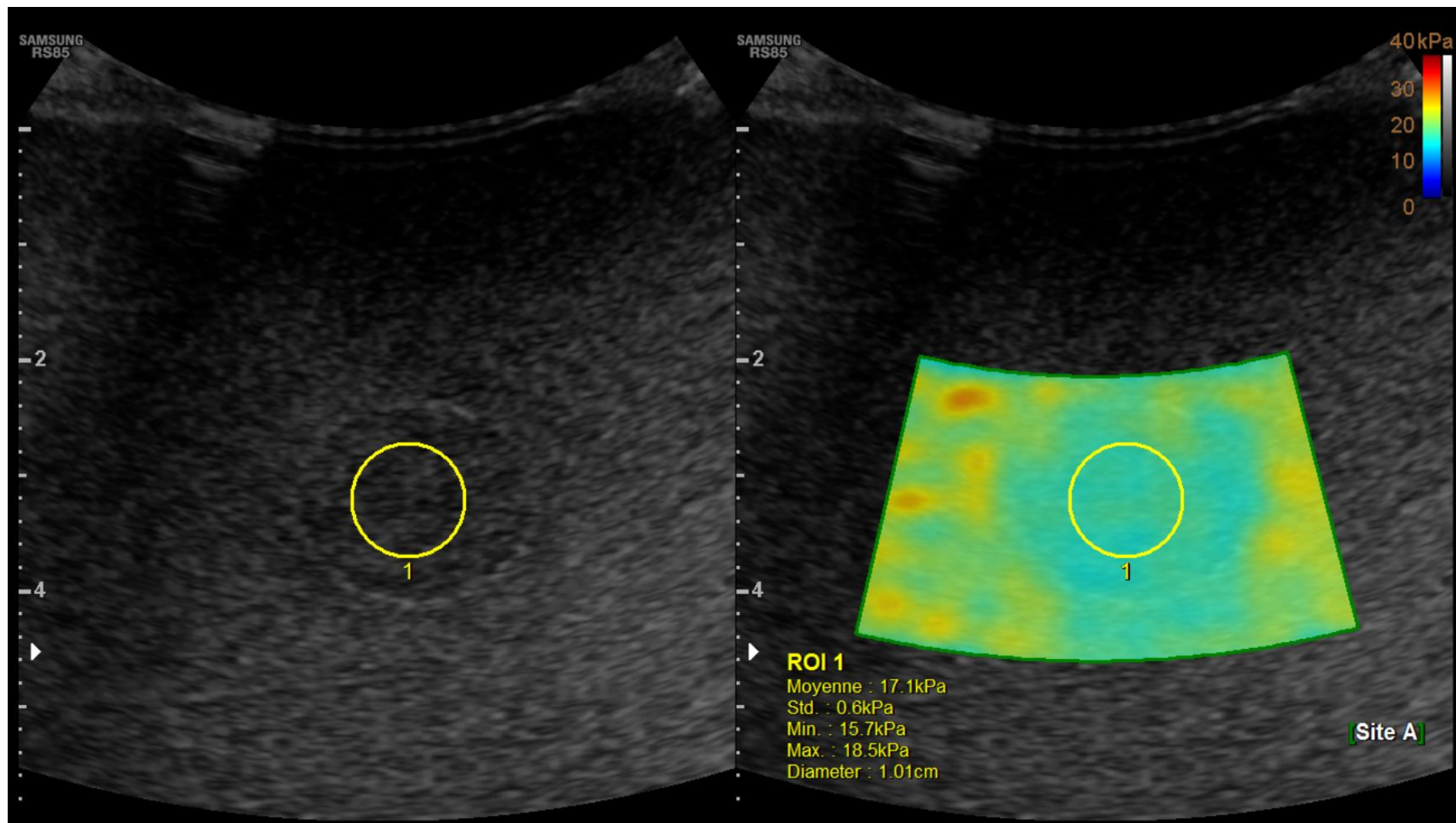


Figure 2 : Stiffness measurement using 2D-SWE technology

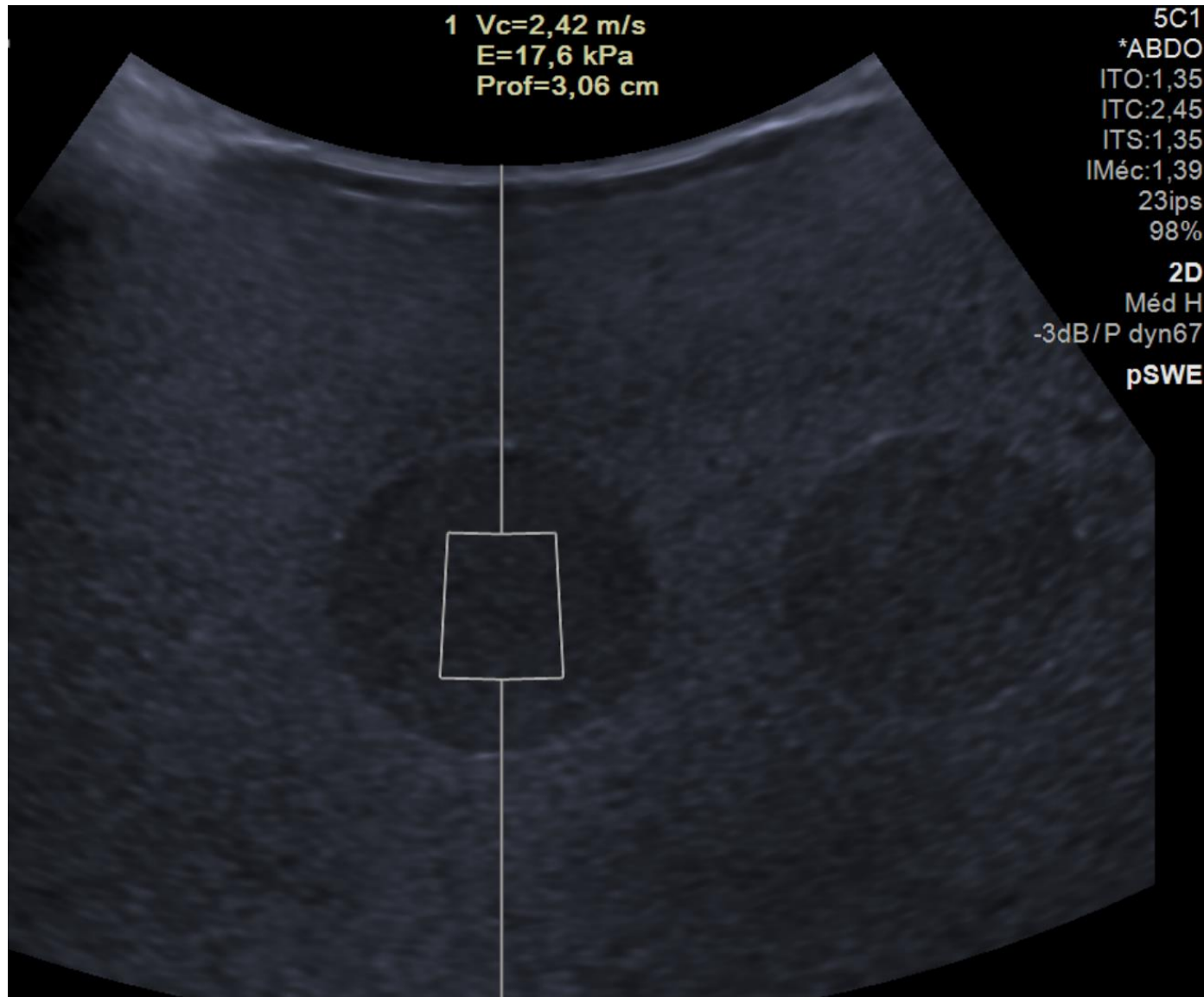


Figure 3 : Stiffness measurement using p-SWE technology

Vendor and system model	Ultrasound elastography modality
Samsung HS70A (Samsung Medison Co. Ltd., Seoul, Korea)	- p-SWE - 2D-SWE
SEQUOIA (Siemens Healthcare, Mountain View, CA)	- p-SWE - 2D-SWE - p-SWE DAX
S3000 (Siemens Healthcare, Mountain View, CA)	- p-SWE
Aixplorer (SuperSonic Imagine, Aix-en-Provence, France)	- 2D-SWE
MACH30 (SuperSonic Imagine (Aix-en-Provence, France)	- 2D-SWE

