



HAL
open science

Validation de la cardiométrie électrique pour la surveillance du débit cardiaque en réanimation pédiatrique par comparaison avec l'échocardiographie trans-thoracique : données préliminaires

Maud Bernier

► To cite this version:

Maud Bernier. Validation de la cardiométrie électrique pour la surveillance du débit cardiaque en réanimation pédiatrique par comparaison avec l'échocardiographie trans-thoracique : données préliminaires. Médecine humaine et pathologie. 2018. dumas-02953513

HAL Id: dumas-02953513

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02953513>

Submitted on 30 Sep 2020

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

UNIVERSITE DE MONTPELLIER
FACULTE DE MEDECINE MONTPELLIER-NIMES

THESE

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR EN MEDECINE

Présentée et soutenue publiquement

Maud BERNIER

Le 09/10/2018

TITRE :

Validation de la cardiométrie électrique pour la surveillance du débit cardiaque en réanimation pédiatrique par comparaison avec l'échocardiographie trans-thoracique : données préliminaires

Directeur de thèse : Mr le Docteur Julien BALEINE

JURY :

Président : Pr Gilles CAMBONIE, Professeur des Universités de Pédiatrie

Asseseurs :

Pr Xavier CAPDEVILA, Professeur des Universités, département d'anesthésie réanimation, CHU Lapeyronie, Montpellier

Pr Jean-Luc PASQUIE, Professeur des Universités, département de cardiologie, CHU Arnaud de Villeneuve, Montpellier

Dr Julien BALEINE, Praticien Hospitalier, département de réanimation pédiatrique et néonatale, CHU Arnaud de Villeneuve, Montpellier.

Membre invité :

Dr Sophie GUILLAUMONT, Praticien Hospitalier, département de cardiologie pédiatrique, CHU Arnaud de Villeneuve, Montpellier.

UNIVERSITE DE MONTPELLIER
FACULTE DE MEDECINE MONTPELLIER-NIMES

THESE

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR EN MEDECINE

Présentée et soutenue publiquement

Maud BERNIER

Le 09/10/2018

TITRE :

Validation de la cardiométrie électrique pour la surveillance du débit cardiaque en réanimation pédiatrique par comparaison avec l'échocardiographie trans-thoracique : données préliminaires

Directeur de thèse : Mr le Docteur Julien BALEINE

JURY :

Président : Pr Gilles CAMBONIE, Professeur des Universités de Pédiatrie

Assesseurs :

Pr Xavier CAPDEVILA, Professeur des Universités, département d'anesthésie réanimation, CHU Lapeyronie, Montpellier

Pr Jean-Luc PASQUIE, Professeur des Universités, département de cardiologie, CHU Arnaud de Villeneuve, Montpellier

Dr Julien BALEINE, Praticien Hospitalier, département de réanimation pédiatrique et néonatale, CHU Arnaud de Villeneuve, Montpellier.

Membre invité :

Dr Sophie GUILLAUMONT, Praticien Hospitalier, département de cardiologie pédiatrique, CHU Arnaud de Villeneuve, Montpellier.

ANNEE UNIVERSITAIRE 2017 - 2018

PERSONNEL ENSEIGNANT

Professeurs Honoraires

ALLIEU Yves
 ALRIC Robert
 ARNAUD Bernard
 ASTRUC Jacques
 AUSSILLOUX Charles
 AVEROUS Michel
 AYRAL Guy
 BAILLAT Xavier
 BALDET Pierre
 BALDY-MOULINIER Michel
 BALMES Jean-Louis
 BALMES Pierre
 BANSARD Nicole
 BAYLET René
 BILLIARD Michel
 BLARD Jean-Marie
 BLAYAC Jean Pierre
 BLOTMAN Francis
 BONNEL François
 BOUDET Charles
 BOURGEOIS Jean-Marie
 BRUEL Jean Michel
 BUREAU Jean-Paul
 BRUNEL Michel
 CALLIS Albert
 CANAUD Bernard
 CASTELNAU Didier
 CHAPTAL Paul-André
 CIURANA Albert-Jean
 CLOT Jacques
 D'ATHIS Françoise
 DEMAILLE Jacques
 DESCOMPS Bernard

DIMEGLIO Alain
 DU CAILAR Jacques
 DUBOIS Jean Bernard
 DUMAS Robert
 DUMAZER Romain
 ECHENNE Bernard
 FABRE Serge
 FREREBEAU Philippe
 GALIFER René Benoît
 GODLEWSKI Guilhem
 GRASSET Daniel
 GROLLEAU-RAOUX Robert
 GUILHOU Jean-Jacques
 HERTAULT Jean
 HUMEAU Claude
 JAFFIOL Claude
 JANBON Charles
 JANBON François
 JARRY Daniel
 JOYEUX Henri
 LAFFARGUE François
 LALLEMANT Jean Gabriel
 LAMARQUE Jean-Louis
 LAPEYRIE Henri
 LESBROS Daniel
 LOPEZ François Michel
 LORIOT Jean
 LOUBATIERES Marie
 Madeleine
 MAGNAN DE BORNIER
 Bernard
 MARY Henri
 MATHIEU-DAUDE Pierre

MEYNADIER Jean
 MICHEL François-Bernard
 MICHEL Henri
 MION Charles
 MION Henri
 MIRO Luis
 NAVARRO Maurice
 NAVRATIL Henri
 OTHONIEL Jacques
 PAGES Michel
 PEGURET Claude
 POUGET Régis
 PUECH Paul
 PUJOL Henri
 PUJOL Rémy
 RABISCHONG Pierre
 RAMUZ Michel
 RIEU Daniel
 RIOUX Jean-Antoine
 ROCHEFORT Henri
 ROUANET DE VIGNE LAVIT
 Jean Pierre
 SAINT AUBERT Bernard
 SANCHO-GARNIER Hélène
 SANY Jacques
 SENAC Jean-Paul
 SERRE Arlette
 SIMON Lucien
 SOLASSOL Claude
 THEVENET André
 VIDAL Jacques
 VISIER Jean Pierre

Professeurs Emérites

ARTUS Jean-Claude
 BLANC François
 BOULENGER Jean-Philippe
 BOURREL Gérard
 BRINGER Jacques
 CLAUSTRES Mireille
 DAURES Jean-Pierre
 DAUZAT Michel
 DEDET Jean-Pierre
 ELEDJAM Jean-Jacques
 GUERRIER Bernard
 JOURDAN Jacques
 MAURY Michèle
 MILLAT Bertrand

MARES Pierre
 MONNIER Louis
 PRAT Dominique
 PRATLONG Francine
 PREFAUT Christian
 PUJOL Rémy
 ROSSI Michel
 SULTAN Charles
 TOUCHON Jacques
 VOISIN Michel
 ZANCA Michel

Professeurs des Universités - Praticiens Hospitaliers

PU-PH de classe exceptionnelle

ALBAT Bernard - Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
ALRIC Pierre - Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire (option chirurgie vasculaire)
BACCINO Eric - Médecine légale et droit de la santé
BASTIEN Patrick - Parasitologie et mycologie
BONAFE Alain - Radiologie et imagerie médicale
CAPDEVILA Xavier - Anesthésiologie-réanimation
COMBE Bernard - Rhumatologie
COSTA Pierre - Urologie
COTTALORDA Jérôme - Chirurgie infantile
COUBES Philippe - Neurochirurgie
CRAMPETTE Louis - Oto-rhino-laryngologie
CRISTOL Jean Paul - Biochimie et biologie moléculaire
DAVY Jean Marc - Cardiologie
DE LA COUSSAYE Jean Emmanuel - Anesthésiologie-réanimation
DELAPORTE Eric - Maladies infectieuses ; maladies tropicales
DE WAZIERES Benoît - Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
DOMERGUE Jacques - Chirurgie générale
DUFFAU Hugues - Neurochirurgie
DUJOLS Pierre - Biostatistiques, informatique médicale et technologies de la communication
ELIAOU Jean François - Immunologie
FABRE Jean Michel - Chirurgie générale
GUILLOT Bernard - Dermato-vénéréologie
HAMAMAH Samir-Biologie et Médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
HEDON Bernard-Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
HERISSON Christian-Médecine physique et de réadaptation
JABER Samir-Anesthésiologie-réanimation
JEANDEL Claude-Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
JONQUET Olivier-Réanimation ; médecine d'urgence
JORGENSEN Christian-Thérapeutique ; médecine d'urgence ; addictologie
KOTZKI Pierre Olivier-Biophysique et médecine nucléaire
LANDAIS Paul-Epidémiologie, Economie de la santé et Prévention
LARREY Dominique-Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
LEFRANT Jean-Yves-Anesthésiologie-réanimation
LE QUELLEC Alain-Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
MARTY-ANE Charles - Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
MAUDELONDE Thierry - Biologie cellulaire
MERCIER Jacques - Physiologie
MESSNER Patrick - Cardiologie
MOURAD Georges-Néphrologie
PELISSIER Jacques-Médecine physique et de réadaptation
RENARD Eric-Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques ; gynécologie médicale
REYNES Jacques-Maladies infectieuses, maladies tropicales
RIBSTEIN Jean-Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
RIPART Jacques-Anesthésiologie-réanimation
ROUANET Philippe-Cancérologie ; radiothérapie
SCHVED Jean François-Hématologie; Transfusion
TAOUREL Patrice-Radiologie et imagerie médicale
UZIEL Alain -Oto-rhino-laryngologie
VANDE PERRE Philippe-Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
YCHOU Marc-Cancérologie ; radiothérapie

PU-PH de 1^{re} classe

AGUILAR MARTINEZ Patricia-Hématologie ; transfusion
AVIGNON Antoine-Nutrition
AZRIA David -Cancérologie ; radiothérapie
BAGHDADLI Amaria-Pédopsychiatrie ; addictologie
BEREGI Jean-Paul-Radiologie et imagerie médicale
BLAIN Hubert-Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
BLANC Pierre-Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
BORIE Frédéric-Chirurgie digestive
BOULOT Pierre-Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
CAMBONIE Gilles -Pédiatrie
CAMU William-Neurologie
CANOVAS François-Anatomie
CARTRON Guillaume-Hématologie ; transfusion
CHAMMAS Michel-Chirurgie orthopédique et traumatologique
COLSON Pascal-Anesthésiologie-réanimation
CORBEAU Pierre-Immunologie
COSTES Valérie-Anatomie et cytologie pathologiques
COURTET Philippe-Psychiatrie d'adultes ; addictologie
CYTEVAL Catherine-Radiologie et imagerie médicale
DADURE Christophe-Anesthésiologie-réanimation
DAUVILLIERS Yves-Physiologie
DE TAYRAC Renaud-Gynécologie-obstétrique, gynécologie médicale
DEMARIA Roland-Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
DEMOLY Pascal-Pneumologie ; addictologie
DEREURE Olivier-Dermatologie - vénéréologie
DROUPY Stéphane -Urologie
DUCROS Anne-Neurologie -
FRAPIER Jean-Marc-Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
KLOUCHE Kada-Réanimation ; médecine d'urgence
KOENIG Michel-Génétique moléculaire
LABAUGE Pierre- Neurologie
LAFFONT Isabelle-Médecine physique et de réadaptation
LAVABRE-BERTRAND Thierry-Cytologie et histologie
LECLERCQ Florence-Cardiologie
LEHMANN Sylvain-Biochimie et biologie moléculaire
LUMBROSO Serge-Biochimie et Biologie moléculaire
MARIANO-GOULART Denis-Biophysique et médecine nucléaire
MATECKI Stéfan -Physiologie
MEUNIER Laurent-Dermato-vénéréologie
MONDAIN Michel-Oto-rhino-laryngologie
MORIN Denis-Pédiatrie
NAVARRO Francis-Chirurgie générale
PAGEAUX Georges-Philippe-Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
PETIT Pierre-Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
PERNEY Pascal-Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
PUJOL Jean Louis-Pneumologie ; addictologie
PUJOL Pascal-Biologie cellulaire
PURPER-OUAKIL Diane-Pédopsychiatrie ; addictologie
QUERE Isabelle-Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire (option médecine vasculaire)
SOTTO Albert-Maladies infectieuses ; maladies tropicales
TOUITOU Isabelle-Génétique
TRAN Tu-Anh-Pédiatrie
VERNHEC Hélène-Radiologie et imagerie médicale

PU-PH de 2^{ème} classe

ASSENAT Éric-Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
BERTHET Jean-Philippe-Chirurgie thoracique et cardiovasculaire

BOURDIN Arnaud-Pneumologie ; addictologie
CANAUD Ludovic-Chirurgie vasculaire ; Médecine Vasculaire
CAPDEVIELLE Delphine-Psychiatrie d'Adultes ; addictologie
CAPTIER Guillaume-Anatomie
CAYLA Guillaume-Cardiologie
CHANQUES Gérald-Anesthésiologie-réanimation
COLOMBO Pierre-Emmanuel-Cancérologie ; radiothérapie
COSTALAT Vincent-Radiologie et imagerie médicale
COULET Bertrand-Chirurgie orthopédique et traumatologique
CUVILLON Philippe-Anesthésiologie-réanimation
DAIEN Vincent-Ophtalmologie
DE VOS John-Cytologie et histologie
DORANDEU Anne-Médecine légale -
DUPEYRON Arnaud-Médecine physique et de réadaptation
FESLER Pierre-Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
GARREL Renaud -Oto-rhino-laryngologie
GAUJOUX Viala Cécile-Rhumatologie
GENEVIEVE David-Génétiq ue
GODREUIL Sylvain-Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
GUILLAUME Sébastien-Urgences et Post urgences psychiatriques -
GUILPAIN Philippe-Médecine Interne, gériatrie et biologie du vieillissement; addictologie
GUIU Boris-Radiologie et imagerie médicale
HAYOT Maurice-Physiologie
HOUEDE Nadine-Cancérologie ; radiothérapie
JACOT William-Cancérologie ; Radiothérapie
JUNG Boris-Réanimation ; médecine d'urgence
KALFA Nicolas-Chirurgie infantile
KOUYOUMDJIAN Pascal-Chirurgie orthopédique et traumatologique
LACHAUD Laurence-Parasitologie et mycologie
LALLEMANT Benjamin-Oto-rhino-laryngologie
LAVIGNE Jean-Philippe-Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
LE MOING Vincent-Maladies infectieuses ; maladies tropicales
LETOUZEY Vincent-Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
LOPEZ CASTROMAN Jorge-Psychiatrie d'Adultes ; addictologie
LUKAS Cédric-Rhumatologie
MAURY Philippe-Chirurgie orthopédique et traumatologique
MILLET Ingrid-Radiologie et imagerie médicale
MORANNE Olivier-Néphrologie
MOREL Jacques -Rhumatologie
NAGOT Nicolas-Biostatistiques, informatique médicale et technologies de la communication
NOCCA David-Chirurgie digestive
PANARO Fabrizio-Chirurgie générale
PARIS Françoise-Biologie et médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
PASQUIE Jean-Luc-Cardiologie
PEREZ MARTIN Antonia-Physiologie
POUDEROUX Philippe-Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
PRUDHOMME Michel-Anatomie
RIGAU Valérie-Anatomie et cytologie pathologiques
RIVIER François-Pédiatrie
ROGER Pascal-Anatomie et cytologie pathologiques
ROSSI Jean François-Hématologie ; transfusion
ROUBILLE François-Cardiologie
SEBBANE Mustapha-Anesthésiologie-réanimation
SEGNARBIEUX François-Neurochirurgie
SIRVENT Nicolas-Pédiatrie
SOLASSOL Jérôme-Biologie cellulaire
SULTAN Ariane-Nutrition
THOUVENOT Éric-Neurologie
THURET Rodolphe-Urologie

VENAIL Frédéric-Oto-rhino-laryngologie
VILLAIN Max-Ophtalmologie
VINCENT Denis -Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
VINCENT Thierry-Immunologie
WOJTUSCISZYN Anne-Endocrinologie-diabétologie-nutrition

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

1^{re} classe :

COLINGE Jacques - Cancérologie, Signalisation cellulaire et systèmes complexes

2^{ème} classe :

LAOUDJ CHENIVESSE Dalila - Biochimie et biologie moléculaire

VISIER Laurent - Sociologie, démographie

PROFESSEURS DES UNIVERSITES - Médecine générale

1^{re} classe :

LAMBERT Philippe

2^{ème} classe :

AMOUYAL Michel

PROFESSEURS ASSOCIES - Médecine Générale

DAVID Michel

RAMBAUD Jacques

PROFESSEUR ASSOCIE - Médecine

BESSIS Didier - (Dermato-vénéréologie)

