



HAL
open science

Physiological effects and safety of bed verticalization in patients with acute respiratory distress syndrome

Louis Bouchant

► **To cite this version:**

Louis Bouchant. Physiological effects and safety of bed verticalization in patients with acute respiratory distress syndrome. Human health and pathology. 2022. dumas-03843867

HAL Id: dumas-03843867

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03843867v1>

Submitted on 8 Nov 2022

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.

UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE
UFR DE MÉDECINE ET DES PROFESSIONS PARAMÉDICALES

THÈSE D'EXERCICE
pour le
DIPLOME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN MÉDECINE
par

BOUCHANT Louis

Présentée et soutenue publiquement le 19 octobre 2022

EFFETS PHYSIOLOGIQUES ET SECURITE DE LA VERTICALISATION DE PATIENTS EN
SYNDROME DE DETRESSE RESPIRATOIRE AIGUE
PHYSIOLOGICAL EFFECTS AND SAFETY OF BED VERTICALIZATION IN PATIENTS
WITH ACUTE RESPIRATORY DISTRESS SYNDROME

Directeur de thèse :

Monsieur AUDARD Jules, Docteur, CHU de Clermont-Ferrand (Réanimation adultes), Anesthésie-Réanimation et Médecine péri-opératoire

Président du jury :

Monsieur FUTIER Emmanuel, Professeur, UFR de Médecine et des Professions paramédicales de Clermont-Ferrand, Anesthésie-Réanimation et Médecine péri-opératoire

Membres du jury :

Monsieur JABAUDON Matthieu, Professeur, UFR de Médecine et des Professions paramédicales de Clermont-Ferrand, Anesthésie-Réanimation et Médecine péri-opératoire

Monsieur GODET Thomas, Maître de conférences, UFR de Médecine et des Professions paramédicales de Clermont-Ferrand, Anesthésie-Réanimation et Médecine péri-opératoire

UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE
UFR DE MÉDECINE ET DES PROFESSIONS PARAMÉDICALES

THÈSE D'EXERCICE
pour le
DIPLOME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN MÉDECINE
par

BOUCHANT Louis

Présentée et soutenue publiquement le 19 octobre 2022

EFFETS PHYSIOLOGIQUES ET SECURITE DE LA VERTICALISATION DE PATIENTS EN
SYNDROME DE DETRESSE RESPIRATOIRE AIGUE
PHYSIOLOGICAL EFFECTS AND SAFETY OF BED VERTICALIZATION IN PATIENTS
WITH ACUTE RESPIRATORY DISTRESS SYNDROME

Directeur de thèse :

Monsieur AUDARD Jules, Docteur, CHU de Clermont-Ferrand (Réanimation adultes), Anesthésie-Réanimation et Médecine péri-opératoire

Président du jury :

Monsieur FUTIER Emmanuel, Professeur, UFR de Médecine et des Professions paramédicales de Clermont-Ferrand, Anesthésie-Réanimation et Médecine péri-opératoire

Membres du jury :

Monsieur JABAUDON Matthieu, Professeur, UFR de Médecine et des Professions paramédicales de Clermont-Ferrand, Anesthésie-Réanimation et Médecine péri-opératoire

Monsieur GODET Thomas, Maître de conférences, UFR de Médecine et des Professions paramédicales de Clermont-Ferrand, Anesthésie-Réanimation et Médecine péri-opératoire



UNIVERSITE CLERMONT AUVERGNE

PRESIDENTS HONORAIRES
UNIVERSITE D'AUVERGNE

: **JOYON** Louis
: **DOLY** Michel
: **TURPIN** Dominique
: **VEYRE** Annie
: **DULBECCO** Philippe
: **ESCHALIER** Alain

PRESIDENTS HONORAIRES
UNIVERSITE BLAISE PASCAL

: **CABANES** Pierre
: **FONTAINE** Jacques
: **BOUTIN** Christian
: **MONTEIL** Jean-Marc
: **ODOUARD** Albert
: **LAVIGNOTTE** Nadine

PRESIDENT DE L'UNIVERSITE
PREMIERE VICE-PRESIDENTE
CHARGEE DU PILOTAGE ET DES MOYENS
VICE PRESIDENTE CHARGEE DE LA FORMATION
VICE-PRESIDENTE CHARGEE DE LA RECHERCHE
DIRECTEUR GENERAL DES SERVICES

: **BERNARD** Mathias
: **FOGLI** Anne
: **PEYRARD** Françoise
: **PREVOT** Vanessa
: **PAQUIS** François



UFR DE MEDECINE ET DES PROFESSIONS PARAMEDICALES

DOYENS HONORAIRES

: **DETEIX** Patrice
: **CHAZAL** Jean

DOYEN
RESPONSABLE ADMINISTRATIVE

: **CLAVELOU** Pierre
: **ROBERT** Gaëlle

LISTE DU PERSONNEL ENSEIGNANT

PROFESSEURS HONORAIRES :

MM. BACIN Franck - BEGUE René-Jean - BEYTOUT Jean - BOIRE Jean-Yves - BOITEUX Jean-Paul - BOMMELAER Gilles - BOUCHER Daniel - BUSSIÈRE Jean-Louis - CANO Noël - CASSAGNES Jean - CATILINA Pierre - CHABANNES Jacques - CHAMOIX Alain - CHAZAL Jean - CHIPPONI Jacques - CHOLLET Philippe - CITRON Bernard - CLEMENT Gilles - COUDERT Jean - DASTUGUE Bernard - DAUPLAT Jacques - DECHELOTTE Pierre - DEMEOCQ François - DE RIBEROLLES Charles - DETEIX Patrice - ESCANDE Georges - Mme FONCK Yvette - M. GENTOU Claude - Mme GLANDDIER Phyllis - MM. IRTIUM Bernard - JACQUETIN Bernard - Mme LAVARENNE Jeanine - MM. LAVERAN Henri - LESOURD Bruno - LEVAI Jean-Paul - MAGE Gérard - MICHEL Jean-Luc - MONDIE Jean-Michel - PHILIPPE Pierre - PLAGNE Robert - PLANCHE Roger - PONSONNAILLE Jean - REY Michel - Mme RIGAL Danièle - MM. ROZAN Raymond - SCHOEFFLER Pierre - SIROT Jacques - RIBAL Jean-Pierre - SOUTEYRAND Pierre - TANGUY Alain - TERVER Sylvain - THIEBLOT Philippe - TOURNILHAC Michel - VANNEUVILLE Guy - VIALLET Jean-François - Mme VEYRE Annie

PROFESSEURS EMERITES :

MM. AUMAITRE Olivier - AVAN Paul - BAZIN Jean-Etienne - CAILLAUD Denis - DAPOIGNY Michel - DUBRAY Claude - ESCHALIER Alain - KEMENY Jean-Louis - LABBE André - Mme LAFEUILLE Hélène - MM. LEMERY Didier - LUSSON Jean-René - POULY Jean-Luc