Table 2 : Vendor systems and different shear wave elastography techniques

2. Statistical analysis

Continuous data were described using mean and standard deviations, and compared using Mann & Whitney tests, whereas categorical data were described using percentages, and compared using Fisher exact tests.

The relationship between the considered ultrasound systems and the viscoelastic evaluation was evaluated independently for each set of spheres using linear mixed models. For these models, the ultrasound system was considered as a fixed effect categorical covariate, and the operator as a random effect covariate. The variance covariance structure of the residuals was defined as independents, depending on the ultrasound system, meaning that the covariance between measurements were assumed equal to zero, and the variances between measures performed by a given operator were assumed equal for a given ultrasound system, but could differ between different ultrasound systems. Such a variance-covariance structure allowed to evaluate the differences in measurement variability depending on the considered ultrasound system, independently from the operator. All the tests were performed considering a type I error set to 0.05. The statistical analyses were performed using Stata 14.1 software.

RESULTS

The failure rate of the different SWS evaluated systems was 0%, no observer failed to correctly acquire the stiffness of the viscoelastic sphere and the accuracy of the measurements was confirmed by an IQR/ median ratio < 30% across all observers.

1. Sphere n°1

Concerning the residual error in stiffness measurement between systems for sphere n°1; SAMSUNG-p-SWE and SEQUOIA – DAX – p-SWE showed no significant error in measures as shown in table 3. All other modalities showed significant errors (p-value <0,05). MACH 30 - 2D-SWE showed the most substantial error with an overestimation of 1,5 kPa (95% CI [1,14; 1,89]) that represent an overestimation of 18.75%. SAMSUNG - 2D-SWE showed the most substantial underestimation among all systems with a residual error of - 1,2 kPa (95% CI [-1,5; -0,98]) that represent an underestimation of 15%. There was no significant overall operator-dependent or measure-dependent residual variance (table 4). Between SAMSUNG-p-SWE and SEQUOIA – DAX – p-SWE, the latter system exhibited a lower residual device-dependent variance (0,57 versus 0,06 Kpa²) signifying a lower dispersion of measured values around the theoretical value (table 5). S3000 – p-SWE showed the lowest measurement dispersion despite a significant overestimation of stiffness values (tables 3 and 5).

Sphere n°1	Mean error (kPa)	p-value	[95% Conf.Interval]
AIXPLORER - 2D-SWE	0,6	0,002	[0,36; 0,91]
MACH 30 - 2D-SWE	1,5	0	[1,14; 1,89]
S3000 - p-SWE	0,5	0,006	[0,25; 0,79]
SAMSUNG - 2D-SWE	-1,2	0	[-1,5; -0,98]
SAMSUNG - p-SWE	-0,3	0,39	[-0,90; 0,35]
SEQUOIA - 2D-SWE	-1,1	0	[-1,46; -0,85]
SEQUOIA - DAX - p-SWE	0,2	0,103	[-0,05; 0,51]
SEQUOIA - p-SWE	-0,5	0,002	[-0,79; -0,20]

Table 3 : Mean residual error in stiffness measurement for sphere n°1 (8kPa)

Sphere n°1	Estimate (kPa ²)	[95% Conf.Interval]
Operator dependent residual variance	0,01	[0,0003; 0,421]
Measure dependent residual variance	0,01	[0,001; 0,17]

Table 4 : Operator-dependent and measure-dependent variance of measurements for sphere n°1 (8kPa)