PERRIGAULT Pierre-François - Anesthésiologie-réanimation ; médecine d'urgence

ROUBERTIE Agathe – Pédiatrie

Maîtres de Conférences des Universités - Praticiens Hospitaliers

MCU-PH Hors classe

CACHEUX-RATABOUL Valère-Génétique

CARRIERE Christian-Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière

CHARACHON Sylvie-Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière

FABBRO-PERAY Pascale-Epidémiologie, économie de la santé et prévention

HILLAIRE-BUYS Dominique-Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie

PELLESTOR Franck-Cytologie et histologie

PUJOL Joseph-Anatomie

RAMOS Jeanne-Anatomie et cytologie pathologiques

RICHARD Bruno-Thérapeutique ; addictologie

RISPAIL Philippe-Parasitologie et mycologie

SEGONDY Michel-Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière

STOEBNER Pierre -Dermato-vénéréologie

MCU-PH de 1^{re} classe

ALLARDET-SERVENT Annick-Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière

BADIOU Stéphanie-Biochimie et biologie moléculaire

BOUDOUSQ Vincent-Biophysique et médecine nucléaire

BOULLE Nathalie-Biologie cellulaire

BOURGIER Céline-Cancérologie ; Radiothérapie

BRET Caroline -Hématologie biologique

COSSEE Mireille-Génétique Moléculaire

GABELLE DELOUSTAL Audrey-Neurologie

GIANSILY-BLAIZOT Muriel-Hématologie ; transfusion

GIRARDET-BESSIS Anne-Biochimie et biologie moléculaire
LAVIGNE Géraldine-Hématologie ; transfusion
LE QUINTREC Moglie-Néphrologie
MATHIEU Olivier-Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
MENJOT de CHAMPFLEUR Nicolas-Neuroradiologie
MOUZAT Kévin-Biochimie et biologie moléculaire
PANABIERES Catherine-Biologie cellulaire
PHILIBERT Pascal-Biologie et médecine du développement et de la reproduction
RAVEL Christophe - Parasitologie et mycologie
SCHUSTER-BECK Iris-Physiologie
STERKERS Yvon-Parasitologie et mycologie
TUAILLON Edouard-Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
YACHOUH Jacques-Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie
MCU-PH de 2^{ème} classe
BERTRAND Martin-Anatomie
BRUN Michel-Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
DU THANH Aurélie-Dermato-vénéréologie
GALANAUD Jean Philippe-Médecine Vasculaire
GOUZI Farès-Physiologie
JEZIORSKI Éric-Pédiatrie
KUSTER Nils-Biochimie et biologie moléculaire
LESAGE François-Xavier-Médecine et Santé au Travail
MAKINSON Alain-Maladies infectieuses, Maladies tropicales
MURA Thibault-Biostatistiques, informatique médicale et technologies de la communication
OLIE Emilie-Psychiatrie d'adultes ; addictologie
THEVENIN-RENE Céline-Immunologie

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES - Médecine Générale

COSTA David
FOLCO-LOGNOS Béatrice

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES - Médecine Générale

CLARY Bernard
GARCIA Marc
MILLION Elodie
PAVAGEAU Sylvain
REBOUL Marie-Catherine
SEGURET Pierre

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

Maîtres de Conférences hors classe

BADIA Eric - Sciences biologiques fondamentales et cliniques

Maîtres de Conférences de classe normale

BECAMEL Carine - Neurosciences
BERNEX Florence - Physiologie
CHAUMONT-DUBEL Séverine - Sciences du médicament et des autres produits de santé
CHAZAL Nathalie - Biologie cellulaire
DELABY Constance - Biochimie et biologie moléculaire
GUGLIELMI Laurence - Sciences biologiques fondamentales et cliniques
HENRY Laurent - Sciences biologiques fondamentales et cliniques
LADRET Véronique - Mathématiques appliquées et applications des mathématiques
LAINE Sébastien - Sciences du Médicament et autres produits de santé
LE GALLIC Lionel - Sciences du médicament et autres produits de santé
LOZZA Catherine - Sciences physico-chimiques et technologies pharmaceutiques
MAIMOUN Laurent - Sciences physico-chimiques et ingénierie appliquée à la santé
MOREAUX Jérôme - Science biologiques, fondamentales et cliniques
MORITZ-GASSER Sylvie - Neurosciences

MOUTOT Gilles - Philosophie
PASSERIEUX Emilie - Physiologie
RAMIREZ Jean-Marie - Histologie
TAULAN Magali - Biologie Cellulaire

PRATICIENS HOSPITALIERS UNIVERSITAIRES

CLAIRE DAIEN-Rhumatologie
BASTIDE Sophie-Epidémiologie, économie de la santé et prévention
FAILLIE Jean-Luc-
Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
GATINOIS Vincent-Histologie, embryologie et cytogénétique
HERLIN Christian -Chirurgie plastique ; reconstructrice et esthétique ; brûlologie
HERRERO Astrid-Chirurgie générale
PANTEL Alix-Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
PERS Yves-Marie-Thérapeutique, médecine d'urgence ; addictologie
PINETON DE CHAMBRUN Guillaume-Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
TORRE Antoine-Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale

REMERCIEMENTS

A Monsieur le Professeur Gilles Cambonie, je vous remercie de me faire l'honneur de présider mon jury. Merci pour votre investissement, votre réactivité et vos conseils tout au long de ce projet. C'est un grand plaisir d'intégrer votre équipe pour les 2 prochaines années.

A Monsieur le Professeur Xavier Capdevila, je vous remercie de l'intérêt que vous portez à ce travail. Merci également pour le temps que vous consacrez à apporter aux étudiants de votre service une formation de qualité.

A Monsieur le Professeur Jean-Luc Pasquie, je vous remercie d'avoir accepté d'être membre de mon jury, et d'apporter votre expertise sur cette thèse.

A Monsieur le Docteur Julien Baleine, je te remercie de m'avoir encadrée et soutenue dans la réalisation de cette thèse. Merci surtout pour tes conseils précieux, et pour ta disponibilité dans ce véritable match de ping-pong informatique avec les 8 versions successives de « matériel et méthodes », « résultats » et « discussion » épluchées à la virgule près !

A Madame le Docteur Sophie Guillaumont, je te remercie de d'avoir accepté de faire partie de mon jury. Merci également pour tout ce que tu apportes à la médecine Montpellieraine, tu es pour moi une source d'inspiration.

A la grande famille du service de Pédiatrie Néonatale et Réanimations du CHU de Montpellier :

Les médecins : Renaud, les deux Odile, Maliha, Pénélope, Marie-Emmanuelle, Christophe, Cyril, avec une mention spéciale pour Sabine et Tata Flo (la team Réa-vengers), merci d'avoir pris le temps de me transmettre d'une manière très différente vos connaissances et votre passion.

Mes chefs de clinique, et en particulier Laurène, pour avoir tenté des centaines de fois de te devancer sans jamais y parvenir, pour les footings, et surtout pour ton rire communicatif jusqu'au petit matin de nuits de gardes interminables !

Mes futurs co-chefs : Vincent, Camille, Stéphanie, Bénédicte et Héléna, l'aventure ne fait que commencer !

Clémentine, merci pour ta patience et ton aide dans le déchiffrement de mes statistiques.

Et bien entendu les puéricultrices et puériculteurs, infirmier(e)s, cadres, auxiliaires, petites mains de la déonta et j'en passe, travailler avec vous tous est une régale perpétuelle !

Un immense merci à toutes ces personnes que j'ai eu la chance de croiser à un moment ou un autre, pendant :

- Mon enfance et adolescence dans les contrées normandes, au milieu des vaches (RIP Pelote)

Maman, ma petite maman. Tu es haute comme 3 pommes, et pourtant plus tenace et plus énergique que toute cette assemblée réunie. A défaut de m'avoir enseigné la couture et la broderie, tu t'es efforcée de m'inculquer le sens de la famille et les valeurs qui me permettraient de mener une vie heureuse. Tu as bien réussi ton coup et tu m'as transmis beaucoup plus que tu ne l'imagines.

Papa, quand j'étais petite, je passais mes plus belles soirées d'été sur tes genoux au volant de la moissonneuse batteuse : je te regardais fièrement et j'avais l'impression que le monde entier nous appartenait ! Depuis toutes ces années nous avons la même complicité, et crois-moi je n'ai pas cessé de t'admirer.

Tous les deux je vous aime et vous remercie du fond du cœur, vous êtes les meilleurs parents du monde.

Ma famille, pour votre soutien indéfectible et pour tous ces moments partagés ensemble (le plus souvent autour d'un festin arrosé), et en particulier (gros) parrain et Chou, Marité et Gégé, Jean-Marc et Nicole, Catherine et Jean-Yves, Juju la fleur et tous les cousins cousines, oncles et tantes.

Richard et François, mes petits frères de cœur.

La troupe scoutie : Marie, tu seras toujours la première à qui j'annoncerai mes moments importants (et ça en dit long !) ; Blandine, ma conseillère dans les choix drastiques de mon adolescence, merci de m'avoir évité pas mal d'embuches; Camille, un regard a toujours suffi entre nous, et l'éloignement géographique n'y change rien ! Anne (ma copine Anne), mon alter égo, merci d'être ma plus grande complice depuis tant d'années. Et bien sur Misgana, Anne-Cha, Elie, Jill, Marie L, Anne-Félicité, Pierre-Edouard, Chabig, Felix, Laurent, pour toutes ces aventures vécues au camp et ailleurs, toutes ces veillées à scruter les étoiles auprès du feu, toutes ces instals, ces trous de mats creusés à la louche par 35°C, ces jerricans, ces nuits en tente, ces raids avec un sac plus lourd que nous, ces nuits blanches à préparer les grands jeux et j'en passe !

Florence, le plus grand merci te revient probablement. Tu as fait de nous tous de jeunes adultes revendiquant de belles valeurs, et tu peux être réellement fière.

Léopold, co-fondateur de l'entreprise secrète des QFT.

Sixtine, rencontrée par hasard et jamais perdue depuis.

Rasha, pour les après-midi à vider en secret les bouteilles subtilisées pendant les repas de famille, les soirées et cafés parisiens, pour moi tu feras toujours un peu partie de la famille.

El Cister Team : Tristan, Sofía, Kasia, Katha, Mattias, Tibu, Sandi, Max y los otros : Steph, Lisa, Luca, Johann, Carlo : por este año de locura total, la vuelta por Europa, los miércoles de fiesta, y sobre todo por « los princesas que buscan, tipos que coleccionar » ! Os quiero, « ahorita y para siempre » !

Ma Cla, pour ces Ryanair entre la France et l'Italie depuis maintenant 7 ans, la douceur des vacances en Abruzzo, des retrouvailles à Dijon, à Caen, à Rome ou ailleurs (« te voy a abrazar como un koala »), pour tous ces moments aussi indescriptibles qu'inoubliables.

La team bretonne : Jess, Lena, Hélène, Doum-Doum, Aude pour les soirées aux chandelles, les crémaillères, l'Euro 2012 et bien plus.

Mes colocataires caennais Wills, Kinkin et Droupix, pour Beauregard, les carnivals, les reprises musicales, les nuits à dormir collés-serrés, et pour notre soutien mutuel dans les aléas du quotidien. Anne Sexy, tu as été ma muse, mon inspiration pendant ces belles années. N'oublie pas que pour moi tu n'es pas surnuméraire.

Ophélie, tu m'as transmis ta passion de la pédiatrie : 4 ans et une thèse plus tard, je continue à t'en remercier !

Axel, pour les années d'externat, les milliers d'euros qu'on aurait pu détourner aux petits myopathes, les 3248h passées à la BU en D4 (RIP Tatie) et la « To-Do List post ECN ».

- Mon premier semestre à Perpignan :

L'équipe médicale haute en couleur avec un merci tout particulier à Cathy et PW ; l'équipe soignante de nuit pour m'avoir soufflé la prise en charge de la laryngite (et tant d'autres) dans les grands moments de solitude.

Mes cointernes du 1er jour, David, Sexy VD et Clara, vous aurez toujours une place particulière à mes yeux.

Les « néo-internes » pour le feu d'artifice sur le toit du CTS, la champagne shower et les confettis sur le parquet, l'électroménager lâchement volé et stocké par les gitans de la coloc 1, les perfusions sur des manches à balai...

La coloc 2, les premiers VRAI de VRAI : Ma Phouille pour les bouteilles de Cicéron et les Mojitos-cash-piscine, Cé pour avoir élevé et protégé Nuggets, Marie et David les enfants terribles, Jugo mon référent musical, Gaou-OU-OU-OUUU, Rémy et les repos de gardes nîmois, ma bonne vieille Cuzc’.

- Mon 2^{ème} semestre à Nîmes :

L’équipe de Néonatalogie du CHU de Nîmes, et en particulier Caro et tes petits déj’ de lendemain de garde, grâce à toi j’ai compris que la Néonat c’est bien plus qu’une histoire de tuyaux.

- Mon 3^{ème} semestre (le 1^{er} dans la mégapole Montpelliéraine !) :

L’équipe de cardiopédiatrie, pour sa cohésion au sein et surtout à l’extérieur de l’hôpital: médecins, infirmiers et auxiliaires, Anne et Christelle, mes co-internes Face de Rat, Goger et Annab, et les externes en haut du panier Fabien et Fiona.

Arthur, pour cette tempête.

- Mon 4^{ème} semestre :

L’équipe d’anesthésie pédiatrique pour leur patience sans égale pendant mes 1ères intubations chaotiques, Mathou parce que « ce semestre, on va la prendre souple » .

- Mon 5^{ème} semestre, cet intermède au soleil, en tongs et chaussures de trail, loin (très loin) des problèmes :

Morgane, tu gardes la « Golden place » de ce jury pour moi, ces quelques mois à tes côtés m’ont donné un aperçu du médecin que j’aimerais être quand je serai grande !

Mes co-internes Dodo, Léna, Eulalie, parce qu’ « Ils sont trop beaux vos bébés Mme Wooo » !

Les Colocs de la MIAHOUSE 2.0, devenus mes frères créoles : Monsieur Lucas et Hugo pour m’avoir sortie de ma zone de confort (en frôlant souvent la tétraplégie) avec ces incomptables randos-sentiermarron-corde-champagne-machette, Céline pour la part de féminité de la coloc, Anne-Flo pour l’histoire grandiloquente des coulées de lave, Sarcive et Maïdo (les meilleurs partent toujours en premier).

- Mon 6^{ème} semestre :

L’équipe de Neuropédiatrie, avec un merci tout spécial à Mme Gannac, aux puéricultrices, auxiliaires, et mes co-internes PPP, Kéké, et Karen.

- Mon 7^{ème} semestre : mes cointernes du semestre de l’amour:

Vincent D pour les staffs de lendemain de garde, Aziz la force tranquille, Chloé mon éternelle alliée pour la destruction massive de l’anesthésie, Vincent de Clermont pour ton faux-air

coincé et surtout nos duos endiablés au micro du rockstore, Dam' pour tes manières téléphoniques pompeuses, Anaïs pour ton style hallucinant, PPP pour cette 1ère quinzaine de gardes en duo, Pauline B pour tes blagues bien placées, David (ton tour viendra), Mehdi finalement t'es pas un encu**, Carine et Marie (qui-est-qui déjà?).

- Mon dernier semestre dans le monde obscur de la réanimation adulte :

Les médecins du DAR A, en particulier la gent féminine Oriane, Camille et Pauline pour votre enseignement précieux, votre gentillesse et votre humour sarcastique, et mes 7 co-internes pleins de testostérone : Arthur, Mehdi, Hugues, Xavier, Hugo, Pablo et Alex.

- Il y a aussi ceux qui ne rentrent pas dans les cases :

Les potes Nimois : Annick et Yo, Marie et Ju, Arthur et Maeva, Hedi et Marie, Fanchon et PE, Marion et Sam, Alex et Vincent, Marine et Momo ; vous n'êtes peut-être « pas aussi bien que mes vrais amis », mais je vous aime quand même beaucoup-beaucoup !

Charlotte, mon anesthésiste préférée, et Timothée le prince des beaux-arts.

Pascal, Fabienne, Mika, Fanny, Arthur, Josée, Pierre et tous les autres, pour votre accueil hors normes dans la tribu Perin, votre cohésion familiale est rare et je suis fière et heureuse de me faire une petite place parmi vous.

- Et dans tout ça, il y a ceux de toujours, LA FAMILLE :

David (Dimitriu), mon chaton. 4 ans que nous sommes inséparables ! Merci pour toutes ces épopées que nous avons partagé et qui tripleraient la longueur de cette thèse si je devais les lister. Tu resteras toujours mon partenaire de Moit'-moit', et bien plus encore. OTÉ !