PROFESSEURS DES UNIVERSITES-PRATICIENS HOSPITALIERS

CLASSE EXCEPTIONNELLE

M. VAGO Philippe	Histologie-Embryologie Cytogénétique
M. DURIF Franck	Neurologie
M. BOYER Louis	Radiologie et Imagerie Médicale option Clinique
M. CANIS Michel	Gynécologie-Obstétrique
Mme PENAULT-LLORCA Frédérique	Anatomie et Cytologie Pathologiques
M. BIGNON Yves Jean	Cancérologie option Biologique
M. BOIRIE Yves	Nutrition Humaine
M. CLAVELOU Pierre	Neurologie
M. GILAIN Laurent	O.R.L.
M. LEMAIRE Jean-Jacques	Neurochirurgie
M. CAMILLERI Lionel	Chirurgie Thoracique et Cardio-Vasculaire
M. LLORCA Pierre-Michel	Psychiatrie d'Adultes
M. PEZET Denis	Chirurgie Digestive
M. SOUWEINE Bertrand	Réanimation Médicale
M. BOISGARD Stéphane	Chirurgie Orthopédique et Traumatologie
Mme DUCLOS Martine	Physiologie

M.	SCHMIDT Jeannot	Médecine d'Urgence
M.	BERGER Marc	Hématologie
M.	GARCIER Jean-Marc	Anatomie-Radiologie et Imagerie Médicale
M.	ROSSET Eugénio	Chirurgie Vasculaire
M.	SOUBRIER Martin	Rhumatologie
M.	ABERGEL Armando	Hépatologie
Mme	BARTHELEMY Isabelle	Chirurgie Maxillo-Faciale
M.	RUIVARD Marc	Médecine Interne

1ère CLASSE

M.	VERRELLE Pierre	Radiothérapie option Clinique
M.	D'INCAN Michel	Dermatologie -Vénérologie
Mme	JALENQUES Isabelle	Psychiatrie d'Adultes
M.	GERBAUD Laurent	Epidémiologie, Economie de la Santé et Prévention
M.	TAUVERON Igor	Endocrinologie et Maladies Métaboliques
M.	MOM Thierry	Oto-Rhino-Laryngologie
M.	RICHARD Ruddy	Physiologie
M.	SAPIN-DEFOUR Vincent	Biochimie et Biologie Moléculaire
M.	BAY Jacques-Olivier	Cancérologie
M.	COUDEYRE Emmanuel	Médecine Physique et de Réadaptation
Mme	GODFRAIND Catherine	Anatomie et Cytologie Pathologiques
M.	LAURICHESSE Henri	Maladies Infectieuses et Tropicales
M.	TOURNILHAC Olivier	Hématologie
M.	CHIAMBARETTA Frédéric	Ophthalmologie
M.	FILAIRE Marc	Anatomie – Chirurgie Thoracique et Cardio-Vasculaire
M.	GALLOT Denis	Gynécologie-Obstétrique
M.	GUY Laurent	Urologie
M.	TRAORE Ousmane	Hygiène Hospitalière
M.	ANDRE Marc	Médecine Interne
M.	BONNET Richard	Bactériologie, Virologie
M.	CACHIN Florent	Biophysique et Médecine Nucléaire
M.	COSTES Frédéric	Physiologie
M.	FUTIER Emmanuel	Anesthésiologie-Réanimation
Mme	HENG Anne-Elisabeth	Néphrologie
M.	MOTREFF Pascal	Cardiologie
Mme	PICKERING Gisèle	Pharmacologie Clinique
M.	RABISCHONG Benoît	Gynécologie Obstétrique
M.	CHABROT Pascal	Radiologie et Imagerie Médicale
M.	DESCAMPS Stéphane	Chirurgie Orthopédique et Traumatologique
Mme	HENQUELL Cécile	Bactériologie Virologie
M.	POMEL Christophe	Cancérologie – Chirurgie Générale

2ème CLASSE

Mme CREVEAUX Isabelle	Biochimie et Biologie Moléculaire
M. FAICT Thierry	Médecine Légale et Droit de la Santé
Mme KANOLD LASTAWIECKA Justyna	Pédiatrie
M. TCHIRKOV Andréï	Cytologie et Histologie
M. CORNELIS François	Génétique
M. LESENS Olivier	Maladies Infectieuses et Tropicales
M. AUTHIER Nicolas	Pharmacologie Médicale
M. BROUSSE Georges	Psychiatrie Adultes/Addictologie
M. BUC Emmanuel	Chirurgie Digestive
M. LAUTRETTE Alexandre	Néphrologie Réanimation Médicale
Mme BRUGNON Florence	Biologie et Médecine du Développement et de la Reproduction
M. ESCHALIER Romain	Cardiologie
M. MERLIN Etienne	Pédiatrie
Mme TOURNADRE Anne	Rhumatologie
M. DURANDO Xavier	Cancérologie
M. DUTHEIL Frédéric	Médecine et Santé au Travail
Mme FANTINI Maria Livia	Neurologie
M. SAKKA Laurent	Anatomie – Neurochirurgie
M. BOURDEL Nicolas	Gynécologie-Obstétrique
M. GUIEZE Romain	Hématologie
M. POINCLOUX Laurent	Gastroentérologie
M. SOUTEYRAND Géraud	Cardiologie
M. EVRARD Bertrand	Immunologie
M. POIRIER Philippe	Parasitologie et Mycologie
Mme PHAM DANG Nathalie	Chirurgie Maxillo-Faciale et Stomatologie
Mme SARRET Catherine	Pédiatrie
M. BOUVIER Damien	Biochimie et Biologie Moléculaire
M. BUISSON Anthony	Gastroentérologie
Mme CASSAGNES Lucie	Radiologie et Imagerie Médicale
M. GAGNIERE Johan	Chirurgie Viscérale et Digestive
M. JABAUDON-GANDET Matthieu	Anesthésiologie-Réanimation et Médecine Péri-Opératoire
M. LEBRETON Aurélien	Hématologie
M. MOISSET Xavier	Neurologie
M. SAMALIN Ludovic	Psychiatrie d'Adultes
M. THAVEAU Fabien	Chirurgie Vasculaire

PROFESSEURS DES UNIVERSITES DE MEDECINE GENERALE

1ère CLASSE

M. VORILHON Philippe	Médecine Générale
Mme LAPORTE Catherine	Médecine Générale

2ème CLASSE

M.	COLL Guillaume	Neurochirurgie
M.	GODET Thomas	Anesthésiologie-Réanimation et Médecine Péri-Opératoire
M.	LACHAL Jonathan	Pédopsychiatrie
M.	MOUSTAFA Farès	Médecine d'Urgence
M.	CHENAF Chouki	Pharmacologie Clinique

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES DE MEDECINE GENERALE

1ère CLASSE

Mme	VAILLANT-ROUSSEL Hélène	Médecine Générale
-----	-------------------------	-------------------

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

HORS CLASSE

M.	BLANCHON Loïc	Biochimie Biologie Moléculaire
M.	MARCHAND Fabien	Pharmacologie Médicale
Mme	VAURS-BARRIERE Catherine	Biochimie Biologie Moléculaire

CLASSE NORMALE

M.	BAILLY Jean-Luc	Bactériologie Virologie
Mme	AUBEL Corinne	Oncologie Moléculaire
Mme	GUILLET Christelle	Nutrition Humaine
M.	BIDET Yannick	Oncogénétique
M.	DALMASSO Guillaume	Bactériologie
M.	PIZON Frank	Santé Publique
M.	SOLER Cédric	Biochimie Biologie Moléculaire
M.	GIRAUDET Fabrice	Biophysique et Traitement de l'Image
M.	LOLIGNIER Stéphane	Neurosciences – Neuropharmacologie
Mme	MARTEIL Gaëlle	Biologie de la Reproduction
M.	PINEL Alexandre	Nutrition Humaine

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES DES UNIVERSITES

Mme ESCHALIER Bénédicte	Médecine Générale
Mme RICHARD Amélie	Médecine Générale
M. TESSIERES Frédéric	Médecine Générale
Mme ROUGE Laure	Médecine Générale
Mme BERTRAND-JARROUSSE Véronique	Médecine Générale
Mme VICARD-OLAGNE Mathilde	Médecine Générale

REMERCIEMENTS

Monsieur le Professeur Emmanuel FUTIER, vous êtes clairement le leader bienveillant, pédagogue, chaleureux et charismatique que tout interne rêve d'avoir comme guide. Le genre de patron que curieusement on aime croiser dans les couloirs même le lundi matin en sortant d'un V-D. Merci de m'avoir lancé dans l'univers merveilleux des pressions transpulmonaires, en espérant qu'elles me permettent de contribuer à faire un monde meilleur. Sur une note plus sérieuse merci d'être le médecin et professeur que vous êtes, qui nous sert de modèle et nous rend fier d'être anesthésiste-réanimateur.