Sphere n°1	Estimate (kPa ²)	[95% Conf.Interval]
AIXPLORER - 2D-SWE	0,02	[0,005; 0,12]
MACH 30 - 2D-SWE	0,17	[0,05; 0,61]
S3000 - p-SWE	0,01	[0,002; 0,087]
SAMSUNG - 2D-SWE	0,01	[0,002; 0,079]
SAMSUNG - p-SWE	0,57	[0,16; 1,99]
SEQUOIA - 2D-SWE	0,09	[0,025; 0,34]
SEQUOIA - DAX - p-SWE	0,06	[0,016; 0,26]
SEQUOIA - p-SWE	0,08	[0,02; 0,30]

Table 5 : System-dependent residual variance of stiffness measures for sphere n°1(8kPa)

2. Sphere n°2

Concerning the measures done on sphere n°2, all system showed significant residual error of stiffness measurement ($p\text{-value} < 0,05$) except for SEQUOIA - 2D-SWE (tables 6 and 8). All systems overestimated the stiffness of the viscoelastic sphere n°2 and S3000 – p-SWE had the highest overestimation, nearly 10 kPa (95% CI [9,27; 10,53]), an overestimation of 71.5%. Despite the absence of signification residual error for SEQUOIA - 2D-SWE lacked precision more than any other system with the highest rate of system-dependent residual variance (table 8). There was no overall operator-dependent or measure-dependent significant residual variance (table 7).

Sphere n°2	Residual error (kPa)	p-value	[95% Conf.Interval]
AIXPLORER - 2D-SWE	5,3	0	[4,93; 5,64]
MACH 30 - 2D-SWE	5,5	0	[5,22; 5,76]
S3000 - p-SWE	9,9	0	[9,27; 10,53]
SAMSUNG - 2D-SWE	3,0	0	[2,75; 3,31]
SAMSUNG - p-SWE	4,6	0	[3,77; 5,49]
SEQUOIA - 2D-SWE	1,8	0,177	[-0,84; 4,53]
SEQUOIA - DAX - p-SWE	5,8	0	[5,23; 6,46]
SEQUOIA - p-SWE	5,2	0	[4,30; 6,09]

Table 6 : Mean residual error in stiffness measurement for sphere n°2 (14kPa)

Sphere n°2	Estimate (kPa ²)	[95% Conf.Interval]
Observer-dependent residual variance	0,03	[0,003; 0,25]
Measure-dependent residual variance	0	N.A.

Table 7 : Operator-dependent and measure-dependent variance of measurements for sphere n°2 (14kPa)

Sphere n°2 - Device-dependent residual variance	Estimate (kPa ²)	[95% Conf.Interval]
AIXPLORER - 2D-SWE	0,09	[0,02; 0,37]
MACH 30 - 2D-SWE	0,03	[0,008; 0,14]
S3000 – p-SWE	0,58	[0,16; 2,08]
SAMSUNG - 2D-SWE	0,01	[0,002; 0,09]
SAMSUNG – p-SWE	1,12	[0,32; 3,95]
SEQUOIA - 2D-SWE	11,20	[3,23; 38,75]
SEQUOIA - DAX- p-SWE	0,55	[0,16; 1,90]
SEQUOIA – p-SWE	1,20	[0,34; 4,19]

Table 8 : System-dependent residual variance of stiffness measures for sphere n°2 (14kPa)

DISCUSSION

Several studies have evaluated the diagnostic performance of both p-SWE and 2D-SWE compared to TE and showed them to be reliable techniques for the assessment of liver fibrosis with some authors suggesting increased accuracy of 2D-SWE over p-SWE and TE (2,3,18–20). Since some discrepancies have been seen in measurements across different vendor systems ranging up to 17% (8,9), our endeavor in this study was to assess intersystem agreement between proprietary vendor systems while also considering variance due to repeated measurements across four different observers using 5 different systems and 8 different modalities of SWE with both p-SWE and 2D-SWE techniques.

Concerning low stiffness values (8 kPa), the study shows significant discrepancies across vendors with a maximal overestimation up to 18,75% of the theoretical value and an underestimation of 15% of the theoretical value. Only two modalities showed no significant residual error SAMSUNG-p-SWE and SEQUOIA – DAX – p-SWE, with the Siemens device exhibiting a higher precision rate.