Ben(jaminiu), pour nos parties de coinchés endiablées, et surtout parce que toi et moi, on a « été élevé à la dure ».

Arianou (Alena), notre Béa montpelliéraine, une de mes plus belles rencontres de l'internat ! Toujours là quand il faut, et qui plus est avec la patate !

Dudu (Pasquale), mon amazone, mon petit doigt me dit que tu n'as pas fini de m'épater.

Clémence (Violence), tu es une sacrément belle personne et tu es bien la seule à ne pas t'en apercevoir !

Margot (Monica), parce que je ne comprendrai jamais comment on peut caser autant d'enthousiasme, de peps, et de ténacité dans un si petit corps.

Max (Massimu), pour tes testiboules et surtout parce que ton intégrité ne court pas les rues et qu'elle est ta plus grande qualité.

Charlot, pour tes conseils bobo zéro déchets et ta porcelaine à la plage !

Il y a deux ans, tu étais « sans-étiquette », aujourd'hui tu fais de mon quotidien la plus croustillante des aventures. Merci de partager avec moi bien plus que l'amour de notre jardin-potager et de nos fromages frais maison! NKM...

Table des matières

LISTE DES ABBRÉVIATIONS	17
INTRODUCTION.....	18
MATERIEL ET METHODES.....	20
1. Schéma de la recherche.....	20
2. Population de patients	20
3. Procédure de la recherche	20
• Procédure.....	20
• Paramètres recueillis	22
4. Objectifs de l'étude.....	23
5. Collection des données et analyses statistiques	23
RESULTATS.....	25
1. Caractéristiques de la population et condition technique de réalisation.....	25
2. Comparaison des mesures de débit cardiaque entre échographie et cardiométrie électrique.....	27
3. Comparaison des différentes formules de débit cardiaque.....	29
4. Corrélation entre les paramètres hémodynamiques recueillis par ETT et par CE permettant d'évaluer la précharge dépendance et la performance contractile du ventricule gauche.....	30
5. Reproductibilité inter-opérateur des mesures du débit cardiaque et de la variation du pic de vélocité aortique réalisées par ETT	31
DISCUSSION	33
1. Evaluation de faisabilité.....	33
2. Résultats principaux	33
3. Données de la littérature	34
4. Analyses secondaires.....	37
• Modification du débit cardiaque lors des périodes de soins.....	37
• Comparaison des différentes formules de débit cardiaque	38
• Corrélation entre les paramètres hémodynamiques recueillis par ETT et par CE permettant d'évaluer la précharge dépendance et la performance contractile du ventricule gauche	39
• Reproductibilité des mesures échographiques du débit cardiaque et de variabilité du pic de vélocité aortique.....	40
5. Limites de l'étude	40
• Population	40
• Précision de la méthode de référence	40
• Problèmes techniques liés à la cardiométrie électrique	41
• Choix du nombre de cycles cardiaques pour le moyennage des mesures ETT et CE	41
• Mesures effectuées par un seul opérateur à l'échographie.....	42
CONCLUSION.....	43
PERSPECTIVES.....	43
BIBLIOGRAPHIE	44
ANNEXES.....	49
<i>SERMENT.....</i>	<i>55</i>
PERMIS D'IMPRIMER.....	56
RESUMÉ.....	57

Validation de la cardiométrie électrique pour la surveillance du débit cardiaque en réanimation pédiatrique par comparaison avec l'échocardiographie trans-thoracique : données préliminaires

LISTE DES ABBRÉVIATIONS

ΔV_{picAo} : Variation du pic de vitesse aortique

AC : âge corrigé

CE : Cardiométrie électrique

ICC : Coefficient de corrélation intra-classe

DC : Débit cardiaque

DCCVG : Diamètre de la chambre de chasse du ventricule gauche

ETT : Echographie trans-thoracique

F : Féminin

FC : Fréquence cardiaque

FEVG : Fraction d'éjection du ventricule gauche

FiO₂ : Fraction inspirée en oxygène

FR : Fréquence respiratoire

GCS : Glasgow coma scale

IC : Intervalle de confiance

ITV : Intégrale temps-vitesse

M : Masculin

NICOM : Non-invasive cardiac output monitor

PAM : Pression artérielle moyenne

PEM : Pourcentage d'erreur moyen

PIM : Pediatric index of mortality

S : Surface de la chambre de chasse du ventricule gauche

SA : Semaine d'aménorrhée

SpO₂ : Saturation pulsée en oxygène

SVV : Stroke volume variation

TRC : Temps de recoloration cutané

USCOM : Ultrasonic cardiac output monitor

VES : Volume d'éjection systolique

V_{moy} : Vitesse moyenne

VNI : Ventilation non-invasive

VS-AA : Ventilation spontanée en air-ambiant

INTRODUCTION

Les situations de défaillance circulatoire aigüe, le plus souvent secondaires à un sepsis, une hémorragie, une déshydratation ou des interactions cardio-pulmonaires pathologiques sont un phénomène courant en réanimation pédiatrique. Leur prise en charge nécessite un monitoring précis et fiable du statut hémodynamique du patient. Plusieurs paramètres cliniques et paracliniques sont à disposition des cliniciens pour assurer cette surveillance : fréquence cardiaque, pression artérielle, temps de recoloration cutané, mesure du débit cardiaque, de la contractilité ventriculaire, clairance des lactates. Parmi ces paramètres, la mesure du débit cardiaque (DC) est un outil précieux pour optimiser la fonction cardio-circulatoire. Son estimation régulière permet de guider au mieux les traitements entrepris : éviter l'hypoperfusion tissulaire par défaut de remplissage, ou à l'inverse, l'excès de remplissage et les complications congestives qui en résultent.

Les méthodes de monitoring invasif (thermodilution avec ou sans analyse de l'onde de pouls) permettent une mesure très précise du DC, mais sont de mise en place difficile et ne sont pas dénuées de risque. L'échocardiographie-Doppler transthoracique (ETT) de par son innocuité et sa facilité de réalisation est devenue la méthode de référence non-invasive¹, notamment chez l'enfant. Elle permet par ailleurs d'évaluer d'autres éléments précieux comme la taille des cavités cardiaques, la contractilité segmentaire et globale. L'échographie comporte cependant ses propres limites liées à l'opérateur (mesure du diamètre de la chambre de chasse du ventricule gauche et difficulté d'obtenir un alignement parfait entre flux ultra-sonore et flux sanguin) et à la technique qui ne permet qu'une mesure ponctuelle du DC.

La cardiométrie électrique (CE) permet de mesurer en continu le DC et le volume d'éjection systolique (VES), ainsi que d'estimer certains paramètres hémodynamiques (variation du volume d'éjection systolique, indice de contractilité) par le biais de 4 électrodes placées sur le cou et le thorax. La technique repose sur l'émission d'un courant électrique de basse amplitude (<2 mA) et de haute fréquence (50 kHz) à travers le thorax et sur la mesure de la résistance s'opposant à la diffusion de ce courant². Par des techniques de filtrage avancées, le dispositif est capable d'isoler le changement de conductivité créé par le système circulatoire, et plus spécifiquement celui du sang dans l'aorte lorsqu'il est soumis à un flux sanguin pulsatile. Ce phénomène est principalement dû au changement d'orientation des érythrocytes. En

diastole, les érythrocytes dans l'aorte prennent une orientation aléatoire, ce qui entraîne une résistance importante au courant électrique et une baisse de la conductivité. En systole, le flux pulsatile entraîne un alignement des globules rouges parallèlement à la circulation sanguine et au courant électrique, donc une augmentation de la conductivité.

En analysant le changement de conductivité avant et après l'ouverture de la valve aortique (en d'autres termes, la vitesse à laquelle les érythrocytes s'alignent), la CE permet grâce à un algorithme de déterminer le DC³ (Annexes 1 et 2)⁴.

En réanimation pédiatrique, peu d'études ont cherché à valider la cardiométrie électrique^{5,6}. Ces études incluaient une population de patients non représentative de notre pratique courante (nouveaux nés, patients en post-opératoire d'une chirurgie cardiaque, patients hémodynamiquement stables) et présentaient des limites méthodologiques.

Notre objectif était de valider la cardiométrie électrique pour la mesure du débit cardiaque chez des patients de réanimation pédiatrique présentant une instabilité ou une défaillance hémodynamique en comparaison à la méthode de référence, l'ETT.

MATERIEL ET METHODES

1. Schéma de la recherche

Nous avons mené une étude pilote observationnelle prospective mono-centrique au sein du département de pédiatrie néonatale et réanimations du CHU de Montpellier, entre le 07/03/2018 et le 01/06/2018. Cette étude a été autorisée par le CPP Ouest IV le 06/03/2018 (Annexe 3). Dans le cadre de cette autorisation, nous avons souhaité faire des analyses de concordances inter-examineurs préalables, ce qui n'entraînait aucune contrainte supplémentaire pour les patients. Le consentement parental a été recueilli pour chaque patient. Le schéma de l'étude est synthétisé dans l'annexe 4.

Ce travail préliminaire avait pour but d'identifier les points méthodologiques à améliorer afin de proposer un protocole définitif pour une étude prospective de plus grande échelle.

2. Population de patients

Nous avons inclus dans l'étude tous les nourrissons d'âge supérieur à 28 jours et enfants d'âge ≤ 10 ans, admis dans le service de réanimation pédiatrique du CHU de Montpellier présentant une instabilité hémodynamique ou une défaillance circulatoire définie par au moins deux des critères suivants: marbrures, extrémités froides; temps de recoloration cutané (TRC) > 3 secondes; pression artérielle moyenne (PAM) $< 10^{\text{ème}}$ percentile pour l'âge⁷ [Annexe 5], ou perfusion d'amines; fréquence cardiaque (FC) $> 90^{\text{ème}}$ percentile pour l'âge [Annexe 6]; troubles neurologiques: troubles de la conscience définis par un score de Glasgow (GCS) < 13 hors sédation ; FiO₂ $> 21\%$ pour SpO₂ $> 94\%$; oligo-anurie: diurèse < 0.5 mL/kg/h.

Les critères d'exclusions étaient, la prématurité définie par un terme de naissance < 37 semaines d'aménorrhée (SA) dont l'âge conceptionnel corrigé (AC) est < 1 mois, l'âge < 28 j chez le nouveau-né à terme (terme de naissance supérieur ou égal à 37 SA), l'âge supérieur à 10 ans, l'accès thoracique impossible (brûlures par exemple) ; les enfants présentant une cardiopathie congénitale, le refus de participer.

3. Procédure de la recherche

- Procédure

Les mesures par ETT ont été effectuées par un seul expert (opérateur 1 :MB) sur un échographe CX50 (Philips®, Eindhoven, Pays Bas), équipé du logiciel de quantification QLAB

version 3.1, avec des sondes de type S 5-1 (enfant de plus de 5 ans), S 8-3 (nourrisson et enfant de moins de 5 ans). Les images étaient sauvegardées sur l'appareil, anonymisées par le biais d'un numéro d'examen (attribué par l'échographe), transférées dans un second temps sur informatique au format .JPEG puis stockées dans un ordinateur sécurisé.

Les mesures par CE ont été réalisées à l'aide de l'appareil portable ICON® (Osypka Medical GmbH, Berlin, Allemagne). Le monitoring a été réalisé en plaçant 4 électrodes sur le patient conformément aux instructions du fabricant.

- Chez le nourrisson, les électrodes iSense Neo (Osypka medical, Berlin, Allemagne) étaient positionnées sur le sommet du crâne, la base gauche du cou, le côté gauche à la hauteur de l'appendice xiphoïde, et la partie latérale de la cuisse gauche (Annexe 7).
- Chez l'enfant de plus de 2 ans, les électrodes iSense (Osypka medical, Berlin, Allemagne) étaient positionnées 5cm au-dessus de la base gauche du cou, sur la base gauche du cou, au niveau de la ligne médio-axillaire, à la hauteur de l'appendice xiphoïde, et la dernière 10 à 15cm en dessous de la précédente (Annexe 8).

Les électrodes étaient reliées par des câbles au boîtier, où étaient entrés les paramètres anthropométriques permettant de calculer la surface corporelle selon la formule de Boyd pour les enfants pesant <15kg et mesurant <80cm ou de Dubois pour les autres.

Afin de synchroniser les recueils entre les deux techniques, un repère sur l'enregistrement ICON a été inséré à la fin de chaque mesure échographique (au moment du gel de l'image doppler sur la valve aortique). L'enregistrement ICON a ensuite été exporté sur informatique via le logiciel iControl version 3.5.2 et enregistré sous format .PDF.

Dans les 48 heures suivant l'inclusion, 4 paires de mesures simultanées (par ETT et CE) ont été effectuées pour chaque sujet : deux paires de mesures après la réalisation des soins infirmiers (période où le DC est potentiellement modifié par un inconfort), deux à distance des soins infirmiers, lorsque l'enfant était calme.

A l'issue des 48h, la reproductibilité de la mesure du DC était évaluée par les 3 investigateurs. En pratique, les 2 investigateurs non impliqués lors de la prise en charge du patient (GC, JB) effectuaient ce calcul à posteriori sur les images échographiques capturées par l'investigateur (MB) qui avait réalisé l'échographie, sur les mêmes cycles (annotés) et en aveugle de celui des 2 autres. Cette reproductibilité était effectuée sur au moins 1 des 4 paires de mesures effectuées par patient. Les valeurs de références du DC avec les 2 méthodes étaient celles mesurées par l'investigateur (MB) ayant pris en charge le patient.

- Paramètres recueillis

- Cliniques

Les caractéristiques cliniques à l'admission comme la taille, le poids, le sexe, l'âge, le score de gravité PIM 3 (Pediatric index of mortality), le motif d'hospitalisation, les principaux traitements entrepris ont été recueillis, ainsi que le devenir du patient à la sortie d'hospitalisation.

Lors de chaque paire de mesure ETT-CE, ont été colligés :

- les paramètres hémodynamiques : diurèse, FC, FR, PAM, température, TRC, SpO₂ ;
- les thérapeutiques mises en œuvre, notamment celles susceptibles de modifier le débit cardiaque : drogues vasoactives, neuro-sédation, réglages du respirateur.

- Cardiométrie électrique

Les mesures recueillies étaient le DC, l'index de contractilité et la variation du volume d'éjection (SVV). Au cours de cette étude, le DC et le SVV étaient moyennés sur 30 battements (choix minimal permettant une stabilité de la mesure interprétable dans la pratique clinique courante.).

- ETT

La coupe para sternale grand axe permettait de calculer la fraction d'éjection du ventricule gauche (FEVG) et de mesurer le diamètre de sortie du ventricule gauche. Le Doppler, effectué sur la valve aortique sur une coupe apicale 5 cavités ou une coupe sous costale, permettait de calculer :

- Le DC(ITV) (L/min), à partir de la formule $DC = ITV \times S \times FC$ où ITV désigne l'intégrale temps vitesse, mesurée par planimétrie sur 4 cycles cardiaques de qualité optimale, et S la surface de la chambre de chasse du ventricule gauche, FC la fréquence cardiaque.

- Le débit cardiaque à partir de la formule $DC(V_{moy}) = V_{moy} \times (\pi D_{CCVG}^2) / 4 \times 60 / 1000$ (ou V_{moy} représente la vitesse moyenne exprimée en cm/s et D_{CCVG} le diamètre de la chambre de chasse du ventricule gauche exprimé en cm) et de comparer cette mesure à celle obtenue à partir de la formule $DC(ITV) = ITV \times S \times FC$

- La variation du pic de vitesse aortique Doppler (ΔV_{picAo}), à partir de la formule $\Delta V_{picAo} (\%) = 100 \times (V_{picAo \max} - V_{picAo \min}) / [(V_{picAo \max} + V_{picAo \min}) / 2]$ où $V_{picAo \max}$ représente le pic maximal de vitesse aortique et $V_{picAo \min}$ représente le pic minimal de vitesse aortique.

La mesure était réalisée battement à battement sur un cycle respiratoire à une vitesse de défilement de 35 mm/s⁸.

4. Objectifs de l'étude

L'objectif principal était d'étudier la concordance, le biais et la précision de la mesure du DC par CE, par rapport à la méthode de référence, l'ETT.