Monsieur le Professeur Matthieu JABAUDON, merci pour ta disponibilité et ta gentillesse sans faille. Ton expérience scientifique m'a énormément apporté dans mes travaux et mon approche de la recherche clinique. C'est une aubaine pour nous tous que tu sois aussi investi dans le DAR et en même temps si accessible. En espérant à nouveau pouvoir discuter avec toi de mécanique ventilatoire dans un haut lieu de la science telle une Taco-Bell Cantina.

Monsieur le Docteur Thomas GODET, j'ai eu la chance de te rencontrer très tôt dans mon cursus d'interne et j'ai très vite accroché à ta pédagogie mêlant à merveille la théorique (souvent trop négligée) et la pratique concrète, assorties d'une touche d'humour qu'on pourrait qualifier de très raffinée. Merci pour avoir toujours été présent dès qu'il le fallait et avoir pu me guider, aussi bien dans ce travail de thèse que dans ma pratique clinique quotidienne.

Monsieur le Docteur Jules AUDARD, merci d'avoir été mon chef d'orchestre au sein de ce projet de thèse passionnant. Tout en bienveillance tu m'as guidé dans mon travail et su me donner des objectifs, m'aider et me motiver quand il le fallait. Tu es un médecin d'une qualité rare, avec un raisonnement posé, clairvoyant et limpide comme on en voit peu. Et en même temps tu sais être un collègue agréable et fédérateur, essentiel au bon fonctionnement d'une équipe. J'ai aussi pu découvrir nos nombreux intérêts communs qui ont grandement contribué à notre entente personnelle et professionnelle. Merci pour tout.

A ma famille,

Héloïse, ma chère et tendre. Qui aurait pu croire un jour que la belle et le clochard n'était pas qu'un bon film Disney. M'ayant courtsé avant que je prenne cette spécialité au potentiel lucratif élevé, je sais la sincérité de ton amour, et sache que celle-ci est réciproque. Merci de me tolérer au quotidien et de rendre ma vie plus fun chaque jour. Je t'aime.

Mes parents, c'est sans nul doute vous qui avez constitué les fondations essentielles qui m'ont permis d'aller jusque-là. Car bien que je pense que la France offre une égalité des chances sociétales sans pareil, l'inégalité parentale, elle, persiste bel et bien, et j'en suis le premier privilégié. Merci **Maman** pour tout ce temps consacré à nous éduquer et nous lancer dans la bonne direction. Ces heures sur la table de la cuisine entre devoirs, goûts, dictées, et j'en passe... n'auront pas servi à rien. Merci **Papa** pour nous avoir inculqué comme personne le sens du travail et de la persévérance. Je vous suis éternellement reconnaissant pour tout.

Marion, merci mille fois pour ton aide tout au long de toutes ces étapes, en plus d'être brillante et belle, tu es la plus géniale des sœurs (malgré le fait que tu sois cardiologue). Merci aussi d'avoir intégré **Pierre-Antoine** à la famille, un beau-frère génial avec qui je partage tant de chose, et qui m'a aussi tellement aidé à m'intégrer, progresser et m'épanouir durant cet internat. Je n'oublie pas **Louïsette**, ma nièce adorée que j'ai hâte de voir parler, afin qu'on commence à discuter ensemble de politique et d'immigration dès le plus jeune âge.

Pierre, ouf, j'ai réussi à passer ma thèse avant la tienne, ça m'évite d'être le dernier ! Continue à être à fond dans tes passions, j'espère que ton avenir professionnel tant que personnel s'annonce radieux. J'ai hâte que tu me prêtés ta Giulia pour assister aux prochains mariages !

Monique, Bruno, Colette, Robert, mes grands-parents, pour toutes ces années à nous supporter, nous gâter, nous faire découvrir tant de choses. J'espère vous rendre fiers.

Mes oncles, tantes, cousins, cousines, ainsi que leurs pièces rattachées, merci de constituer une famille aussi belle et agréable. J'attends chaque repas de famille avec impatience.

Roland, Odile, Aurélie, Raphaël, Anthony, Charlotte, Oscar, Luna, Solyne, merci d'avoir su m'accueillir si naturellement et chaleureusement au sein de votre famille, je vais finir par aimer la Loire.

Sbinalla, ma fille, la plus belle de toutes. Toi qui es toujours heureuse de me voir sauf quand je dois te brosser. Et même si tu es la personne avec qui je passe le plus de temps depuis l'an dernier, je ne me lasse jamais de nos promenades ou de nos siestes. Au fait, maman attend un petit frère ou une petite sœur, et c'est pour avril. Bisous.

A mes amis proches,

Clément, mon BFF comme on dit chez les fragiles. C'est fou comme une simple soirée d'Halloween dans un bar miteux nous a conduits à une telle amitié. Merci d'avoir toujours été là, à me motiver dans le boulot autour d'un expresso-chiasso, et dans les soirées autour d'une Suze ou d'un Moscow Mule. Et évidemment un gros merci à **Victoria** Boitouh, la plus belle des jeunes mariées... ne change pas Vicky, tu me fais toujours trop me marrer. Sans oublier un gros merci pour **Marie-Claire** et **Jean-Paul** !

Benjamin, le type que je me coltine depuis la PACES en prépa jusqu'à ma thèse... C'est dire le niveau de complicité qu'on a pu développer. C'est toujours un honneur d'être ton amis / adversaire / partenaire / collègue / ménestrel et tout ce que tu veux d'autre. Maintenant qu'on va tous les deux être thésés, j'espère qu'on va pouvoir redevenir des joueurs professionnels de Peggle, et faire un peu de squash accessoirement. La bise au chat et à **Alain**, sale aoûtien.

Quino, oula... mais je ne sais même pas quoi dire tellement on a fait tout et n'importe quoi ensemble... la colloc, les soirées, les nénettes (mais chut), les révisions, les FIFA, les Catane, les vacances, les coups de défibrillateur... faudrait que tu fasses des fiches pour réviser tout ce qu'on a fait ensemble, non ? Et merci **Fred** et **Pascal** de l'avoir fait et aussi de m'avoir accueilli tel votre enfant pendant les révisions de l'ECN, je vous dois une belle partie de mon résultat à ce concours.

Yann, merci de m'avoir permis de ne pas avoir le plus gros pif de la bande. Le Cantal c'est nul.