Concerning higher stiffness values (14kPa), the study shows a significant overestimation of the theoretical stiffness across all vendors with a maximal overestimation up to 71,5% except for SEQUOIA – 2D - SWE.

While errors concerning low stiffness values still accord with the conclusion of QUIBA, the errors concerning high stiffness values do not. This finding seems to be consistent with the phenomenon of increased variability of measurements between systems in stiffer material as previously demonstrated by some authors using human models (2), but may not fully account for such a discrepancy as found in our study. This increase is unlikely to be due to specific features of each probe or the proprietary algorithms used by the machines since all modalities seem to be affected by the phenomena of increased variability. Also, variance in probe

frequency is unlikely to account for such a phenomenon since only curvilinear probes with low frequency were used.

It is noteworthy that in both sphere n°1 and sphere n°2, observer-dependent residual variance and measurement-dependent residual variance were statistically non-significant. This outcome is consistent with several studies showing an excellent intra-observer and inter-observer agreement across different modalities (TE, p-SWE, 2D-SWE) and different vendors (19,20,24,25). This outcome may suggest the use of elastography techniques in a longitudinal follow-up for patient with risk factors of liver disease or patent chronic liver disease to assess the progress of disease.

Our study found no failure in measurements with a failure rate at 0% in coherence with former studies that have shown very low failure rates estimated at less than 2% in human models; since this study was conducted on a viscoelastic immobile foreign body, we were not surprised by this outcome. Furthermore, the quality of the acquired data was confirmed with an IQR/median ratio below 30% for all of observers without exception.

Our study has several limitations, it included only low frequency curvilinear probes, we purposefully omitted the small spheres since they did not fulfil specific criteria previously mentioned, being buried less than 3 cm below the surface and having a size unfit for the placing of a ROI of at least 1cm in diameter. Spheres n°3 and n°4 of the large viscoelastic bodies were excluded since they had stiffness values beyond the common spectrum of pathological stiffness values of fibrotic livers. The choice of sphere n°1 and n°2 was adequate since their stiffness values were in tune with the two-cut-off model of 10/15 kPa proposed by several authors. We arbitrarily chose 8kPa for sphere n°1 and 14kPa for sphere n°2 without considering the margin of error of ± 3 (for sphere n°1) and ± 4 (for sphere n°2). Hence, the two double cut-off model retained in our study was set 8/14 kPa. Since much debate remains concerning

the choice of the numerical values of the cut-offs (10/15kPa or 7-8/12kPa)(21–23), we consider that the values we chose are not out of tune with the recommended cut-offs.

Since our study was done on a phantom, the assessment of interfering factors in the variability of stiffness values across different modalities on human subjects - whether healthy or with chronic liver disease - could not be evaluated, especially motion due to patient breathing and heart beating or abdominal wall thickness in overweight patients, thus implementing our results in routine clinical practice must be given due caution.

CONCLUSION

To sum all things up, our study showed that operator-dependent and measurement-dependent variance are not of any substantial significance in the assessment of the SWS in a phantom, adding more weight to the robustness of the technique. The small margin of residual error in the assessment of low stiffness values may suggest that the technique is better suited to rule out clinically significant fibrosis. The over-estimation of higher stiffness values may reduce the number of patients in the “grey zone” according to the double cut-off model (21) with the risk of over-diagnosis and over-treatment. Further studies in vivo are needed to confirm the clinical relevance of our results and a constant standardization of SWE techniques between vendors may contribute to improve intersystem agreement and reduce error.