Les objectifs secondaires de cette étude étaient d'étudier :

- La corrélation entre les paramètres hémodynamiques recueillis par ETT et par CE pouvant témoigner d'une précharge-dépendance (variabilité du pic de vitesse aortique (ΔV_{picAo}) en échographie et variation du volume d'éjection (SVV) en cardiométrie) ainsi que ceux évaluant la performance contractile du ventricule gauche (FEVG en échographie et index de contractilité en cardiométrie)
- La reproductibilité inter-opérateur des mesures du débit cardiaque et de la variation du pic de vitesse aortique réalisées par ETT
- Les modifications du débit cardiaque pendant et en dehors des périodes de soins
- Les différentes formules de calcul du débit cardiaque en ETT

5. Collection des données et analyses statistiques

Les caractéristiques cliniques initiales des enfants inclus sont décrites en valeur absolue et pourcentage pour les variables qualitatives et médiane ou quartile pour les variables continues compte tenu du faible effectif.

Chaque sujet ayant plusieurs paires de données appariées, la concordance entre les valeurs de DC mesurées par ETT et CE a été évaluée en utilisant le diagramme de Bland Altman, qui permet de prendre en compte de multiples observations par individu⁹. Le biais a été défini par la différence moyenne entre 2 mesures (DCécho-DC ICON) et la précision par $1.96 \times DS$ de cette différence¹⁰. Le biais représente l'exactitude ou le degré de proximité d'une méthode (CE) par rapport à une autre méthode (ETT). Les valeurs de biais les plus faibles représentent une meilleure fiabilité. La précision estime la dispersion du biais absolu et représente le caractère reproductible de la méthode. Pour l'évaluer, nous avons calculé des limites d'accord à 95% (correspondant au biais absolu \pm précision). Des limites d'accord plus étroites représentent une meilleure reproductibilité, c'est-à-dire une plus grande précision d'une méthode (CE) par rapport à une autre méthode (ETT).

Le diagramme de Bland et Altman permet une représentation graphique de ces données. L'ordonnée représente la différence entre les valeurs de la méthode de référence (ETT) et la méthode testée (CE). L'abscisse représente la moyenne de ces deux valeurs. Ainsi, graphiquement, toutes les mesures d'un échantillon sont reproduites sur ce graphique, auquel on ajoute une droite centrale représentant le biais absolu et deux droites représentant les limites d'accord à 95%. Le pourcentage d'erreur a été calculé par une formule classique $[100\% \times \text{précision} / \text{DCmoyen}]$ ^{11,12}. Un biais <10% et un pourcentage d'erreur < 30% ont été considérés comme cliniquement acceptables.

La méthode de référence utilisée pour la comparaison (ETT) ayant ses propres limites dans l'estimation du débit cardiaque, la précision de la nouvelle méthode (CE) peut être sous-estimée ¹². Cependant, la vraie précision peut se calculer par l'équation suivante: $\text{précision}_{\text{CE}} = \sqrt{(\text{PEM}^2 - \text{précision}_{\text{echo}}^2)}$, où $\text{précision}_{\text{CE}}$ est la vraie précision de la cardiométrie électrique, PEM est le pourcentage d'erreur moyen et $\text{précision}_{\text{echo}}$ est la précision de l'échocardiographie comparée aux méthodes de référence¹². Les données de la littérature indiquent que la $\text{précision}_{\text{echo}}$ est d'environ 30%¹³.

Les corrélations entre les paramètres hémodynamiques recueillis par ETT et par CE témoignant d'une précharge-dépendance (variation du pic de vélocité aortique ΔV_{picAo} en ETT et variation du volume d'éjection SVV par CE) ou évaluant la performance contractile du ventricule gauche (fraction d'éjection du ventricule gauche (FEVG) en ETT et index de contractilité par CE) ont été étudiés par les coefficients de corrélation appropriés (Pearson ou Spearman, selon la distribution des valeurs).

La reproductibilité des mesures échographiques entre les différents opérateurs a été évaluée par la méthode de Bland-Altman et par le calcul du coefficient de corrélation intra-classe avec son intervalle de confiance à 95%.

L'analyse statistique a été effectuée à l'aide du logiciel SAS ou R, après le gel de la base de données et l'approbation du plan d'analyses statistiques en collaboration avec l'unité de recherche clinique du DIM du CHRU de Montpellier. Tous les tests seront bilatéraux et effectués pour un risque de première espèce de 5%.

RESULTATS

1. Caractéristiques de la population et condition technique de réalisation

Les 10 patients ont été inclus dans l'étude (4 filles, 6 garçons) entre le 22/02/2018 et 01/06/2018. La figure 1 représente la flow-chart de l'étude. Les caractéristiques des patients sont reprises dans le tableau 1. L'âge médian à l'inclusion était 3,5ans [0,8-7], le poids médian 17,25 kg [5,36-28] et le motif d'hospitalisation principal était une défaillance cardiovasculaire (40%).

Sur chacun de ces 10 patients, 38 mesures au total ont été réalisées et ont pu être analysées. Deux paires de mesures n'ont pu être réalisées du fait d'une sortie de réanimation avant la fin de l'étude pour l'une, et d'un problème technique sur l'appareil ICON pour l'autre (altération de la qualité du signal CE (Dz)).

Nous n'avons constaté aucun effet indésirable des mesures (réveil de l'enfant, désaturation, tachycardie, bradycardie, douleur au retrait des électrodes, irritation cutanée). Une mauvaise échogénicité a été constatée sur 4 mesures (10.25%), un retrait des électrodes avant la réalisation d'une mesure (2.5%) et une mauvaise adhérence des électrodes sur 2 mesures (5.1%). Dans ces deux derniers cas, un simple repositionnement des électrodes a permis de corriger le problème.

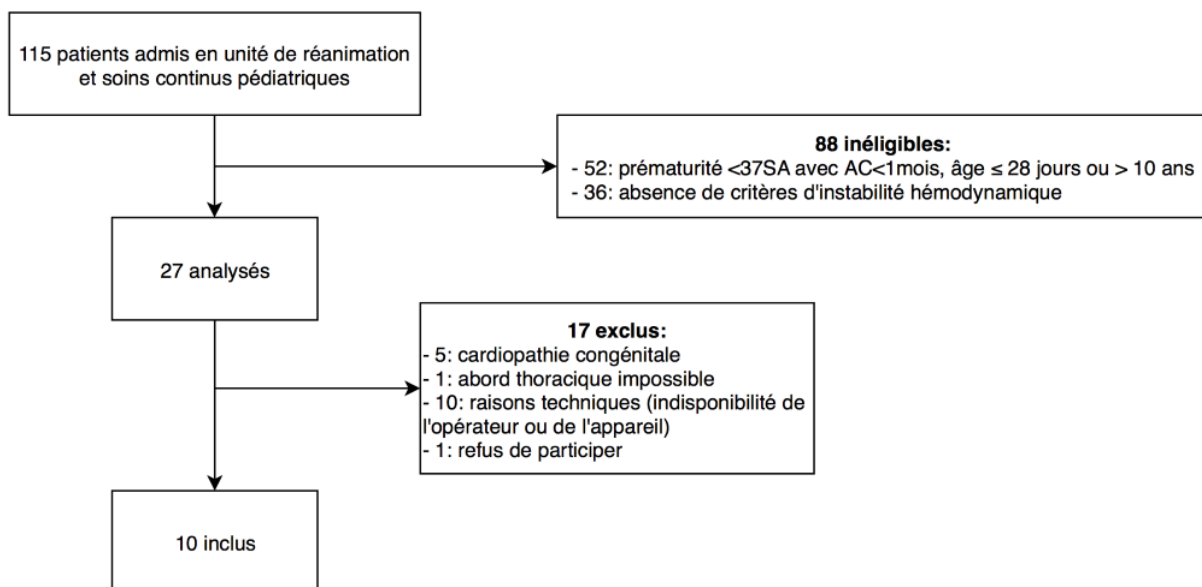


Figure 1 : Flowchart de l'inclusion des patients. SA= semaine d'aménorrhée, AC= âge corrigé

Caractéristiques	N = 10
Age (années)	3,5 [0,8-7]
Sexe (M/F)	6/4
Poids (kg)	17,25 [5,36-28]
Taille (cm)	115 [65-126]
Surface corporelle (m ²)	0,72 [0,3-1]
PIM 3	0,17 [0,08-0,22]
Glasgow Coma Scale (GCS)	15 [14-15]
Motif d'hospitalisation	
Médical	9 (90%)
<i>Neurologique</i>	1 (10%)
<i>Respiratoire</i>	3 (30%)
<i>Cardiovasculaire</i>	4 (40%)
<i>Sepsis</i>	1 (10%)
Chirurgical	1 (10%)
<i>Traumatique</i>	1 (10%)
Critères d'inclusion	
<i>Cutané : marbrures, extrémités froides</i>	1 (10%)
<i>TRC ≥ 3 sec</i>	3 (30%)
<i>Hypotension (PAM < 10^{ème} percentile pour l'âge)</i>	3 (30%)
<i>Tachycardie (FC > 90^{ème} percentile pour l'âge)</i>	9 (90%)
<i>FiO₂ > 21% pour SpO₂ > 94%</i>	6 (60%)
<i>Troubles neurologiques (GCS < 13 hors sédations)</i>	2 (20%)
<i>Oligo-anurie (diurèse < 0,5ml/kg/h)</i>	0 (0%)
Durée d'hospitalisation (jours)	5 [2-5]
Devenir	
<i>Décès</i>	0
<i>Mutation vers un autre service</i>	10 (100%)

Tableau 1: Caractéristiques des patients

M= Masculin, F= féminin ; PIM= pediatric index of mortality, FiO₂= fraction inspirée en oxygène, SpO₂= saturation pulsée en oxygène

Conditionnement lors des paires de mesures	N=38
Hémodynamique	
<i>Usage de drogues vaso-actives</i>	7 (18,42%)
<i>Score de VIS</i>	0 [0-0]
Sédation	16 (42,1%)
Ventilation	
<i>Ventilation invasive</i>	16 (42,1%)
<i>VNI</i>	14 (36,8%)
<i>VS-AA</i>	8 (21,1%)

Tableau 2 : Conditionnement lors des paires de mesures.

VIS = Vasoactive Inotropic Score ; VNI= Ventilation Non Invasive ; VS-AA= Ventilation spontanée en air ambiant

2. Comparaison des mesures de débit cardiaque entre échographie et cardiométrie électrique

Le DC(ITV) moyen était 3,035 l/min par ETT et de 3,02 l/min par ICON.

Le coefficient de corrélation de Pearson était significativement positif ($r=0,98$; $p<0,0001$) pour les mesures de DC (ETT) et DC (ICON). Le point de détermination était $R^2 = 0.96$.

La différence moyenne et l'écart type de la différence entre les deux groupes (échographie transthoracique et cardiométrie électrique) étaient de -0,0147 L/min et 0,335L/min, respectivement. Le biais et la précision de la cardiométrie électrique pour la mesure du débit cardiaque étaient donc de 0,0147 L/min (soit 0,46%) et 0,6578L/min respectivement. En utilisant l'équation $100 \times \text{precision} / \text{DC}_{\text{moyen}}$, le pourcentage d'erreur moyen pour la mesure du débit cardiaque était de 21,73%. La précision de l'échographie étant estimée à 30%, nous avons calculé la précision réelle de la cardiométrie électrique en utilisant l'équation: $\text{précision réelle} = \sqrt{(\text{PEM}^2 - \text{précision echo}^2)}$ où PEM représente le pourcentage d'erreur moyen = 21.71%.

L'analyse de Bland-Altman pour la comparaison du débit cardiaque (ITV) écho et débit cardiaque ICON est présentée figure 2. Chaque point de données représente des mesures appariées chez un même patient, mesurées à des occasions différentes (38 mesures appariées).

Une paire de données a été exclue de l'analyse de Bland-Altman en raison d'une altération franche de la qualité du signal CE (Dz), pouvant entraîner un biais. Les valeurs extrêmes, correspondant aux valeurs en dehors des limites d'accord à 95% ont été intégrées dans les calculs et analysées à posteriori pour rechercher des éléments d'explication. Le biais et les limites d'accord à 95% sont affichés en tant que lignes de référence.

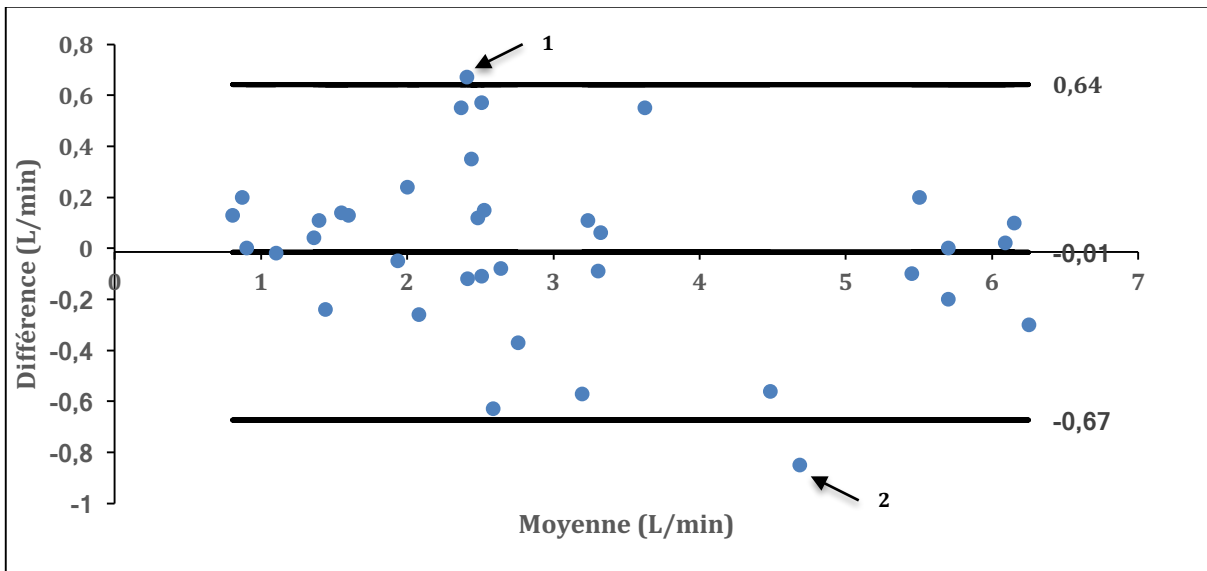


Figure 2: Analyse de Bland Altman pour la comparaison du débit cardiaque (ITV) écho et débit cardiaque ICON (critère de jugement principal).

DC = débit cardiaque

La tendance des mesures du débit cardiaque entre les périodes de soins et hors soins est montrée dans la figure 3. Il n'y avait pas de différence significative entre les périodes soins et hors soins ($p=0,843$ en ETT et $p= 0,852$ en CE).

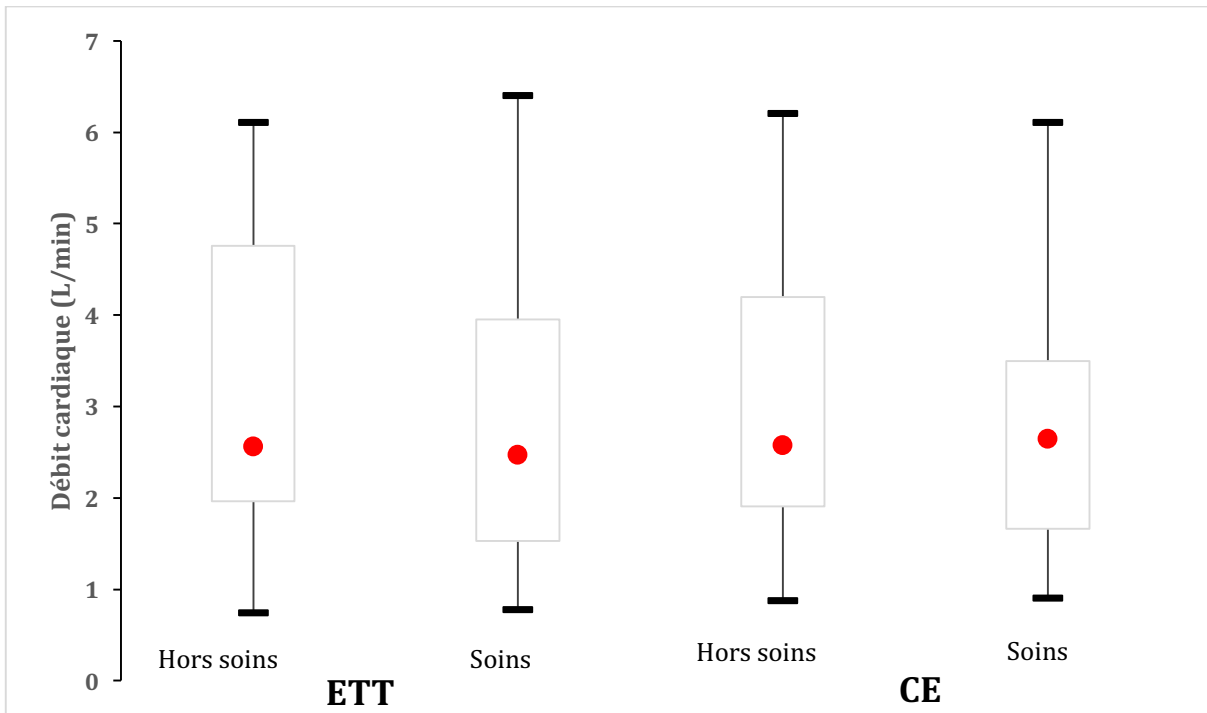


Figure 3 : Tendence des mesures du débit cardiaque entre les périodes de soins et hors soins. A gauche : ETT (Echographie trans-thoracique); A droite : CE (cardiométrie électrique). Le point représente la médiane, la boîte représente les Q25-75 et les valeurs extrêmes.