Martin, merci d'être mon ministre des sports et de la culture. Tu rends tout plus drôle, j'adore.

Claire, haha ça me fait toujours autant rire un prénom aussi noble et pur quand on te connaît.

Rémi et Nico, le Fight Club...quel semestre de folie au PEV. C'est avec des gars comme vous, sans prise de tête et toujours opérationnels pour la pétanque ou l'apéro que la vie est vraiment plus belle.

Asher, Duuub natiooon ! It's so amazing that after all these years apart and so far away from each other we've stayed so connected. Man, this is the proof of a true and predestined friendship. Thank you for your incredible hospitality and for helping me to prepare for my presentation of the ERECTION study in San Francisco. Hope to see you and your friends soon in France or in the United States !

Je n'oublie pas les dizaines de copains d'externat avec qui je garderai des souvenirs inoubliables...

Cédric, Thomas, Nicolas, Yann, Agathe, Simon, Olivier, Félix, Margaux, Martin, Rémi, Quentin, etc...

Sans oublier, ceux qui ont marqué ma scolarité au collège comme au lycée et grâce à qui j'ai construit mon humour à deux balles, en pensant particulièrement à **Léo-Paul, Gaston, Louis, Édouard, Pierre, Hicham, Paul, Johann, Anthony, Thomas** et désolé à tous ceux que j'oublie...

A mes collègues,

Mes co-internes de promotion, piliers de soutien essentiels tout au long de ce périple. Merci **Maud, Kélian, Loïc, Julien, Camille, Lucie, Louisa, Oussama, Alexandre, Islane**. Dream team.

Laura et **Alexandra** en tant que collègues et co-membres de l'association des anesthésistes éleveurs de canidés de races primitives du Puy de Dôme vous avez le droit à votre propre paragraphe. La bise à au passage à **Antho, Alex, Maïko** et **Socrate**.

Mes autres co-internes avec qui on s'est bien marrés... **Adrien** le pilote, **Vianney** le brasseur, **JB** la caillette... **Ando, Arthur, Maxime, Marion, Aissa** avec nos armes de destruction massive et nos fusées écoresponsables. **Kévin**, au boulot comme sur League of Legends, ou encore sur nos mobylettes, tu es toujours un partenaire de première classe... et bien-sûr bise à ta princesse **Nadia** du Ch'nord. **Randy, Thomas**, partenaires du semestre de soins les moins intensifs du monde. Et puis **Quentin, Jean-Michel, Antoine, Mathilde, Myrtille**... et j'en passe. Merci de faire passer les journées deux fois plus vite.

Aux réanimateurs du RMC, de la Réanimation adulte, des différents blocs du CHU et du CJP avec qui j'aime tellement travailler. Une mention spéciale pour ceux avec qui venir au boulot devient un véritable plaisir... **Jean-Baptiste, Thomas, Benjamin, Loris, Margaux, Robin, Thierry, Sébastien, Bernard, Lucie, Renaud, Camille, Julien, Nathanaël, Adrien, Dalia, Aurélie**... et mille pardons à ceux que j'oublie là-dedans. Et puis il y a le summum : **Sophie, Julien** et **Maxence** ! (mon stage est validé ?).

Aux nombreux autres anesthésistes et réanimateurs hors CHU avec qui j'ai adoré travailler et qui m'ont fait partager grandement leur expérience et leur savoir, que ce soit au CH du Puy en Velay, à la Clinique de la Chataigneraie (avec notamment le fameux **Dr Blondonnet** !) ou ailleurs.

Aux ASH, Kinés, IADE, AS, IDE, secrétaires, que j'ai eu la chance de croiser dans toutes mes aventures... Je pense qu'il y a très peu de profession où on est amené à rencontrer autant de gens, et donc de découvrir tant de personnalités, d'histoires, de passions, de savoir-faire... Merci donc de m'avoir tant enrichi humainement. Enfin mille mercis à tous ceux qui se sont tant dévoués à mes côtés sur des réanimations de folie, ou encore pendant des inclusions ERECTION... avec une grosse pensée pour ceux qui sont devenus plus que de simples collègues, **Géraud, Camille, Clémence, Tav, Elodie, Cédric, Alexane, Sylvain, Axel**, ... et j'en oublie tant.

Enfin pour finir un remerciement discret aux **chirurgiens** et **internes de chirurgie** qu'on finit par fréquenter plus que nos maîtresses et avec qui on peut parfois bien rigoler, en plus d'accessoirement soigner des gens. Désolé pour ma lourdeur et mes blagues d'outre champ. Promis je ne citerai personne pour que vous n'ayez pas d'ennuis.

TABLE OF CONTENTS

LIST OF TABLES AND FIGURES	14
LIST OF ABBREVIATIONS	15
INTRODUCTION	16
METHODS	17
TRIAL DESIGN	17
STUDY POPULATION	18
PATIENT INSTALLATION	18
POSITIONING	20
MEASUREMENTS	21
CALCULATIONS	22
STATISTICAL ANALYSIS	22
RESULTS	24
BASELINE CHARACTERISTICS OF SUBJECTS	24
SAFETY	25
HEMODYNAMIC ASSESSMENTS	25
VENTILATORY MECHANICS	25
OXYGENATION	26
DISCUSSION	29
CONCLUSION	32
REFERENCES	33
ABSTRACT	36
SERMEN D'HIPPOCRATE	37

LIST OF TABLES AND FIGURES

TABLES

Table I. Characteristics of ARDS Patients	24
Table II. Physiological characteristics according to verticalization steps	27

FIGURES

Figure 1. Diagram of the progressive verticalization procedure.....	19
Figure 2. Physiological values evaluated at each position.....	28

LIST OF ABBREVIATIONS

ARDS	Acute respiratory distress syndrome
BMI	Body mass index
C_{CW}	Chest wall compliance
C_L	Lung compliance
CO	Cardiac output
COPD	Chronic obstructive pulmonary disease
C_{RS}	Compliance of the respiratory system
CT	Computed Tomography
EDV	End-diastolic volume
EELV	End-expiratory lung volume
EELV_{PBW}	End-expiratory lung volume in milliliters per kilogram of predicted body weight
EIT	Electrical impedance tomography
EL_{RS}	Elastance of the respiratory system
FiO₂	Fraction of inspired oxygen
I:E	Inspiratory-to-expiratory time ratio
ICU	Intensive care unit
IQR	Interquartile range
MAP	Mean arterial pressure
PAC	Pulmonary artery catheter
PaCO₂	Partial pressure of arterial carbon dioxide
PaO₂	Partial pressure of arterial oxygen
PAOP	Pulmonary artery occlusion pressure
PAP_m	Mean pulmonary artery pressure
PBW	Predicted body weight
PEEP	Positive end-expiratory pressure
P_{es}	Esophageal pressure
PP	Prone positioning
P_{plat}	Plateau pressure
PVR	Pulmonary vascular resistance
RAP	Right atrial pressure
R_{aw}	Airway resistance
RR	Respiratory rate
SAPS 2	Simplified acute physiology score II
SD	Standard deviation
SFAR	Société Française d'Anesthésie et Réanimation
SvO₂	Oxygen saturation of mixed venous blood
SVR	Systemic vascular resistance
VCO₂	CO ₂ production
V_D/V_T	Pulmonary dead-space fraction
V_T	Tidal volume
ΔP_{es}	Esophageal driving pressure
ΔP_L	Transpulmonary driving pressure
ΔP	Driving pressure

Acute respiratory distress syndrome (ARDS) is a life-threatening form of respiratory failure that became more prevalent than ever with the emergence of the COVID-19 pandemic, leading to a sharp increase in global mortality (1). Multiple therapeutics have been studied and experimented, but few have proven effective. Oxygen supplementation, respiratory support, and patient positioning are the cornerstones of the severe ARDS therapeutic arsenal (2, 3).