BIBLIOGRAPHIE

1. Barr RG. Elastography: a practical approach. New York Stuttgart Delhi: Thieme; 2017. 178 p.
2. Samir AE, Dhyani M, Vij A, Bhan AK, Halpern EF, Méndez-Navarro J, et al. Shear-Wave Elastography for the Estimation of Liver Fibrosis in Chronic Liver Disease: Determining Accuracy and Ideal Site for Measurement. *Radiology*. 2015 Mar;274(3):888–96.
3. Osman AM, El Shimy A, Abd El Aziz MM. 2D shear wave elastography (SWE) performance versus vibration-controlled transient elastography (VCTE/fibroscan) in the assessment of liver stiffness in chronic hepatitis. *Insights Imaging*. 2020 Mar 10;11(1):38.
4. Srinivasa Babu A, Wells ML, Teytelboym OM, Mackey JE, Miller FH, Yeh BM, et al. Elastography in Chronic Liver Disease: Modalities, Techniques, Limitations, and Future Directions. *RadioGraphics*. 2016 Nov;36(7):1987–2006.
5. Kennedy P, Wagner M, Castéra L, Hong CW, Johnson CL, Sirlin CB, et al. Quantitative Elastography Methods in Liver Disease: Current Evidence and Future Directions. *Radiology*. 2018 Mar;286(3):738–63.
6. Ji Y, Li J, He Q, Zhou L, Chen J. Baveno VI elastography criteria for ruling in cACLD works well in patients with MAFLD. *J Hepatol*. 2021 Nov 1;75(5):1243–5.
7. Franchis R de, Bosch J, Garcia-Tsao G, Reiberger T, Ripoll C, Abraldes JG, et al. Baveno VII – Renewing consensus in portal hypertension. *J Hepatol*. 2022 Apr 1;76(4):959–74.
8. Palmeri M, Nightingale K, Fielding S, Rouze N, Yufeng Deng, Lynch T, et al. RSNA QIBA ultrasound shear wave speed Phase II phantom study in viscoelastic media. In: 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS) [Internet]. Taipei, Taiwan: IEEE; 2015 [cited 2022 Apr 23]. p. 1–4. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7329478/>
9. Hall TJ, Milkowski A, Garra B, Carson P, Palmeri M, Nightingale K, et al. RSNA/QIBA: Shear wave speed as a biomarker for liver fibrosis staging. In: 2013 IEEE International

Ultrasonics Symposium (IUS) [Internet]. Prague, Czech Republic: IEEE; 2013 [cited 2022 Apr 23]. p. 397–400. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6725226/>

10. Bamber J, Cosgrove D, Dietrich C, Fromageau J, Bojunga J, Calliada F, et al. EFSUMB Guidelines and Recommendations on the Clinical Use of Ultrasound Elastography. Part 1: Basic Principles and Technology. *Ultraschall Med - Eur J Ultrasound*. 2013 Apr 4;34(02):169–84.
11. Cosgrove D, Piscaglia F, Bamber J, Bojunga J, Correias JM, Gilja O, et al. EFSUMB Guidelines and Recommendations on the Clinical Use of Ultrasound Elastography. Part 2: Clinical Applications. *Ultraschall Med - Eur J Ultrasound*. 2013 Apr 19;34(03):238–53.
12. Shiina T, Nightingale KR, Palmeri ML, Hall TJ, Bamber JC, Barr RG, et al. WFUMB Guidelines and Recommendations for Clinical Use of Ultrasound Elastography: Part 1: Basic Principles and Terminology. *Ultrasound Med Biol*. 2015 May;41(5):1126–47.
13. Ferraioli G, Filice C, Castera L, Choi BI, Sporea I, Wilson SR, et al. WFUMB Guidelines and Recommendations for Clinical Use of Ultrasound Elastography: Part 3: Liver. *Ultrasound Med Biol*. 2015 May;41(5):1161–79.
14. Barr RG, Ferraioli G, Palmeri ML, Goodman ZD, Garcia-Tsao G, Rubin J, et al. Elastography Assessment of Liver Fibrosis: Society of Radiologists in Ultrasound Consensus Conference Statement. *Radiology*. 2015 Sep;276(3):845–61.
15. Ferraioli G, Wong VWS, Castera L, Berzigotti A, Sporea I, Dietrich CF, et al. Liver Ultrasound Elastography: An Update to the World Federation for Ultrasound in Medicine and Biology Guidelines and Recommendations. *Ultrasound Med Biol*. 2018 Dec;44(12):2419–40.
16. Săftoiu A, Gilja OH, Sidhu PS, Dietrich CF, Cantisani V, Amy D, et al. The EFSUMB Guidelines and Recommendations for the Clinical Practice of Elastography in Non-Hepatic Applications: Update 2018. *Ultraschall Med - Eur J Ultrasound*. 2019 Aug;40(04):425–53.
17. Barr RG, Wilson SR, Rubens D, Garcia-Tsao G, Ferraioli G. Update to the Society of Radiologists in Ultrasound Liver Elastography Consensus Statement. *Radiology* [Internet].