3. Comparaison des différentes formules de débit cardiaque

Le biais, la précision et le pourcentage d'erreur moyen de la mesure du DC (V_{moy}) en comparaison au DC (ITV) étaient de 0,17L/min (5.44%), 1,31L/min et 41,9%, respectivement. Concernant la comparaison DC ICON et DC (V_{moy}), ces valeurs étaient de -0,19L/min (5.7%), 1,50L/min et 49,12%, respectivement. Les analyses de Bland-Altman pour la comparaison du débit cardiaque (ITV) écho et débit cardiaque (V_{moy}) et la comparaison débit cardiaque (V_{moy}) et débit cardiaque ICON sont présentées figure 4 et 5.

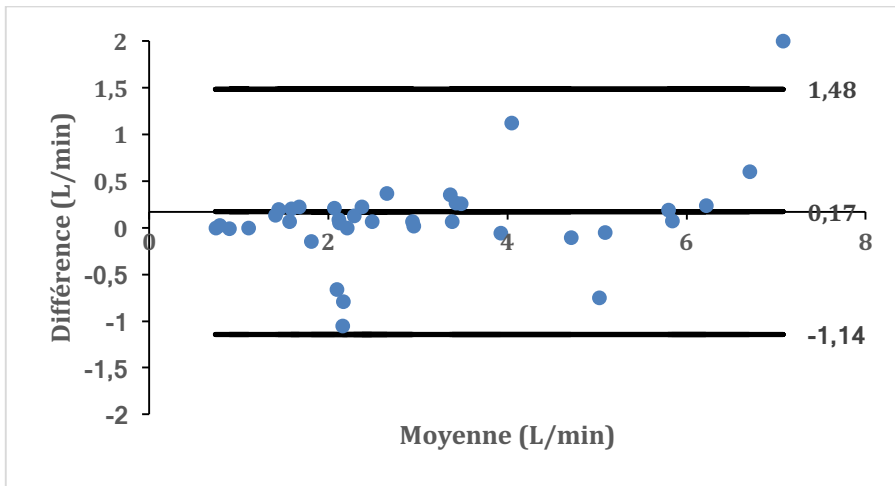


Figure 4 : Analyse de Bland Altman pour la comparaison du débit cardiaque (Vmoy)écho et débit cardiaque (ITV)écho.

DC = débit cardiaque ; Vmoy= vitesse moyenne, ITV= intégrale temps-vitesse.

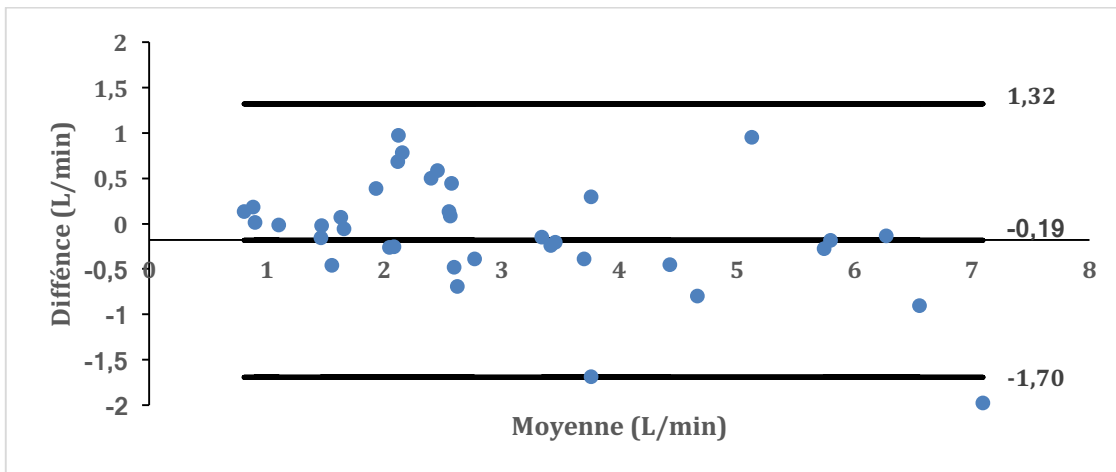


Figure 5 : Analyse de Bland Altman pour la comparaison du débit cardiaque (Vmoy)écho et débit cardiaque ICON.

DC = débit cardiaque ; Vmoy= vitesse moyenne.

4. Corrélation entre les paramètres hémodynamiques recueillis par ETT et par CE permettant d'évaluer la précharge dépendance et la performance contractile du ventricule gauche

Le coefficient de corrélation de Pearson n'était pas significativement positif ($r=0,14$; $p=0,38$) pour les mesures de FEVG (ETT) et index de contractilité (CE) (Annexe 9), ni pour les mesures $\Delta VPicAo$ (ETT) et SVV (ICON) ($r=0,193$; $p=0,244$) (Annexe 10).

5. Reproductibilité inter-opérateur des mesures du débit cardiaque et de la variation du pic de vélocité aortique réalisées par ETT

La comparaison des différentes mesures échographiques entre les 3 opérateurs par la méthode de Bland-Altman est reprise dans le tableau 3. Les coefficients de corrélation intra-classe et leur intervalle de confiance à 95% sont exposés dans le tableau 4.

		Biais	Précision	Pourcentage d'erreur moyen
Comparaison opérateur 1 et 2	ΔV_{picAo}	-2,83 (23,7%)	11,93	99
	DC (ITV)	0,04 (1,5%)	0,44	16,17
Comparaison opérateur 1 et 3	ΔV_{picAo}	-1,12 (10,1%)	11,79	100
	DC (ITV)	0,08 (3,2%)	0,76	31,2
Comparaison opérateur 2 et 3	ΔV_{picAo}	1,70 (13,6%)	6,93	65
	DC (ITV)	0,011 (0,4%)	0,74	27,5

Tableau 3 : comparaison des mesures échographiques entre les 3 opérateurs par la méthode de Bland -Altman.

Le biais et la précision sont exprimés dans l'unité de mesure de la variable étudiée. DC= Débit cardiaque, ITV= intégrale temps-vitesse, ΔV_{picAo} = variabilité du pic de vélocité aortique

		ICC	IC95%
Comparaison opérateur 1 et 2	ΔV_{picAo}	0,17	[-0,462-0,688]
	DC (ITV)	0,968	[0,884-0,992]
Comparaison opérateur 1 et 3	ΔV_{picAo}	0,095	[-0,52-0,64]
	DC (ITV)	0,978	[0,918-0,994]
Comparaison opérateur 2 et 3	ΔV_{picAo}	0,32	[-0,18-0,76]
	DC (ITV)	0,95	[0,822-0,987]

Tableau 4 : comparaison des mesures échographiques entre les 3 opérateurs par le calcul des coefficients de corrélation intra-classe.

ICC: Coefficient de corrélation intra-classe ; IC95% : intervalle de confiance à 95%, DC= Débit cardiaque, ITV= intégrale temps-vitesse, ΔV_{picAo} = variabilité du pic de vélocité aortique

Nous avons analysé le biais, la précision et le pourcentage d'erreur de la cardiométrie électrique, en comparaison avec les mesures échographiques des opérateurs 2 et 3. Pour l'opérateur 2, ces valeurs étaient de 0,39L/min (soit 13,4%), 0,73L/min et 25,17% respectivement. Concernant l'opérateur 3, ces valeurs étaient de 0,40L/min (soit 13,8%), 0,99L/min et 34%, respectivement.

DISCUSSION

1. Evaluation de faisabilité

Cette étude pilote nous a permis d'évaluer sa faisabilité à plus grande échelle et d'identifier les points méthodologiques à améliorer en vue de l'étude CARDIOREAPED.

Selon les données d'activité 2012-2016 transmises par le Département de l'Information Médicale du CHU de Montpellier, environ 400 enfants sont admis chaque année dans l'unité de réanimation et soins continus pédiatriques du CHU de Montpellier. Parmi eux, nous avons estimé à 50 au moins le nombre de patients présentant une instabilité et/ou une défaillance hémodynamique.

Au cours de notre période d'inclusion de 3 mois, nous avons obtenu des chiffres supérieurs aux données d'activité ; 115 enfants ont été hospitalisés dans l'unité de réanimation et soins continus pédiatriques, et 28 remplissaient nos critères d'inclusion.

Nous avons inclus 10 patients sur une période de 3 mois. Les facteurs principaux limitant les inclusions des patients éligibles étaient l'absence d'un opérateur disponible pour réaliser les mesures durant la phase d'instabilité hémodynamique et l'absence d'un appareil ICON disponible (déjà en utilisation sur un autre patient). Aux vues de ces éléments, l'objectif d'inclusion fixé dans l'étude CARDIOREAPED à 50 patients sur une période de 18 mois devrait pouvoir être respecté.

2. Résultats principaux

Dans cette étude pilote, la concordance entre mesure du débit cardiaque par CE et par ETT était satisfaisante, avec un biais <10% et un pourcentage d'erreur <30%, ce qui assure des mesures comparables.

Nous n'avons pas retrouvé dans cette étude de corrélation des paramètres évaluant la contractilité (FEVG (ETT) et index de contractilité (CE)) et la précharge dépendance (variation pic de vélocité aortique (ETT) et SVV (CE)). Les soins infirmiers ne semblaient pas impacter les mesures de débit cardiaque. La reproductibilité inter-observateur pour les mesures de débit cardiaque en ETT était satisfaisante, mais elle ne l'était pas pour les mesures de variation du pic de vélocité aortique ($\Delta V_{pic\ Ao}$).

3. Données de la littérature

Le remplissage vasculaire est un pilier de la réanimation hémodynamique de l'adulte et de l'enfant. La « Survival Sepsis campaign »¹⁴ guide international pour la prise en charge du sepsis et du choc septique recommande que, lors de la phase initiale de la prise en charge d'un sepsis, au moins 30 mL/kg de cristalloïdes soient administrés pendant les 3 premières heures (recommandation forte, niveau de preuve faible). Les auteurs précisent que suite à la réanimation liquidienne initiale, l'administration d'autres fluides doit être réfléchi afin d'éviter, d'une part l'hypo-perfusion tissulaire par défaut de remplissage^{15,16} ou à l'inverse, les complications congestives résultant d'un excès de remplissage, qui augmentent la mortalité¹⁷. Il est donc conseillé de guider cette stratégie de remplissage par une réévaluation fréquente de l'état hémodynamique avec évaluation de la fonction cardiaque.

Plusieurs méthodes de monitoring invasif du débit cardiaque ont été décrites chez l'adulte et l'enfant en réanimation. La thermodilution artérielle pulmonaire (Swan-Ganz®) est réalisée par un cathéter de gros calibre (5Fr en pédiatrie) inséré dans une veine centrale, qui progresse ensuite à travers le cœur droit jusqu'à l'orifice de l'artère pulmonaire. Ce type de cathéter et le matériel nécessaire pour son utilisation représentent par ailleurs un coût non négligeable. La méthode PICCO™ est basée sur deux principes physiques : la thermodilution transpulmonaire et la mesure de l'onde de pouls. Les mesures sont effectuées par le biais d'un cathéter artériel positionné dans l'aorte descendante (par voie fémorale) et d'un cathéter veineux central dans le territoire cave supérieur. D'autres techniques de monitoring invasif analysant l'onde de pouls avec (LIDCO) ou sans intégration de la thermodilution (PRAM method, FloTrac™) sont également utilisées chez l'adulte mais peu décrites en pédiatrie.

L'usage du cathétérisme a diminué de manière importante sur les 25 dernières années¹⁸. Cette diminution a été encouragée par plusieurs méta-analyses qui n'ont pas mis en évidence de bénéfice clinique de cette surveillance invasive¹⁹⁻²¹. De plus, ces techniques invasives, bien que permettant une mesure très précise du DC, présentent les risques associés à la pose et au maintien des cathéters centraux: échec de pose, complications traumatiques, infectieuses et thrombotiques. En 2003, la société américaine d'anesthésie a recensé les complications du cathétérisme par Swan Ganz chez l'adulte²², et estimé la prévalence des sepsis entre 0.7 et 3% (avec un taux d'endocardites entre 2 et 7%), celle des complications thrombotiques entre 0.5 et 3% et celle des complications traumatiques à 5%. Des arythmies sévères ont également été rapportées dans 0.3 à 3.8% des cas sans pour autant augmenter la mortalité^{23,24}. Chez l'enfant,

une revue de la littérature de 2013 a étudié la prévalence des complications liées aux abords veineux centraux. Les auteurs dénombrent 8% d'échecs de pose, des complications thromboemboliques dans 12 à 28% des cas, une malposition dans 10% des cas, des complications traumatiques dans 6% des cas (hématomes, pneumothorax)²⁵. La densité d'incidence des infections liées au cathéter est estimée à 5.9 pour 1000 jours cathéter (intervalle 2,6–31,1)²⁶. Enfin, la pose d'un cathéter veineux en territoire cave supérieur peut parfois s'avérer délicate chez des nourrissons ou enfants vigiles.

Chez l'adulte, la place des techniques invasives dans le monitoring hémodynamique disparaît progressivement au profit de techniques non invasives²⁷. En pédiatrie, les techniques invasives sont exceptionnellement utilisées, et ont été supplantées par l'échographie-Doppler transthoracique (ETT), qui est la méthode de référence non-invasive^{1,13,28-30}. En plus de permettre une mesure fiable du débit cardiaque, l'échographie présente l'avantage d'apporter des informations précieuses sur d'autres paramètres hémodynamiques comme la morphologie, la contractilité ou l'étude des shunts. Elle comporte cependant ses propres limites, notamment liées à la mesure du diamètre de la chambre de chasse du ventricule gauche, et à la difficulté d'obtenir un alignement parfait entre flux ultra-sonore et flux sanguin, comme le soulignent les écarts entre les analyses des différents opérateurs dans notre étude. De plus, l'ETT ne permet qu'une mesure ponctuelle du DC, imposant de répéter l'examen en cas de modification de la symptomatologie clinique et/ou des traitements entrepris.