Prone positioning (PP) during sessions lasting several hours decreases mortality (4, 5) by acting on different components, such as postero-inferior lung collapse reventilation, lung secretion clearance, abdominal constraint decrease, or perfusion-to-ventilation ratio changes (6, 7). This improves oxygenation, reduces lung stress and strain, and improves prognoses in the most severe cases (4, 5, 8). Indeed, it has proven a clear benefit for patient survival, despite remaining a burdensome procedure associated with potential serious complications such as unplanned extubation, disabling pressure ulcers, arrhythmias, or cardiac arrest (9).

Physiologically, the most suitable position for humans to breathe is the standing, upright position, the position in which bipeds perform most of their high-intensity efforts, thus requiring high cardio-respiratory performance (10). This vertical position should provide the best ventilation-to-perfusion ratio, and the lowest abdominal visceral stress.

Aside from PP, patient verticalization might be effective by lowering lung constraints and reproducing a more physiological vertical station, consequently modifying the distribution of ventilation and perfusion. A previous physiological study found that partial verticalization (combining a 45° head-and-upper-body elevation with lower limbs down at 45°) improved gas exchange and increased end-expiratory lung volume (EELV) in patients with ARDS, compared

to the supine position (strict horizontal position) (11). In another study, 30 to 40% of ARDS patients increased their arterial oxygenation and EELV during a progressive partial body verticalization (from a 15° semi-recumbent position to a 60° seated position), while the compliance of the respiratory system decreased, probably as a result of the increase in abdominal pressure related to body flexion, but lung and chest wall mechanics were not assessed in this study (12).

Recent technological advances in the field of critical care beds, such as the Total Lift Bed™ (VitalGo Systems Inc., Arjo AB, Illinois, USA), now allow the easy positioning of patients in a standing, upright position (up to 90°) without any body flexion. However, the effects of total verticalization (standing upright position) on physiological variables and respiratory mechanics of ventilated ARDS patients remain unknown. We hypothesized that bed verticalization could be performed safely and have beneficial respiratory effects in patients with ARDS. The primary objective of the present study was to investigate the influence of bed position in early ARDS patients on changes in respiratory mechanics, represented by the transpulmonary driving pressure (ΔP_L). The secondary objectives were to evaluate changes in lung and cardiovascular physiology and to assess feasibility and safety.

TRIAL DESIGN

The ERECTION study was a prospective, open label, experimental trial in which each patient was their own control. It was conducted in two intensive care units at CHU Clermont-Ferrand (France). The trial was approved by the French ethics committee (*Comité de Protection des Personnes Ouest IV Nantes*) on July 2, 2019 and the medicine agency (EudraCT

2019-A01006-51). The protocol was registered on ClinicalTrial.gov (NCT04371016). Written informed consent was obtained from a relative of each patient, or through an emergency consent procedure, with a subsequent search for consent to continue to participate. The authors vouch for the accuracy and completeness of the data, and for the fidelity of the trial to the protocol.

STUDY PATIENTS

Adult patients (≥ 18 years old) admitted to participating ICUs with early moderate to severe ARDS (< 12 h and partial pressure of arterial oxygen-to-fraction of inspired oxygen ratio $[PaO_2/FiO_2] < 200$ mmHg) according to the Berlin criteria (13) and receiving invasive controlled mechanical ventilation through an endotracheal tube or a tracheostomy, deep sedation (as reflected by a bispectral index $[BIS^{TM}$, Medtronic, Ireland] value of 30–50), and neuromuscular blockade (to avoid asynchrony, with a train-of-four target of $< 2/4$ at the orbicular site) were eligible. Obese (body mass index $[BMI] \geq 35$ $kg \cdot m^{-2}$) and hemodynamically unstable patients (as defined by an increase of $> 20\%$ in catecholamine requirements in the last hour, despite blood volume optimization to reach a mean arterial pressure target of 65–75 mmHg), were not included.

PATIENT INSTALLATION

A “verticalization team” (composed of an intensive care physician, an intensive care resident, and a nurse) was called each time a patient was deemed eligible by the treating physician. After eligibility and consent were checked, patients were placed on a dedicated bed (Total Lift BedTM, VitalGo Systems Inc., Arjo AB, USA) and secured with three large flexible straps at the knee, pelvis, and medio-thoracic levels. After securing the patient, the bed could

be gradually verticalized from 0° to 90° without body flexion, ensuring a standing upright position (**Figure 1**).