- 2020 Jun 9 [cited 2022 Apr 23]; Available from: <https://pubs.rsna.org/doi/full/10.1148/radiol.2020192437>
18. Gilligan LA, Trout AT, Bennett P, Dillman JR. Repeatability and Agreement of Shear Wave Speed Measurements in Phantoms and Human Livers Across 6 Ultrasound 2-Dimensional Shear Wave Elastography Systems: Invest Radiol. 2020 Apr;55(4):191–9.
 19. Fang C, Konstantatou E, Romanos O, Yusuf GT, Quinlan DJ, Sidhu PS. Reproducibility of 2-Dimensional Shear Wave Elastography Assessment of the Liver: A Direct Comparison With Point Shear Wave Elastography in Healthy Volunteers: Reproducibility of 2-Dimensional SWE in Healthy Volunteers. J Ultrasound Med. 2017 Aug;36(8):1563–9.
 20. Franchi-Abella S, Elie C, Correias JM. Ultrasound elastography: Advantages, limitations and artefacts of the different techniques from a study on a phantom. Diagn Interv Imaging. 2013 May 1;94(5):497–501.
 21. Viganò M, Paggi S, Lampertico P, Fraquelli M, Massironi S, Ronchi G, et al. Dual cut-off transient elastography to assess liver fibrosis in chronic hepatitis B: a cohort study with internal validation. Aliment Pharmacol Ther. 2011;34(3):353–62.
 22. Genescà J, Abraldes JG, Bosch J. Do we need to re-define the Baveno VI elastography criteria for compensated advanced chronic liver disease (cACLD)? J Hepatol. 2021 Sep;75(3):750–2.
 23. Cristoferi L, Nardi A, Carbone M. Transient elastography in chronic liver disease: Beware of the cut-offs! J Hepatol. 2021 Nov 1;75(5):1245–6.
 24. Ferraioli G, Silvestri AD, Lissandrin R, Maiocchi L, Tinelli C, Filice C, et al. Evaluation of Inter-System Variability in Liver Stiffness Measurements. Ultraschall Med - Eur J Ultrasound. 2019 Feb;40(01):64–75.

25. Yoon JH, Lee JM, Joo I, Lee ES, Sohn JY, Jang SK, et al. Hepatic Fibrosis: Prospective Comparison of MR Elastography and US Shear-Wave Elastography for Evaluation. *Radiology*. 2014 Dec;273(3):772–82.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Photograph showcasing the arrangement of the spheres in the phantom 7

Figure 2 : Stiffness measurement using 2D-SWE technology 8

Figure 3 : Stiffness measurement using p-SWE technology 9

LISTE DES TABLEAUX

Table 1 : CIRS Elasticity QA Phantom Model 049 - Serial number: D-5143-1, total weight: 3237 g	6
Table 2 : Vendor systems and different shear wave elastography techniques	10
Table 3 : Mean residual error in stiffness measurement for sphere n°1 (8kPa)	13
Table 4 : Operator-dependent and measure-dependent variance of measurements for sphere n°1 (8kPa)	13
Table 5 : System-dependent residual variance of stiffness measures for sphere n°1(8kPa). ..	14
Table 6 : Mean residual error in stiffness measurement for sphere n°2 (14kPa)	16
Table 7 : Operator-dependent and measure-dependent variance of measurements for sphere n°2 (14kPa)	16
Table 8 : System-dependent residual variance of stiffness measures for sphere n°2 (14kPa)	17