La cardiométrie électrique présente les avantages d'une surveillance hémodynamique non invasive continue. En anesthésie, une étude de 2015 a cherché à déterminer l'intérêt d'un monitoring par cardiométrie électrique dans la prédiction des événements hémodynamiques et la réponse aux thérapeutiques initiées, avec de bons résultats³¹. La cardiométrie électrique permet donc d'adapter de manière plus précise et plus rapide les thérapeutiques à visée hémodynamique, en limitant l'inconfort de l'enfant lié à des mesures échographiques répétées et en s'affranchissant des limites de l'échographie. En néonatalogie, quelques études ont permis de comparer la mesure du DC par ETT et CE chez le nouveau-né à terme ou prématuré au cours des premiers jours de vie, avec un accord globalement satisfaisant. En 2012, Noori et al. retrouvaient un biais de 0,7% avec cependant un pourcentage d'erreur de 44%³². Plus récemment en 2016, Boet et al. retrouvaient une corrélation satisfaisante ($r=0.7$; $P<0.0001$) chez des nouveaux nés prématurés hémodynamiquement stables³³. En pédiatrie, une étude menée par Rauch et al. s'est intéressée à la validation de la CE chez les enfants et adolescents

obèses, avec de bons résultats ($p < 0.0001$, $r = 0.91$)³⁴. Paradoxalement, très peu d'études ont été menées en réanimation pédiatrique. Un travail réalisé par une équipe allemande en 2012 portant sur une cohorte de 72 patients permettait d'observer un agrément convenable entre les mesures du DC par ETT et CE⁵ avec un biais de l'ordre de 7,8 % et un pourcentage d'erreur de 26%. Cependant, des limites méthodologiques apparaissaient dans cette étude de Blohm et al., qui ne mentionne pas avec précision la synchronisation entre les deux méthodes de détermination du DC lors de la prise des mesures. Plus récemment en 2018, une étude thaïlandaise a comparé 3 méthodes d'évaluation hémodynamiques non invasives : la cardiométrie électrique, l'ETT et l'USCOM (ultrasonic cardiac output monitor) chez 121 patients stables hémodynamiquement (soit 726 mesures)⁶. Dans cette étude, la comparaison ETT-CE par la méthode de Bland-Altman pour les mesures de débit cardiaque a retrouvé un biais de 8,5% et un pourcentage d'erreur de 27,5%. Concernant les outils de prédictivité de réponse au remplissage, les auteurs ont comparé SVV ICON et USCOM, avec des résultats médiocres (biais de 113 % et un pourcentage d'erreur moyen de 257%). Ces deux études menées en réanimation pédiatrique retrouvent donc des résultats comparables à ceux de notre étude pour la comparabilité des mesures du débit cardiaque. Les résultats de Chaiyakulsil et al. concernant le SVV sont également en adéquation avec notre étude, et nous incitent à penser que cet outil doit être utilisé avec beaucoup de précaution à l'heure actuelle. Il est important de souligner que ces deux cohortes se sont intéressées à une population différente de la nôtre. La cohorte de Blohm et al. incluait environ un tiers de nouveau-nés, et la plupart des patients étaient étudiés dans le cadre de la prise en charge post-opératoire d'une chirurgie cardiaque. L'étude de Chaiyakulsil et al. s'intéresse quant à elle uniquement aux enfants stables hémodynamiquement. L'intérêt du monitoring hémodynamique au sein de cette population d'enfants stables est discutable car rarement effectué dans la pratique courante. En conséquence, la validation de la mesure du DC par CE méritait d'être évaluée chez des patients de réanimation pédiatrique (nouveau-nés et chirurgie cardiaque exclus) présentant une instabilité ou une défaillance hémodynamique.

D'autres méthodes de mesure non invasives du débit cardiaque ont vu le jour ces dernières années. L'USCOM utilise les ondes doppler pour mesurer la vélocité du flux sanguin à travers la valve aortique et pulmonaire. Cette technique a été validée en comparaison de la thermodilution artérielle pulmonaire chez l'enfant avec de bons résultats (biais 4,5%, pourcentage d'erreur 11%)³⁵. Cette technologie ne permet cependant pas de mesure continue du débit cardiaque. Le NICOM (Non-invasive cardiac output monitoring) utilise le principe de

bioréactance thoracique, avec des résultats controversés. Une étude réalisée en néonatalogie³⁶ a retrouvé une corrélation forte entre débit cardiaque NICOM et ETT ($r=0.95$, $p<0.001$). A l'inverse en 2015, dans une population d'enfants <5 ans³⁷, Lee et al. ne retrouvaient pas de corrélation entre DC NICOM et DC (ETO) ($r=0.107$, $p=0.43$). Le Doppler trans-oesophagien présente les avantages d'une technique de mesure continue, et présente un intérêt certain dans le monitoring hémodynamique en chirurgie cardiaque³⁸, mais la sonde oesophagienne étant génératrice d'inconfort, cette technique n'est utilisée que chez les patients intubés et sédatisés. En pratique, son utilisation comme monitoring continu est limitée par des pertes de signal fréquentes, provoquées par les mouvements de sondes (sédation souvent moins profonde qu'en anesthésie). Le débit cardiaque est calculé par le même principe qu'en échographie transthoracique. Cependant, les mesures étant réalisées dans l'aorte descendante, elles ne prennent pas en compte le flux des artères naissant de l'arche aortique (qui représente 30% du débit cardiaque), ce qui constitue la principale limite de cette technologie. Le moniteur NICO (ou moniteur de ré-inhalation partielle de CO₂)³⁹ utilise le principe de Fick de manière indirecte pour calculer le débit cardiaque, et ne peut donc être employé que chez les patients intubés en ventilation mécanique. Face à ces techniques, la cardiométrie électrique présente donc l'avantage de combiner un monitoring continu, simple d'utilisation, et réalisable chez les patients non intubés, qui représentent la majeure partie des patients de réanimation pédiatrique.

Dans notre étude, 2 points étaient hors des limites d'accord (Figure 2 : flèches 1, 2). Nous n'avons pas retrouvé d'éléments permettant d'expliquer ces valeurs (notamment pas de problèmes rencontrés lors de la réalisation de ces deux paires de mesures). Pour baser une prise en charge thérapeutique sur un outil de surveillance tel que la mesure du débit cardiaque par CE, la capacité de la méthode appliquée à déterminer une tendance (c'est à dire la capacité à détecter un changement de DC dans le temps) est primordiale, comme le soulignent Cecconi et Al¹¹. La concordance élevée de Pearson soutient mathématiquement cette hypothèse.

4. Analyses secondaires

- Modification du débit cardiaque lors des périodes de soins

Une des hypothèses de départ était que les soins réalisés sur l'enfant affectaient son confort, et indirectement son débit cardiaque. Nous n'avons pas retrouvé de modification

significative du débit cardiaque après les périodes de soins (figure 3). Cette constatation pourrait être en partie expliquée par le délai souvent long (>5 min) entre fin des soins et réalisation d'une paire de mesures, qui pourrait être suffisant pour un retour du débit cardiaque à "l'état de base". Ce délai est dû à la disponibilité de l'opérateur d'une part, et surtout à l'organisation quotidienne de l'équipe soignante d'autre part. Une autre explication pourrait être la qualité de la prise en charge de la douleur lors des procédures de soins. Une revue de la littérature en 2014 estime le nombre de procédures douloureuses auxquelles sont confrontés les enfants hospitalisés à une médiane de 10 (0-51) par jour⁴⁰.

Les nombreuses recommandations de bonne pratique concernant la prise en charge de la douleur aiguë et chronique, et des douleurs induites par les actes de soins chez l'enfant (SOR 2005, AFSSAPS 2009, HAS 2016) et les protocoles de services qui en découlent ont permis une amélioration de l'analgésie chez l'enfant, limitant l'inconfort lors des soins et procédures douloureuses.

- Comparaison des différentes formules de débit cardiaque

La comparaison entre DC (ICON) et DC (Vmoy) a mis en évidence un biais acceptable de l'ordre de 5.7% avec cependant un pourcentage d'erreur moyen élevé (49%). Il existait également un biais acceptable (5.4%) et un pourcentage d'erreur moyen élevé (41.9%) en comparant DC (Vmoy) et DC (ITV). Le pourcentage d'erreur moyen entre DC (ICON) et DC (ITV) étant <30%, ces données suggèrent une moins bonne fiabilité de la mesure du DC par la vitesse moyenne en échographie (via la formule $DC_{vmoy} = V_{moy} \times (\pi DCCVG^2) / 4 \times 60] / 1000$). Cela semble être expliqué dans la littérature néonatale par une sur-estimation de la vitesse moyenne (Vmoy) secondaire à une prise en compte de l'artefact diastolique lors de la mesure du spectre⁴¹. A notre connaissance, il n'existe pas de littérature avec cette formule chez le grand enfant et l'adulte ; les études hémodynamiques sont réalisées en utilisant la formule $DC = ITV \times S \times FC$. La vitesse moyenne présente une relation linéaire avec l'index cardiaque permettant de l'estimer tout en s'affranchissant des erreurs liées à la mesure de la surface de la chambre de chasse du ventricule gauche^{42,43}. En l'intégrant dans la formule du débit cardiaque, cet intérêt est amendé par l'utilisation de la surface de la chambre de chasse du ventricule gauche.

- Corrélation entre les paramètres hémodynamiques recueillis par ETT et par CE permettant d'évaluer la précharge dépendance et la performance contractile du ventricule gauche

Evaluer la pré-charge dépendance et prédire l'efficacité d'un remplissage vasculaire peut être difficile, en particulier chez l'enfant. De nombreuses variables hémodynamiques ont été proposées. Les indices dynamiques de précharge, qui reposent sur les variations respiratoires du volume d'éjection systolique (ΔV_{picAo} , ΔITV , Δ Veine cave inférieure, Δ de l'onde de pouls), ont une meilleure prédictivité de la réponse au remplissage que les paramètres statiques (pression veineuse centrale, pression artérielle pulmonaire d'occlusion, diamètre de la veine cave inférieure) chez les patients adultes en ventilation mécanique⁴⁴⁻⁴⁷.

Chez l'enfant, ces paramètres ont été étudiés par Gan et al. dans une méta-analyse en 2013⁴⁸. La variabilité respiratoire du pic de vitesse aortique (ΔV_{picAo}) était la seule variable permettant de prédire l'efficacité d'une réponse au remplissage.

En 2016, Desgranges et Al. ont précisé la validité du ΔV_{picAo} en pédiatrie dans une méta-analyse portant sur 6 études (163 patients)⁴⁹. Les auteurs ont toutefois soulevé la question du seuil optimal de validité, variant entre 10 et 15% selon les études. Il est important de se rappeler également que ces paramètres dynamiques ont été validés chez les patients en ventilation mécanique parfaitement adaptée au respirateur (pas d'effort inspiratoire) avec des volumes courants importants de l'ordre de 10ml/kg. C'est une limite importante à leur application en réanimation pédiatrique. En effet, la majorité de notre population ne requiert pas de support ventilatoire invasif ; chez les patients intubés, les volumes utilisés sont généralement plus faibles (6 à 8ml/kg) et les modes assistés sont privilégiés. Dans le cadre de notre étude, l'absence de corrélation entre variation pic de vitesse aortique (ETT) et SVV (CE) nous incite à penser que cet outil ne présente pas à l'heure actuelle d'intérêt pour la prédictivité d'une réponse au remplissage. Aucun des 10 patients inclus n'ayant bénéficié d'un remplissage au moment de sa participation à l'étude, il n'a pas été possible d'étudier la prédictibilité de la réponse au remplissage par le SVV.

Concernant l'évaluation de la fonction contractile du ventricule gauche, la faible corrélation entre FEVG en ETT et index de contractilité en CE incite à penser que l'échographie est à l'heure actuelle un moyen plus fiable que la CE pour réaliser cette évaluation.

- Reproductibilité des mesures échographiques du débit cardiaque et de variabilité du pic de vitesse aortique

Ces mesures ont été effectuées par 3 opérateurs avec différents niveaux d'expérience en échographie sur une seule coupe réalisée par l'opérateur principal. La reproductibilité pour les mesures du débit cardiaque était satisfaisante et comparable aux données de la littérature⁵⁰ avec un biais entre 0.4 et 3.2% un pourcentage d'erreur moyen entre 16 et 31% selon les opérateurs, ce qui suggère que les opérateurs ont reçu une formation identique pour la réalisation des mesures. Le calcul du coefficient de corrélation intra-classe soutient cette concordance élevée. Cependant, il est important de souligner que la variabilité aurait pu être majorée si chacun des opérateurs avait réalisé sa propre coupe échographique, plusieurs paramètres supplémentaires rentrant en jeu, en particulier le positionnement de la sonde d'échographie. Une mesure concomitante par les 3 opérateurs n'étant pas réalisable, il n'était pas possible de s'affranchir de ce biais dans le cadre de notre étude.

Le paramètre présentant la plus faible reproductibilité était la variation du pic de vitesse aortique $\Delta V_{pic\ Ao}$ avec un biais compris entre 10,1 et 23,7%, et un pourcentage d'erreur moyen compris entre 65 et 100%, selon les opérateurs. Le calcul du coefficient de corrélation intra-classe mettait également en évidence une concordance faible. Ces valeurs pourraient être expliquées par une mauvaise définition des enveloppes, entraînant une interprétation différente de l'image par les opérateurs et ainsi un biais de mesure.

5. Limites de l'étude

Plusieurs limites peuvent être retenues pour cette étude.

- Population

Cette étude prospective présente les limites liées à son caractère mono-centrique. La taille réduite de l'effectif étudié et le faible nombre de patients très sévères inclus ont également limité les possibilités d'analyse, notamment multivariée. Une étude sera donc débutée dans le service de Réanimation pédiatrique en Novembre 2018. Cette étude portera sur 50 enfants. (Cf Chapitre perspectives).

- Précision de la méthode de référence

L'analyse de Bland-Altman est utilisée pour évaluer l'accord entre deux mesures de la même variable clinique. Pour que l'accord entre deux techniques soit satisfaisant, le biais doit

être faible et la précision élevée. Il est important de comprendre dans ce contexte que la précision de la technique de référence est primordiale lors de l'évaluation de l'erreur combinée des deux techniques étudiées (ici CE et ETT). Notre étude est donc limitée par la précision de la méthode de référence (échographie), qui est de l'ordre de 30% par rapport aux gold standards invasifs (Fick, Swan ganz)^{13,30}. En faisant le choix d'utiliser l'échographie comme méthode de référence et non un gold standard invasif, la précision de la CE a donc pu être sous-estimée. Pour nous affranchir de cette limite, nous avons calculé la précision réelle de la cardiométrie électrique par la formule $\sqrt{(PEM^2 - \text{précision echo}^2)}$, avec un résultat satisfaisant¹¹.

- Problèmes techniques liés à la cardiométrie électrique

Une paire de mesure a été exclue de l'analyse de Bland-Altman en raison d'une altération franche de la qualité du signal CE (Dz), pouvant entraîner un biais. Il a été mis en évidence chez ce patient des interférences entraînées par la mesure de fréquence cardiaque du scope central MX 550 (Philips®, Eindhoven, Pays Bas), sur le signal recueilli en l'ICON et donc les valeurs calculées. Après avoir réglé le problème technique à l'origine de ces interférences, la qualité du signal CE s'est normalisée et les valeurs des mesures réalisées par la suite sur cet enfant étaient concordantes avec les mesures ETT. Ce dysfonctionnement important de l'ICON a été signalé au fabricant afin qu'une note d'information soit transmise aux différents centres utilisateurs.

La possibilité de transfert des données de l'ICON sur le scope centralisé permet une surveillance rapprochée du débit cardiaque. Un monitoring de qualité en continu par ICON est cependant parfois difficile, notamment limité par l'adhérence des électrodes et les artéfacts dus aux mouvements d'un enfant éveillé. Dans notre recueil, nous avons observé une mauvaise adhérence des électrodes dans 5% des mesures, avec nécessité de repose de nouvelles électrodes pour une mesure (2,5%). Nous n'avons pas de donnée sur le nombre d'électrodes repositionnées ou changées en 24h par l'équipe paramédicale.

- Choix du nombre de cycles cardiaques pour le moyennage des mesures ETT et CE

La variation du volume d'éjection systolique durant un cycle respiratoire est un problème pour toute méthode de détermination du débit cardiaque⁵¹⁻⁵⁴.

En prenant en compte le ratio FC/FR (estimé chez l'enfant entre 2.5 et 4 chez l'enfant), et afin de couvrir au moins un cycle ventilatoire, nous avons estimés que le DC devait être moyenné sur au moins 4 battements cardiaques en ETT et CE. Au cours de notre étude, la

mesure de l'ITV était donc réalisée sur 4 cycles cardiaques de qualité optimale, indépendamment du cycle respiratoire, afin de limiter ce biais. En CE, La variabilité étant trop importante (de l'ordre de 30% entre chaque moyennage) en fixant le moyennage sur 4 battements, notre expérience dans l'utilisation de l'ICON dans le service de réanimation pédiatrique nous a incité à moyenner les valeurs ICON sur 30 battements pour le débit cardiaque, l'index cardiaque et le SVV, seuil minimal permettant d'obtenir une stabilité relative des mesures affichées et ainsi une utilisation clinique cohérente. Il n'existe actuellement aucune recommandation constructeur permettant de statuer sur des seuils de moyennage cohérents en pratique clinique, cette appréciation est laissée à l'utilisateur, et pourrait entraîner un biais potentiel.

- Mesures effectuées par un seul opérateur à l'échographie

Les mesures échographiques ont été réalisées par un seul opérateur (opérateur 1). Malgré une reproductibilité pour les mesures du débit cardiaque entre les 3 opérateurs satisfaisante en ETT, nous avons retrouvé la présence d'un biais >10% lors de la comparaison des mesures de débit cardiaque CE et ETT des opérateurs 2 et 3, et d'un pourcentage d'erreur moyen >30% entre débit cardiaque CE et ETT de l'opérateur 3. Ces résultats peuvent être expliqués par l'échantillon très réduit de mesures utilisé pour cette analyse secondaire (10 mesures) mais soulèvent le questionnement de la pertinence de la validation de la CE par comparaison avec les mesures d'un seul opérateur en ETT.