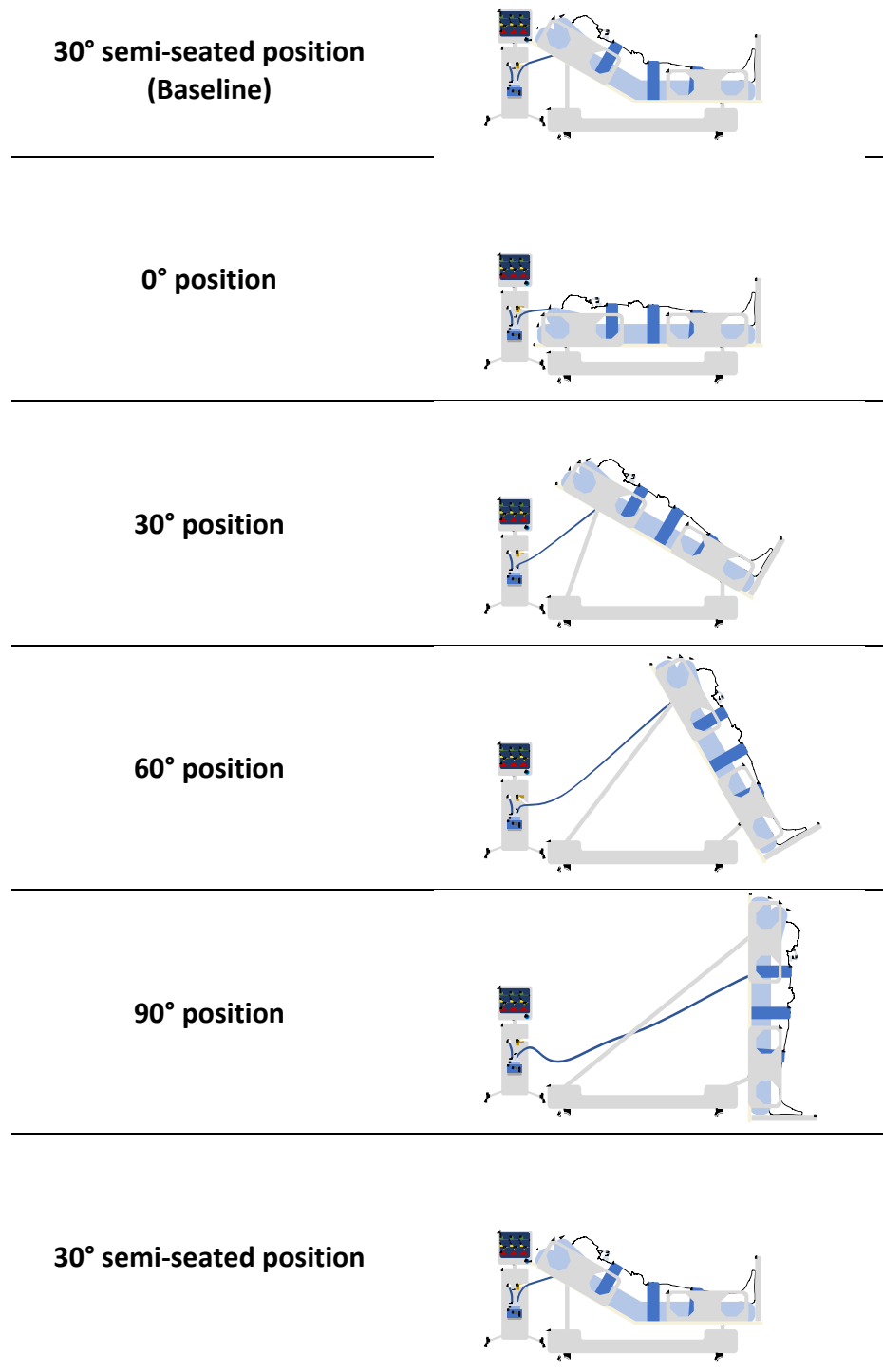


Figure 1. Diagram of the progressive verticalization procedure.

A pulmonary artery catheter (PAC) (Swan-Ganz CCombo V, Edwards Lifescience corporation, USA) was inserted, if not already present, for continuous hemodynamic monitoring. Patients were ventilated using an ICU ventilator allowing EELV measurement by the nitrogen washin/washout method (Engström Carestation™ or CareScape R860™, General Electric Healthcare, USA) (14). Tidal volume was set at 6 mL.kg⁻¹ of predicted body weight (PBW). Positive end-expiratory pressure (PEEP) was titrated after the alveolar recruitment maneuver, with decremental steps, to minimize driving pressure ($\Delta P = P_{\text{plat}} - \text{PEEP}$). An esophageal balloon catheter (Nutrivent™, Sidam, Italy) was inserted at a distance of 35–45 cm from the nostrils and inflated with 4 mL of air, as recommended by the manufacturer, and correct position was confirmed using the Baidur method (15). Electrical impedance tomography (EIT) was also performed (Pulmovista 500™, Dräger™, Germany).

POSITIONING

All patients started the sequence in a 30° semi-seated position (baseline). After 30 minutes, 30-minute-long successive steps at 0°, 30°, 60°, and 90° were performed, allowing progressive bed verticalization without body flexion (strict supine position on the bed). Then, patients were returned to the 30° semi-seated position for 30 minutes (**Figure 1**).

To limit the risk of low blood pressure during verticalization, all patients were continuously monitored using PAC. Fluid optimization was managed based on preload dependency data, defined as an increase of more than 10% in stroke volume after the administration of 250 mL of crystalloids, as recommended by the French Society for Anesthesia and Intensive Care Medicine (SFAR) (16). In a case of hemodynamic instability (defined as an increase of more than 20% in catecholamines doses, despite fluid optimization), the patient was positioned back to the level in the previous step.

MEASUREMENTS

At the end of each 30-minute step, identical complete sets of data were collected, including hemodynamic data with PAC, ventilatory parameters, EELV, esophageal pressures, and arterial blood gases parameters.

Adverse events possibly related to verticalization such as patient fall from the bed, strap-induced skin lesions, accidental removal of catheters, pressure sores, tracheal tube displacement or obstruction, hemodynamic instability (defined as an increase of more than 20% in catecholamine doses, despite fluid optimization), arrhythmia, or cardiac arrest were recorded.

Hemodynamic evaluation was conducted using an arterial line (mean arterial pressure) and a PAC, with continuous measurements of cardiac output, right atrial pressure, end-diastolic volume, mean pulmonary artery pressure, systemic vascular resistance, oxygen saturation of mixed venous blood, and punctual measurements of pulmonary artery occlusion pressure and pulmonary vascular resistance.

Pulmonary mechanics were assessed by collecting or measuring the level of total PEEP (measured during an end-expiratory pause of 5 seconds), expiratory tidal volume (V_T), respiratory rate (RR), plateau pressure (P_{plat} , measured during an end-inspiratory pause of 3 seconds), end-inspiratory and end-expiratory esophageal pressure (P_{es}), and EELV. The estimated pulmonary dead-space fraction (V_D/V_T) was calculated using a rearranged alveolar equation for $PaCO_2$ with modified Harris-Benedict equation to estimate the CO_2 production (VCO_2) (17, 18).

Arterial blood was sampled to assess PaO_2/FiO_2 , $PaCO_2$, arterial pH, serum bicarbonate, and venous blood to evaluate the pulmonary shunt fraction using the Berggren equation (19).

CALCULATIONS

Driving pressure (ΔP) was computed as $P_{\text{plat}} - \text{total PEEP}$. Static compliance of the respiratory system (C_{RS}) was computed as $V_T/\Delta P$. Transpulmonary driving pressure (ΔP_L) was computed as $\Delta P - \Delta P_{\text{es}}$, where ΔP_{es} was the difference between end-inspiratory and end-expiratory P_{es} . Chest wall compliance (C_{CW}) was computed as $V_T/\Delta P_{\text{es}}$ and lung compliance (C_L) as $V_T/\Delta P_L$. Strain was computed as V_T/EELV (20). Mechanical power was computed as $\text{RR} \cdot \{V_T^2 \cdot [1/2 \cdot \text{EL}_{\text{RS}} + \text{RR} \cdot (1 + \text{I:E}) / (60 \cdot \text{I:E}) \cdot R_{\text{aw}}] + V_T \cdot \text{PEEP}\}$, where EL_{RS} was the elastance of the respiratory system, I:E the inspiratory-to-expiratory time ratio, and R_{aw} the airway resistance (21). The estimated V_D/V_T was calculated using a rearranged alveolar equation for PaCO_2 , as $\{1 - ([0.86 \cdot \text{VCO}_2] / [V_T \cdot \text{RR} \cdot \text{PaCO}_2])\} / V_T$.

STATISTICAL ANALYSIS

The primary outcome measure was the variation in transpulmonary driving pressure during verticalization. To demonstrate an effect size of 0.8 in transpulmonary driving pressure between baseline and 0°, 30°, 60°, 90° positions and return to the 30° semi-seated position, the number of required subjects was estimated to be 30 early ARDS patients for a two-sided type I error rate of 2.5% (correction due to multiple comparisons), a statistical power greater than 80%, and an intra-individual correlation coefficient of 0.5 (correlation due to multiple positions evaluated in the same patient).

Categorical data were expressed as numbers and percentages, and continuous data as median and interquartile range [IQR]. The normality was studied by the Shapiro–Wilk test and the homoscedasticity by the Fisher–Snedecor test. All results were compared according to the positions by mixed effects models, with time and patient’s position as variables. A two-sided p-value of less than 0.05 was considered to indicate statistical significance. All analyses were

performed using Prism 8 (GraphPad Software, La Jolla, CA, USA) and Stata version 14 (StataCorp, College Station, TX, USA).