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ.....	2
INTRODUCTION	3
METHODS	4
1. Overall study protocol.....	4
2. Statistical analysis	11
RESULTS.....	12
1. Sphere n°1	12
2. Sphere n°2	15
DISCUSSION	18
CONCLUSION	20
BIBLIOGRAPHIE.....	22
LISTE DES FIGURES	26
LISTE DES TABLEAUX.....	27
TABLE DES MATIERES	28
ANNEXES.....	I

ANNEXES

**ELASTOGRAPHIE PAR ULTRASON : COMPARAISON SUR FANTOME DES
DIFFERENTS SYSTEMES COMMERCIALISES**

RÉSUMÉ

Objectif : Évaluer la variabilité des mesures d'élastographie de dureté entre différents systèmes d'échographies commercialisés à disposition au CHU d'Angers en utilisant un fantôme aux propriétés viscoélastiques simulant des duretés hépatiques normales et pathologiques.

Méthode : Quatre observateurs différents ont effectué des mesures d'élastographie sur des fantômes dont la dureté est de 8 kPa et de 14kPa moyennant 5 systèmes échographiques différents disposant des deux modalités d'élastographie à savoir p-SWE et 2D-SWE. L'analyse statistique des données recueillies cherche à évaluer des variations significatives des mesures entre observateurs et entre systèmes échographiques par rapport à la dureté théorique en fixant un seuil de significativité (p) à 0.05.

Résultats : La variation des mesures liée à la multiplication des observateurs et la variation liée à la multiplication des mesures n'étaient pas statistiquement significatives aussi bien pour des duretés de 8kPa ou de 14kPa. Concernant la dureté de 8kPa seuls les systèmes SAMSUNG-p-SWE et SEQUOIA - DAX - p-SWE ne montraient pas d'erreur résiduelle significative pour avoir une plus grande précision pour SAMSUNG-p-SWE. Concernant la dureté de 14 kPa, seul SEQUOIA - 2D-SWE ne montrait pas d'erreur résiduelle significative, sinon tous les systèmes échographiques ont présenté une surestimation significative de la dureté allant jusqu'à plus de 71%.

Conclusion : Les variations des mesures de dureté sur fantôme ne semblent pas affectées de manière significative par la multiplication des mesures ou des observateurs mais plutôt par le choix du système échographique commercialisé, cette variation est d'autant plus prononcée que la dureté du fantôme utilisé augmente.

Mots-clés : élastographie, fantôme, dureté, erreur résiduelle, reproductibilité

**ULTRASOUND SHEAR WAVE ELASTOGRAPHY: A COMPARISON BETWEEN
COMMERCIALLY-AVAILABLE SYSTEMS USING A VISCOELASTIC PHANTOM**

ABSTRACT

Purpose : To evaluate the variability of elastography measurements between different ultrasound systems available at the University Hospital of Angers using a phantom with viscoelastic properties simulating normal and pathological liver stiffness.

Method: Four different observers performed elastography measurements on phantoms with stiffness values of 8 kPa and 14 kPa using 5 different ultrasound systems with the two elastography modalities: p-SWE and 2D-SWE. The statistical analysis of the collected data evaluated measurements variations between observers and between ultrasound systems in relation to the theoretical stiffness value with a p value of 0.05.

Results: The variation of measurements related to the multiplication of observers and the variation related to the multiplication of measurements were not statistically significant for either stiffness values (8kPa and 14kPa). Only the SAMSUNG-p-SWE and SEQUOIA - DAX - p-SWE systems did not show a significant residual error when measuring a stiffness of 8kPa with a higher precision for SAMSUNG-p-SWE. Regarding the 14 kPa stiffness, only SEQUOIA - 2D-SWE did not show significant any residual error, otherwise all ultrasound systems showed a significant overestimation of stiffness values up to more than 71%.

Conclusion: Variations in stiffness measurements on a phantom do not seem to be significantly affected by the multiplication of measurements or observers but rather by the choice of the ultrasound system, this variation is more pronounced as the stiffness of the phantom increases.

Keywords : elastography, phantom, stiffness, residual error, reproducibility