CONCLUSION

La concordance entre mesure du débit cardiaque par CE et par ETT paraît satisfaisante dans une population médico-chirurgicale de réanimation pédiatrique (nouveau-né et chirurgie cardiaque exclus), avec un biais <10% et un pourcentage d'erreur <30%.

Ces résultats suggèrent que la cardiométrie électrique semble être appropriée pour la détermination du débit cardiaque chez les enfants présentant une instabilité hémodynamique hospitalisés dans un service de réanimation pédiatrique. En revanche, la CE ne permet pas d'évaluation fiable de la contractilité ni de la précharge dépendance qui nécessiteront d'être évaluées par ETT.

L'avantage de l'applicabilité continue, son faible coût en font un outil intéressant pour surveiller les tendances du débit cardiaque. Cette étude pilote a permis de mettre en évidence quelques défaillances techniques et d'apporter des solutions à ces dernières avant de débiter l'étude CARDIOREAPED.

PERSPECTIVES

L'étude CARDIOREAPED, qui fait suite à cette étude pilote débutera en Novembre 2018 et portera sur 50 enfants.

Le protocole utilisé pour cette nouvelle étude, basé sur le protocole de l'étude pilote, a reçu l'approbation du comité de protection des personnes Ouest IV – Nantes, référence 22/18_2, le 7 mars 2018. (Annexe 3)

BIBLIOGRAPHIE

1. Brissaud, O. *et al.* Experts' recommendations for the management of cardiogenic shock in children. *Ann. Intensive Care* **6**, 14 (2016).
2. Osypka, M. J. & Bernstein, D. P. Electrophysiologic principles and theory of stroke volume determination by thoracic electrical bioimpedance. *AACN Clin. Issues* **10**, 385–399 (1999).
3. Bernstein, D. P. & Lemmens, H. J. M. Stroke volume equation for impedance cardiography. *Med. Biol. Eng. Comput.* **43**, 443–450 (2005).
4. Grollmuss, O., Demontoux, S., Capderou, A., Serraf, A. & Belli, E. Electrical velocimetry as a tool for measuring cardiac output in small infants after heart surgery. *Intensive Care Med.* **38**, 1032–1039 (2012).
5. Blohm, M. E. *et al.* Impedance cardiography (electrical velocimetry) and transthoracic echocardiography for non-invasive cardiac output monitoring in pediatric intensive care patients: a prospective single-center observational study. *Crit. Care Lond. Engl.* **18**, 603 (2014).
6. Chaiyakulsil, C., Chantra, M., Katanyuwong, P., Khositseth, A. & Anantasit, N. Comparison of three non-invasive hemodynamic monitoring methods in critically ill children. *PloS One* **13**, e0199203 (2018).
7. Eytan, D., Goodwin, A. J., Greer, R., Guerguerian, A.-M. & Laussen, P. C. Heart Rate and Blood Pressure Centile Curves and Distributions by Age of Hospitalized Critically Ill Children. *Front. Pediatr.* **5**, (2017).
8. Durand, P., Chevret, L., Essouri, S., Haas, V. & Devictor, D. Respiratory variations in aortic blood flow predict fluid responsiveness in ventilated children. *Intensive Care Med.* **34**, 888–894 (2008).
9. Bland, J. M. & Altman, D. G. Agreement between methods of measurement with multiple observations per individual. *J. Biopharm. Stat.* **17**, 571–582 (2007).
10. Critchley, L. A. & Critchley, J. A. A meta-analysis of studies using bias and precision statistics to compare cardiac output measurement techniques. *J. Clin. Monit. Comput.* **15**, 85–91 (1999).
11. Cecconi, M., Rhodes, A., Poloniecki, J., Della Rocca, G. & Grounds, R. M. Bench-to-bedside review: the importance of the precision of the reference technique in method comparison studies--with specific reference to the measurement of cardiac output. *Crit. Care Lond. Engl.*

13, 201 (2009).

12. de Boode, W. P. *et al.* Cardiac output measurement using an ultrasound dilution method: a validation study in ventilated piglets. *Pediatr. Crit. Care Med. J. Soc. Crit. Care Med. World Fed. Pediatr. Intensive Crit. Care Soc.* **11**, 103–108 (2010).
13. Chew, M. S. & Poelaert, J. Accuracy and repeatability of pediatric cardiac output measurement using Doppler: 20-year review of the literature. *Intensive Care Med.* **29**, 1889–1894 (2003).
14. Barrier, K. M. Summary of the 2016 International Surviving Sepsis Campaign: A Clinician's Guide. *Crit. Care Nurs. Clin. North Am.* **30**, 311–321 (2018).
15. Han, Y. Y. *et al.* Early reversal of pediatric-neonatal septic shock by community physicians is associated with improved outcome. *Pediatrics* **112**, 793–799 (2003).
16. Brierley, J. *et al.* Clinical practice parameters for hemodynamic support of pediatric and neonatal septic shock: 2007 update from the American College of Critical Care Medicine. *Crit. Care Med.* **37**, 666–688 (2009).
17. Maitland, K. *et al.* Mortality after fluid bolus in African children with severe infection. *N. Engl. J. Med.* **364**, 2483–2495 (2011).
18. Wiener, R. S. & Welch, H. G. Trends in the use of the pulmonary artery catheter in the United States, 1993-2004. *JAMA* **298**, 423–429 (2007).
19. Shah, M. R. *et al.* Impact of the pulmonary artery catheter in critically ill patients: meta-analysis of randomized clinical trials. *JAMA* **294**, 1664–1670 (2005).
20. Richard, C. *et al.* Early use of the pulmonary artery catheter and outcomes in patients with shock and acute respiratory distress syndrome: a randomized controlled trial. *JAMA* **290**, 2713–2720 (2003).
21. Harvey, S. *et al.* Assessment of the clinical effectiveness of pulmonary artery catheters in management of patients in intensive care (PAC-Man): a randomised controlled trial. *Lancet Lond. Engl.* **366**, 472–477 (2005).
22. American Society of Anesthesiologists Task Force on Pulmonary Artery Catheterization. Practice guidelines for pulmonary artery catheterization: an updated report by the American Society of Anesthesiologists Task Force on Pulmonary Artery Catheterization. *Anesthesiology* **99**, 988–1014 (2003).
23. Ivanov, R., Allen, J. & Calvin, J. E. The incidence of major morbidity in critically ill patients managed with pulmonary artery catheters: a meta-analysis. *Crit. Care Med.* **28**, 615–

619 (2000).

24. Yu, D. T. *et al.* Relationship of pulmonary artery catheter use to mortality and resource utilization in patients with severe sepsis. *Crit. Care Med.* **31**, 2734–2741 (2003).
25. Costello, J. M., Clapper, T. C. & Wypij, D. Minimizing complications associated with percutaneous central venous catheter placement in children: recent advances. *Pediatr. Crit. Care Med. J. Soc. Crit. Care Med. World Fed. Pediatr. Intensive Crit. Care Soc.* **14**, 273–283 (2013).
26. Tinoco, J. [Effectiveness of insertion and maintenance bundles to prevent central-line-associated bloodstream infections in critically ill patients of all ages]. *Rev. Chil. Infectologia Organo Of. Soc. Chil. Infectologia* **33**, 477 (2016).
27. Teboul, J.-L., Cecconi, M. & Scheeren, T. W. L. Is there still a place for the Swan-Ganz catheter? No. *Intensive Care Med.* **44**, 957–959 (2018).
28. Jain, S. *et al.* Noninvasive Doppler ultrasonography for assessing cardiac function: can it replace the Swan-Ganz catheter? *Am. J. Surg.* **196**, 961–967; discussion 967-968 (2008).
29. Kaul, S. *et al.* Value of two-dimensional echocardiography for determining the basis of hemodynamic compromise in critically ill patients: a prospective study. *J. Am. Soc. Echocardiogr. Off. Publ. Am. Soc. Echocardiogr.* **7**, 598–606 (1994).
30. Alverson, D. C., Eldridge, M., Dillon, T., Yabek, S. M. & Berman, W. Noninvasive pulsed Doppler determination of cardiac output in neonates and children. *J. Pediatr.* **101**, 46–50 (1982).
31. Coté, C. J. *et al.* Continuous noninvasive cardiac output in children: is this the next generation of operating room monitors? Initial experience in 402 pediatric patients. *Paediatr. Anaesth.* **25**, 150–159 (2015).
32. Noori, S., Drabu, B., Soleymani, S. & Seri, I. Continuous non-invasive cardiac output measurements in the neonate by electrical velocimetry: a comparison with echocardiography. *Arch. Dis. Child. - Fetal Neonatal Ed.* **97**, F340–F343 (2012).
33. Boet, A., Jourdain, G., Demontoux, S. & De Luca, D. Stroke volume and cardiac output evaluation by electrical cardiometry: accuracy and reference nomograms in hemodynamically stable preterm neonates. *J. Perinatol. Off. J. Calif. Perinat. Assoc.* **36**, 748–752 (2016).
34. Rauch, R. *et al.* Non-invasive measurement of cardiac output in obese children and adolescents: comparison of electrical cardiometry and transthoracic Doppler echocardiography. *J. Clin. Monit. Comput.* **27**, 187–193 (2013).
35. Beltramo, F. *et al.* Validation of an Ultrasound Cardiac Output Monitor as a Bedside Tool

for Pediatric Patients. *Pediatr. Cardiol.* **37**, 177–183 (2016).

36. Weisz, D. E., Jain, A., McNamara, P. J. & EL-Khuffash, A. Non-invasive cardiac output monitoring in neonates using bioreactance: a comparison with echocardiography. *Neonatology* **102**, 61–67 (2012).

37. Lee, J.-H. *et al.* Prediction of fluid responsiveness using a non-invasive cardiac output monitor in children undergoing cardiac surgery. *Br. J. Anaesth.* **115**, 38–44 (2015).

38. Favia, I., Romagnoli, S., Di Chiara, L. & Ricci, Z. Predicting Fluid Responsiveness in Children Undergoing Cardiac Surgery After Cardiopulmonary Bypass. *Pediatr. Cardiol.* **38**, 787–793 (2017).

39. Gueret, G. *et al.* Cardiac output measurements in off-pump coronary surgery: comparison between NICO and the Swan-Ganz catheter. *Eur. J. Anaesthesiol.* **23**, 848–854 (2006).

40. Lee, G. Y., Yamada, J., Kyololo, O., Shorkey, A. & Stevens, B. Pediatric clinical practice guidelines for acute procedural pain: a systematic review. *Pediatrics* **133**, 500–515 (2014).

41. Claflin, K. S. *et al.* Cardiac output determinations in the newborn. Reproducibility of the pulsed Doppler velocity measurement. *J. Ultrasound Med. Off. J. Am. Inst. Ultrasound Med.* **7**, 311–315 (1988).

42. Evangelista, A., Garcia-Dorado, D., Garcia del Castillo, H., Gonzalez-Alujas, T. & Soler-Soler, J. Cardiac index quantification by Doppler ultrasound in patients without left ventricular outflow tract abnormalities. *J. Am. Coll. Cardiol.* **25**, 710–716 (1995).

43. Brissaud, O., Guichoux, J., Villega, F. & Orliaguet, G. [What non invasive haemodynamic assessment in paediatric intensive care unit in 2009?]. *Ann. Fr. Anesth. Reanim.* **29**, 233–241 (2010).

44. Michard, F. & Teboul, J.-L. Predicting fluid responsiveness in ICU patients: a critical analysis of the evidence. *Chest* **121**, 2000–2008 (2002).

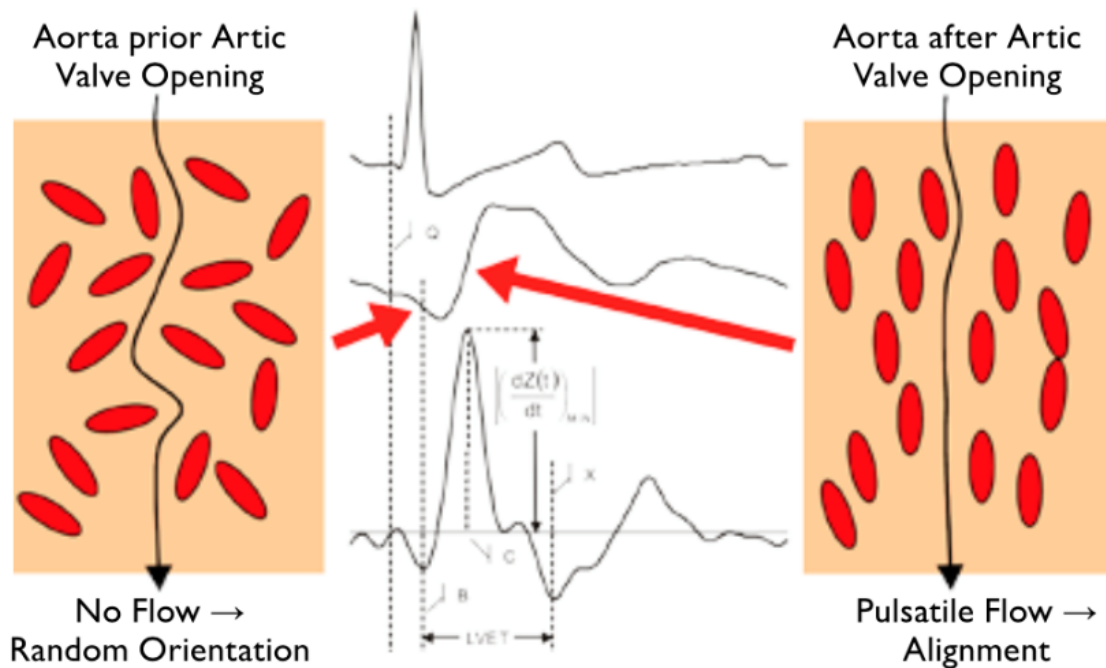
45. Michard, F. & Teboul, J. L. Using heart-lung interactions to assess fluid responsiveness during mechanical ventilation. *Crit. Care Lond. Engl.* **4**, 282–289 (2000).

46. Marik, P. E., Cavallazzi, R., Vasu, T. & Hirani, A. Dynamic changes in arterial waveform derived variables and fluid responsiveness in mechanically ventilated patients: a systematic review of the literature. *Crit. Care Med.* **37**, 2642–2647 (2009).

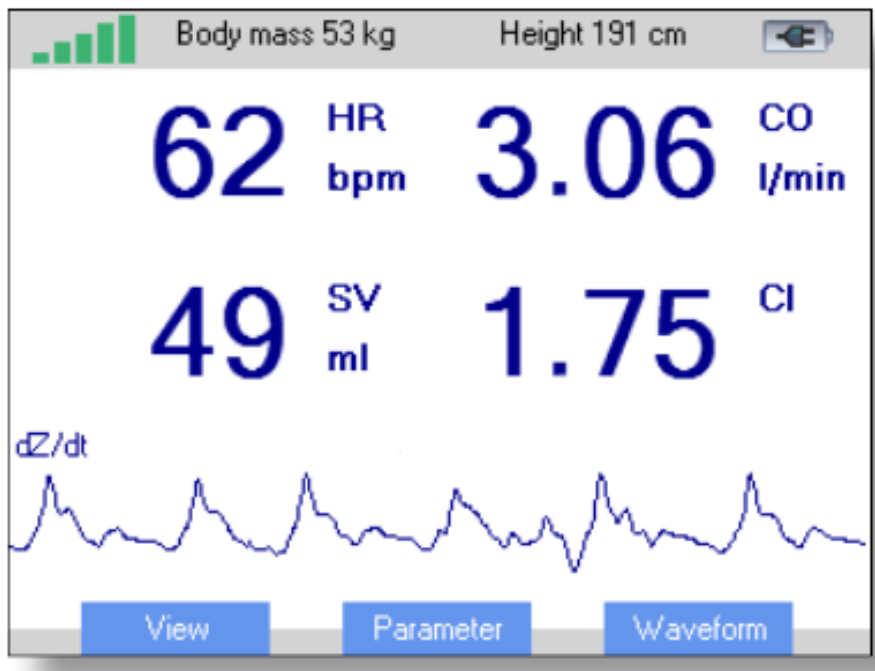
47. Cannesson, M. Arterial pressure variation and goal-directed fluid therapy. *J. Cardiothorac. Vasc. Anesth.* **24**, 487–497 (2010).