BASELINE CHARACTERISTICS OF SUBJECTS

From March 2020 through January 2021, a total of 30 patients were included in the trial. The main characteristics of the patients upon study enrollment are presented in **Table I**.

Characteristic	All patients (N = 30)	Focal ARDS (n = 15)	Non focal ARDS (n = 15)	COVID-19 ARDS (n = 22)	Non COVID- 19 ARDS (n = 8)
Demographic Characteristics					
Age, years	67 ± 10	70 ± 10	64 ± 9	65 ± 9	73 ± 11
Male sex, n (%)	23 (77)	15 (100)	8 (53)	16 (73)	7 (88)
BMI, kg.m ⁻²	29 ± 5	28 ± 4	29 ± 5	27 ± 5	28 ± 4
Medical respiratory history*, n (%)	8 (27)	5 (33)	3 (20)	4 (18)	4 (50)
SAPS II	43 ± 12	42 ± 15	43 ± 10	40 ± 11	50 ± 14
Length of mechanical ventilation, days	2.6 ± 2.6	1.7 ± 1.8	3.5 ± 3	3.1 ± 2.8	1 ± 0
Focal ARDS†, n (%)	15 (50)	-	-	8 (36)	7 (88)
COVID-19 ARDS, n (%)	22 (73)	8 (53)	14 (93)	-	-
Ventilatory parameters					
PEEP, cmH ₂ O	12 ± 2	13 ± 2	12 ± 2	12 ± 2	12 ± 2
Tidal volume, mL.kg ⁻¹ PBW	6.5 ± 0.6	6.5 ± 0.6	6.4 ± 0.7	6.5 ± 0.7	6.4 ± 0.5
Respiratory rate, min ⁻¹	26 ± 4	26 ± 3	25 ± 5	25 ± 4	26 ± 3
P _{plat} , cmH ₂ O	24 ± 3	23 ± 2	26 ± 3	25 ± 3	24 ± 3
C _{RS} , mL.cmH ₂ O ⁻¹	40 ± 13	48 ± 8	31 ± 12	38 ± 13	44 ± 13
Driving pressure, cmH ₂ O	12 ± 4	10 ± 2	14 ± 4	12 ± 4	11 ± 4
PaO ₂ , mmHg	73 ± 19	73 ± 19	66 ± 12	74 ± 20	73 ± 17
PaO ₂ /FiO ₂ , mmHg	113 ± 34	126 ± 36	101 ± 28	113 ± 36	114 ± 32
PaCO ₂ mmHg	48 ± 11	45 ± 8	51 ± 13	50 ± 12	43 ± 4
FiO ₂ , %	68 ± 16	67 ± 19	68 ± 14	67 ± 12	69 ± 26

Table I. Characteristics of ARDS Patients. Values are reported as mean ± standard deviation (SD) or n (%). *Body mass index (BMI)* is the weight in kilograms divided by the square of the height in meters. *ARDS: acute respiratory distress syndrome. PBW: predicted body weight. SAPS II: simplified acute physiology score II. PEEP: positive end-expiratory pressure. P_{plat}: end-inspiratory plateau pressure. C_{RS}: static compliance of respiratory system. PaO₂: arterial partial pressure of oxygen. FiO₂: fraction of inspired oxygen. PaCO₂: arterial partial pressure of carbon dioxide.*

* Described as history of chronic obstructive pulmonary disease (COPD), asthma, pulmonary emphysema, interstitial lung disease, lung cancer, or severe pneumonia leading to hospitalization

† ARDS phenotype characterization was established by an adjudication committee composed of four ARDS experts examining CT scans realized for each patient at admission in ICU. The phenotype was established when three out of the four experts agreed on the ARDS phenotype.

SAFETY

There were no technical issues regarding the bed or associated equipment during the trial. No serious technical side effects nor adverse events, such as falls, collapses, or body crushing, occurred during the verticalization procedures. No complications, such as unplanned extubation, endo-tracheal tube obstruction, pressure ulcers, arrhythmia, or cardiac arrest, were identified.

HEMODYNAMIC ASSESSMENTS

Mean arterial pressures at each step remained stable throughout the protocol and following the verticalization steps from baseline to the 90° position (76 [71; 80] to 74 [68; 81] mmHg, $P > 0.99$), at the cost of a moderate increase in norepinephrine doses (0.19 [0.07; 0.30] to 0.32 [0.16; 0.77] $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, $P < 0.01$). Cardiac output decreased (6.4 [4.5; 7.6] to 4.8 [3.2; 5.8] $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, $P < 0.01$), as did stroke volume (72 [53; 89] to 48 [31; 65] mL, $P < 0.01$), with no increase in lactatemia (1.3 [1.1; 1.7] to 1.4 [1.2; 2.0] $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, $P < 0.01$) (**Table II**).

Two patients presented hemodynamic instability at 90°, necessitating an interruption of the verticalization procedure. In both cases, norepinephrine doses were $> 1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ at baseline.

VENTILATORY MECHANICS

Transpulmonary driving pressure increased slightly during verticalization (9 [5; 11] vs 10 [7; 14] cmH_2O , baseline vs 90° position, $P < 0.01$). Static compliance of the respiratory system decreased with verticalization (from 41 [27; 50] to 25 [21; 37] $\text{mL}\cdot\text{cmH}_2\text{O}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ from baseline to the 90° position, $P < 0.01$), with a significant decrease in chest wall compliance

(from 117 [95; 178] to 81 [59; 96] mL.cmH₂O⁻¹.kg⁻¹ from baseline to the 90° position, P <0.01), while lung compliance remained stable (from 47 [39; 84] to 43 [30; 63] mL.cmH₂O⁻¹.kg⁻¹ from baseline to the 90° position, P = 0.75).

End-expiratory lung volume, as expressed in milliliters per kilogram of predicted body weight (EELV_{PBW}), increased significantly between baseline and the 30°, 60° or 90° positions, as shown in **Table II**. Strain was significantly lower at 90° (0.19 [0.17; 0.24]), compared to baseline (0.27 [0.19; 0.43], P <0.01, **Figure 2**). Total mechanical power remained stable throughout the protocol (from 37 [31; 42] to 38 [31; 46] J.min⁻¹ from baseline to the 90° position, P = 0.83). Pulmonary dead space remained unchanged following verticalization (from 37% [31; 42] to 38% [31; 46] from baseline to the 90° position, P = 0.83). Unfortunately, the EIT data could not be used, because of a software issue.

OXYGENATION

There was a significant increase in arterial oxygenation, as assessed by PaO₂/FiO₂, during verticalization (from 116 [84; 140] to 136 [113; 186] mmHg from baseline to the 90° position, P <0.01) or in PaCO₂ (from 47 [42; 52] to 51 [42; 60] mmHg from baseline to the 90° position, P <0.01). The pulmonary shunt fraction decreased significantly (from 20% [14; 26] at baseline to 12% [6; 16] in the 90° position, P <0.01) (**Table II**).