48. Gan, H., Cannesson, M., Chandler, J. R. & Ansermino, J. M. Predicting fluid responsiveness in children: a systematic review. *Anesth. Analg.* **117**, 1380–1392 (2013).
49. Desgranges, F.-P., Desebbe, O., Pereira de Souza Neto, E., Raphael, D. & Chassard, D. Respiratory variation in aortic blood flow peak velocity to predict fluid responsiveness in mechanically ventilated children: a systematic review and meta-analysis. *Pediatr. Anesth.* **26**, 37–47 (2016).
50. DeKoninck, P. *et al.* Comparison of Doppler-based and three-dimensional methods for fetal cardiac output measurement. *Fetal Diagn. Ther.* **32**, 72–78 (2012).
51. Nusmeier, A., van der Hoeven, J. G. & Lemson, J. Cardiac output monitoring in pediatric patients. *Expert Rev. Med. Devices* **7**, 503–517 (2010).
52. Engoren, M. & Barbee, D. Comparison of cardiac output determined by bioimpedance, thermodilution, and the Fick method. *Am. J. Crit. Care Off. Publ. Am. Assoc. Crit.-Care Nurses* **14**, 40–45 (2005).
53. Gonzalez, J. *et al.* Comparison of bedside measurement of cardiac output with the thermodilution method and the Fick method in mechanically ventilated patients. *Crit. Care Lond. Engl.* **7**, 171–178 (2003).
54. Pinsky, M. R. Why measure cardiac output? *Crit. Care Lond. Engl.* **7**, 114–116 (2003).

ANNEXES



Annexe 1. Changement de conductivité des érythrocytes dans l'aorte entre diastole et systole



Annexe 2. Affichage des 4 paramètres hémodynamiques et d'un signal physiologique.

Figures de la compagnie Osypka Medical, Berlin, Allemagne⁴



Madame Claire CHAUVETON

Direction de la Recherche et de l'Innovation
Hôpital La Colombière
Pavillon 32
39, avenue Charles Flahault
34295 MONTPELLIER Cedex 5

Nantes, le 7 mars 2018

Objet: AVIS

Étude **référence 22/18_2**, séance initiale du 06/03/2018
> **référence à rappeler dans toutes correspondances**

Madame,

Le Comité de Protection des Personnes OUEST IV a été saisi par le CHU de Montpellier promoteur d'une recherche interventionnelle impliquant la personne humaine mentionnée au 2° de l'article L.1121-1 du Code de la Santé Publique, intitulée :

« Validation de la cardiométrie électrique pour le monitoring continu du débit cardiaque en Réanimation pédiatrique : comparaison avec l'échographie transthoracique – Essai PROM 7571 – IdRCB n°2018-A00183-52 »

pour laquelle M. le Dr Julien BALEINE, réanimation pédiatrique, CHU de Montpellier, en est l'investigateur coordonnateur.

Après vérification de sa conformité réglementaire, le dossier soumis a été déclaré recevable le 23/02/2018 et enregistré sous la référence 22/18_2. D'autre part le comité s'est adressé à l'ANSM le 22/02/2018 pour s'assurer que l'utilisation des produits sur lesquels portent la recherche ne présente que des risques minimes, en application des dispositions de l'article L.1121-4 du CSP.

Le Comité de Protection des Personnes OUEST IV a examiné ce dossier lors de la séance plénière du comité du **6 mars 2018**, au cours de laquelle l'analyse du rapporteur pédiatre désigné par le président a été présentée à l'ensemble des membres, ainsi que l'avis du méthodologiste. Aucun conflit d'intérêt n'a été déclaré par les membres délibérants et le quorum pour cette séance a été validé.

Après délibération, le comité a voté un **AVIS FAVORABLE** au protocole version 1 du 15/02/2018, au résumé du protocole version 1 du 15/02/2018, à la lettre d'information et au formulaire de recueil du consentement parent version 1 du 15/02/2018, à la lettre d'information enfant 5-7 ans version 1 du 15/02/2018, à la lettre d'information enfant 8-10 ans version 1 du 15/02/2018, à la liste des investigateurs version 1 du 15/02/2018 et aux CV associés, à la justification de l'adéquation des moyens du 15/02/2018, à l'attestation d'assurance du 29/01/2018 (Lloyd's, contrat n° WIBCLT17132). Le dossier administratif est complet.

Le comité souligne cependant les remarques suivantes :

- Préciser si les mesures de DC par ETT sont en aveugle de la mesure par CE.
- Il est parfois mentionné que l'ETT permet une mesure "de référence" du DC alors qu'il s'agit d'une mesure "non invasive de référence" du DC s'étant de fait imposée, tel que précisé en introduction.
- Faute d'orthographe, lettre d'information parents paragraphe 4.

CPP OUEST IV - Immeuble Cap Ouest - Maison de la recherche en santé - 53, chaussée de la Madeleine - 44000 NANTES

Pour les courriers format lettre expédiés par La Poste avec AR (uniquement), merci de les adresser à l'adresse suivante :
CPP Ouest IV / CHU de Nantes/immeuble Deurbroucq / 5, allée de l'île Gloriette / 44093 Nantes cedex 1

Annexe 3 : Avis favorable du comité de protection des personnes

	Pré inclusion T-1 heure	Inclusion T0	Etude T+48 heures
Consentement éclairé	✓		
Examen clinique ¹	✓		✓ (avant chaque mesure)*
CE (enregistrement continu)		✓	✓
ETT (mesures discontinues)			4 mesures
Recherche des évènements indésirables		✓	✓

¹Examen clinique: poids, taille, TRC, diurèse, FC, FR, PAM, température, SpO₂.

* hors taille, poids, TRC

Annexe 4 : Design de l'étude

Percentiles	1	5	10	25	50	75	90	95	99
Age									
0-3 m	35	41	44	49	55	63	71	77	95
3-6 m	39	45	49	54	61	69	80	86	102
6-9 m	42	49	52	58	66	74	86	93	108
9-12 m	43	51	55	61	69	78	90	97	113
12-18 m	45	52	56	62	70	79	91	99	116
18-24 m	44	53	56	62	70	80	90	98	116
2-3 y	45	53	56	63	71	80	90	98	116
3-4 y	47	54	57	63	72	81	90	98	113
4-6 y	48	55	58	65	73	82	92	99	113
6-8 y	48	55	59	66	75	84	94	101	117
8-12 y	49	56	61	68	76	86	95	103	120
12-15 y	49	57	61	69	78	88	97	105	122
15-18 y	50	58	62	69	78	88	98	104	120

Annexe 5 : Pression artérielle moyenne (PAM) chez l'enfant de la naissance à 18 ans.

Distribution des valeurs du 1^{er} au 99^{ème} percentile.

Percentiles	1	5	10	25	50	75	90	95	99
Age									
0-3 m	94	110	118	130	142	155	166	173	188
3-6 m	87	104	112	124	137	151	164	171	187
6-9 m	81	99	107	120	134	148	162	170	185
9-12 m	77	95	104	117	132	146	160	169	184
12-18 m	72	92	101	115	130	145	160	168	184
18-24 m	71	89	98	112	127	143	157	166	183
2-3 y	68	85	93	107	122	138	152	162	182
3-4 y	67	82	90	104	119	134	149	160	179
4-6 y	64	78	86	100	116	131	146	157	174
6-8 y	62	75	82	96	111	126	141	152	170
8-12 y	58	70	76	89	103	120	136	146	165
12-15 y	54	64	71	84	99	115	131	141	160
15-18 y	51	61	67	80	96	111	127	137	155

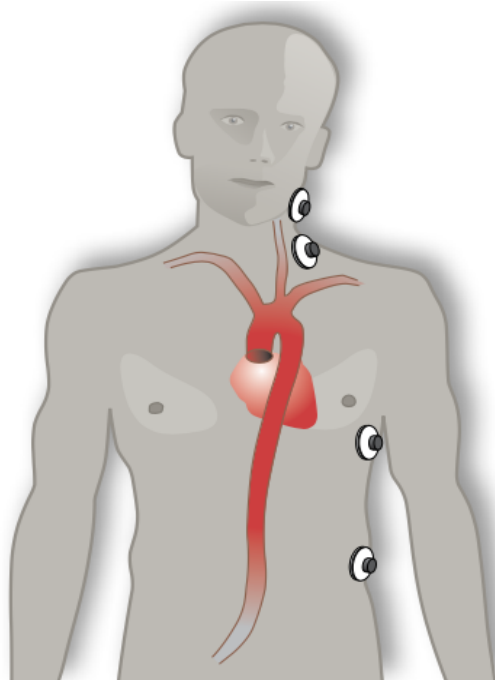
Annexe 6. Fréquence cardiaque (FC) chez l'enfant de la naissance à 18 ans.

Distribution des valeurs du 1^{er} au 99^{ème} percentile.



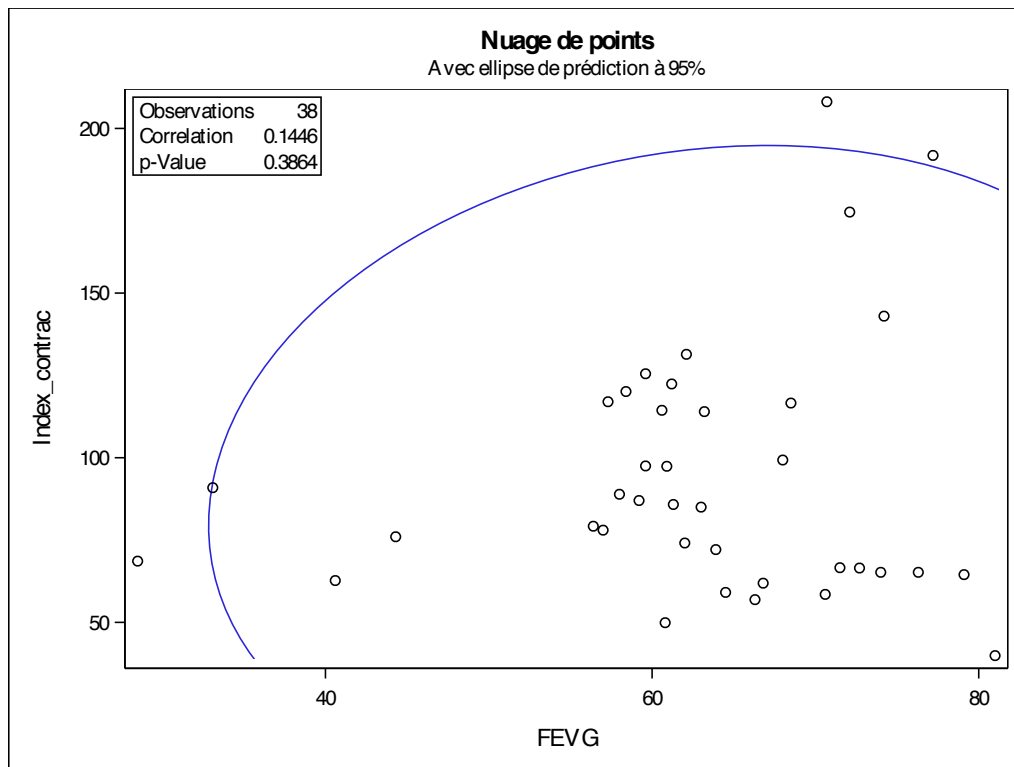
Sensor placement for small children and neonates

Annexe 7: Positionnement des électrodes chez le nourrisson et enfant ≤ 2 ans

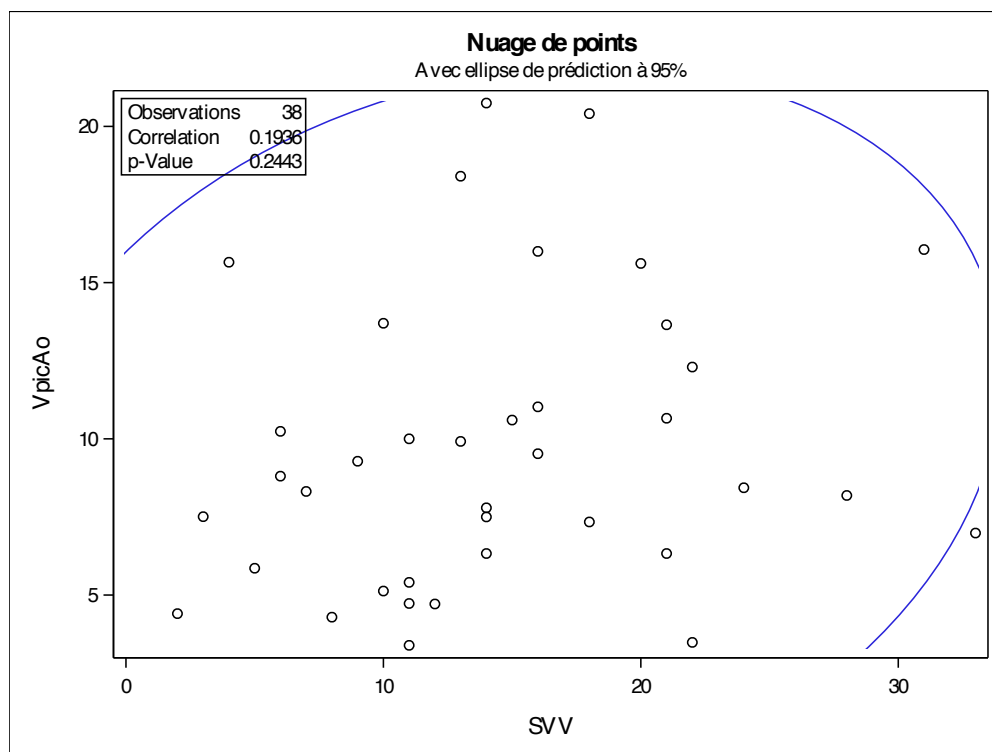


Sensor located at the left side of neck and thorax

Annexe 8: positionnement des électrodes chez l'enfant > 2 ans



Annexe 9 : Corrélation entre FEVG (ETT) et Index de contractilité (ICON)
FEVG : Fraction d'éjection du ventricule gauche ; ETT : échographie trans-thoracique



Annexe 10 : Corrélation entre SVV (ICON) et ΔV_{picAo} (ETT)
SSV : Stroke volume variation ; ΔV_{picAo} : variabilité du pic de vitesse aortique ; ETT : échographie trans-thoracique

SERMENT

- *En présence des Maîtres de cette école, de mes chers condisciples et devant l'effigie d'Hippocrate, je promets et je jure, au nom de l'Être suprême, d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la médecine.*
- *Je donnerai mes soins gratuits à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail.*
- *Admis (e) dans l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe, ma langue taira les secrets qui me seront confiés, et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs, ni à favoriser le crime.*
- *Respectueux (se) et reconnaissant (e) envers mes Maîtres, je rendrai à leurs enfants l'instruction que j'ai reçue de leurs pères.*
- *Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses. Que je sois couvert (e) d'opprobre et méprisé (e) de mes confrères si j'y manque.*

RESUMÉ

Introduction

La cardiométrie électrique (CE) est une méthode de mesure continue et non invasive du débit cardiaque. L'objectif principal était de valider la CE en comparaison de l'échocardiographie transthoracique (ETT) pour la mesure du débit cardiaque.

Matériel et méthodes

Nous avons mené une étude pilote prospective monocentrique dans le service de réanimation pédiatrique du CHU de Montpellier. Nous avons inclus tous les nourrissons d'âge > 28 jours et enfants d'âge ≤ 10ans, présentant une instabilité hémodynamique ou une défaillance circulatoire, et exclus les enfants présentant une cardiopathie congénitale ou un abord thoracique impossible. Nous avons mesuré de manière simultanée le débit cardiaque par CE et par ETT. La concordance, le biais et la précision des mesures étaient analysés par la méthode de Bland-Altman. Un biais <10% et un pourcentage d'erreur <30% étaient considérés comme cliniquement acceptables.

Résultats

Au total 10 patients ont été inclus (âge médian 3,5ans [0,8-7], poids médian 17,25kg [5,36-28]), et 38 mesures ont été réalisées et analysées. Le biais et le pourcentage d'erreur pour la mesure du débit cardiaque étaient 0,46% et 21,73%, respectivement. Il n'y avait pas de corrélation des paramètres évaluant la contractilité (FEVG en ETT et index de contractilité en CE) ($r=0,14$; $p=0,38$), ni ceux évaluant la précharge dépendance (variation du pic de vélocité aortique en ETT et SVV en CE) ($r=0,193$; $p=0,244$).

Conclusion

La CE paraît être un moyen fiable de mesurer le DC en continu en comparaison à l'échocardiographie trans-thoracique mais présente des limites concernant la contractilité et la précharge dépendance. L'étude CARDIOREAPED fera suite à cette étude pilote ; elle débutera en Novembre 2018 et portera sur 50 enfants.

Mots clés :

Instabilité hémodynamique ; défaillance circulatoire, réanimation pédiatrique, échocardiographie, cardiométrie électrique, débit cardiaque, monitoring non invasif, monitoring continu