	Baseline	0° position	30° position	60° position	90° position	30° semi-seated	P-value
Hemodynamic Status							
MAP, mmHg	76 (71; 80)	80 (74; 84)	75 (71; 79)	71 (68; 78)	74 (68; 81)	80 (74; 89)	>0.99
Heart rate, min ⁻¹	83 (71; 102)	83 (68; 96)	80 (72; 100)	88 (78; 113)	96 (88; 113)	91 (76; 106)	<0.01*
Stroke volume, mL	72 (53; 89)	80 (60; 95)	72 (53; 93)	55 (42; 66)	48 (31; 65)	54 (42; 87)	<0.01*
EDV, mL	151 (128; 220)	150 (132; 209)	166 (118; 222)	157 (112; 202)	150 (101; 183)	150 (120; 196)	0.01*
CO, mL.min ⁻¹	6.4 (4.5; 7.6)	6.5 (4.8; 8.0)	5.3 (4.3; 7.5)	4.9 (3.9; 6.2)	4.8 (3.2; 5.8)	4.5 (3.9; 6.7)	<0.01*
RAP, mmHg	11 (9; 13)	12 (9; 14)	8 (6; 10)	5 (3; 7)	4 (3; 8)	10 (9; 13)	<0.01*
SVR, mmHg.min.mL ⁻¹	812 (654; 1201)	876 (652; 1194)	844 (709; 1249)	1152 (837; 1449)	1235 (898; 1730)	1058 (746; 1741)	<0.01*
SvO ₂ , %	67 (65; 76)	69 (62; 74)	69 (63; 76)	67 (56; 74)	65 (56; 76)	73 (66; 80)	0.27
PAPm, mmHg	28 (25; 30)	29 (26; 30)	27 (25; 29)	27 (24; 28)	26 (22; 29)	29 (22; 31)	0.05
PVR, mmHg.min.mL ⁻¹	193 (143; 294)	181 (143; 266)	211 (161; 323)	271 (226; 402)	287 (241; 429)	250 (178; 309)	<0.01*
PAOP, mmHg	11 (10; 13)	12 (11; 14)	10 (8; 12)	8 (7; 10)	7 (6; 9)	11 (10; 13)	<0.01*
Serum lactate, mmol.L ⁻¹	1.3 (1.1; 1.7)	1.3 (1.1; 1.7)	1.4 (1.2; 1.7)	1.5 (1.2; 1.9)	1.4 (1.2; 2.0)	1.4 (1.1; 1.8)	0.13
Norepinephrine, µg.kg ⁻¹ .min ⁻¹	0.19 (0.07; 0.30)	0.19 (0.07; 0.29)	0.18 (0.10; 0.35)	0.27 (0.15; 0.46)	0.32 (0.16; 0.77)	0.21 (0.13; 0.45)	<0.01*
Respiratory Variables							
PEEP, cmH ₂ O	12 (10; 14)	12 (10; 14)	12 (10; 14)	12 (10; 14)	12 (10; 14)	12 (10; 14)	0.91
Tidal volume, mL.kg ⁻¹ .PBW	6.4 (6.1; 6.8)	6.5 (6.1; 6.8)	6.5 (6.1; 6.9)	6.5 (6.2; 6.8)	6.6 (6.1; 6.9)	6.5 (6.1; 7.0)	0.09
Respiratory rate, min ⁻¹	26 (24; 28)	26 (24; 28)	26 (22; 28)	26 (24; 28)	26 (24; 26)	26 (24; 26)	0.44
P _{plat} , cmH ₂ O	24 (23; 27)	24 (22; 25)	26 (23; 29)	28 (26; 31)	28 (26; 33)	24 (22; 25)	<0.01*
C _{RS} , mL.cmH ₂ O ⁻¹	41 (27; 50)	43 (32; 49)	34 (27; 42)	29 (23; 38)	25 (21; 37)	41 (31; 50)	<0.01*
C _L , mL.cmH ₂ O ⁻¹	47 (39; 84)	56 (43; 71)	53 (36; 80)	39 (32; 74)	43 (30; 63)	59 (44; 108)	0.75
C _{CW} , mL.cmH ₂ O ⁻¹	117 (95; 178)	145 (113; 204)	90 (74; 126)	81 (65; 104)	81 (59; 96)	113 (86; 150)	<0.01*
Driving pressure, cmH ₂ O	11 (9; 14)	11 (9; 13)	13 (10; 16)	14 (12; 19)	15 (12; 20)	11 (9; 13)	<0.01*
ΔP _L , cmH ₂ O	9 (5; 11)	8 (6; 9)	9 (6; 11)	11 (6; 13)	10 (7; 14)	8 (4; 9)	<0.01*
Mechanical power, J.min ⁻¹	37 (31; 42)	35 (29; 38)	37 (29; 43)	38 (34; 44)	38 (31; 46)	35 (31; 43)	0.92
EELV _{PBW} , mL.kg ⁻¹	26 (15; 33)	24 (15; 30)	31 (25; 36)	36 (27; 41)	34 (27; 37)	27 (19; 34)	<0.01*
V _D /V _T , %	37 (31; 42)	35 (29; 38)	37 (29; 43)	38 (34; 44)	38 (31; 46)	35 (31; 43)	0.83
Strain	0.27 (0.19; 0.43)	0.28 (0.22; 0.42)	0.22 (0.16; 0.27)	0.19 (0.15; 0.24)	0.19 (0.17; 0.24)	0.24 (0.20; 0.34)	<0.01*
PaO ₂ , mmHg	69 (62; 81)	61 (57; 73)	78 (69; 95)	81 (69; 101)	84 (68; 105)	73 (70; 87)	0.05
PaO ₂ /FiO ₂ , mmHg	116 (84; 140)	96 (78; 124)	137 (99; 158)	142 (106; 192)	136 (113; 186)	113 (93; 156)	0.02*
PaCO ₂ , mmHg	47 (42; 52)	45 (37; 50)	48 (40; 53)	51 (42; 60)	51 (42; 60)	49 (41; 59)	<0.01*
FiO ₂ , %	65 (54; 80)	65 (54; 80)	65 (54; 80)	60 (50; 73)	60 (50; 75)	70 (50; 90)	0.94
Pulmonary shunt, %	20 (14; 26)	24 (15; 33)	15 (7; 20)	12 (6; 18)	12 (6; 16)	14 (8; 18)	<0.01*
Arterial pH	7.33 (7.29; 7.40)	7.33 (7.28; 7.40)	7.33 (7.29; 7.38)	7.31 (7.25; 7.34)	7.30 (7.22; 7.32)	7.26 (7.31; 7.34)	<0.01*
Serum bicarbonate, mmol.L ⁻¹	26 (20; 30)	26 (21; 29)	26 (20; 31)	26 (19; 29)	25 (19; 28)	25 (22; 29)	<0.01*

Table II. Physiological characteristics of ARDS according to verticalization steps. Data are presented as median [25th–75th percentiles] unless otherwise indicated. Mixed-effects models was used for all criteria and P-value is that comparing baseline and the 90° position. MAP: mean arterial pressure. EDV: end-diastolic volume. CO: cardiac output. RAP: right atrial pressure. SVR: systemic vascular resistance. SvO₂: oxygen saturation of mixed venous blood. PAPm: mean pulmonary artery pressure. PVR: pulmonary vascular resistance. PAOP: pulmonary artery occlusion pressure. PEEP: positive end-expiratory pressure. P_{plat}: end-inspiratory plateau pressure. C_{RS}: static compliance of respiratory system. C_L: lung compliance. C_{CW}: chest wall compliance. ΔP_L: transpulmonary driving pressure. EELV: end-expiratory lung volume. V_D/V_T: pulmonary dead-space fraction. PBW: predicted body weight. PaO₂: arterial partial pressure of oxygen. FiO₂: fraction of inspired oxygen. PaCO₂: arterial partial pressure of carbon dioxide.

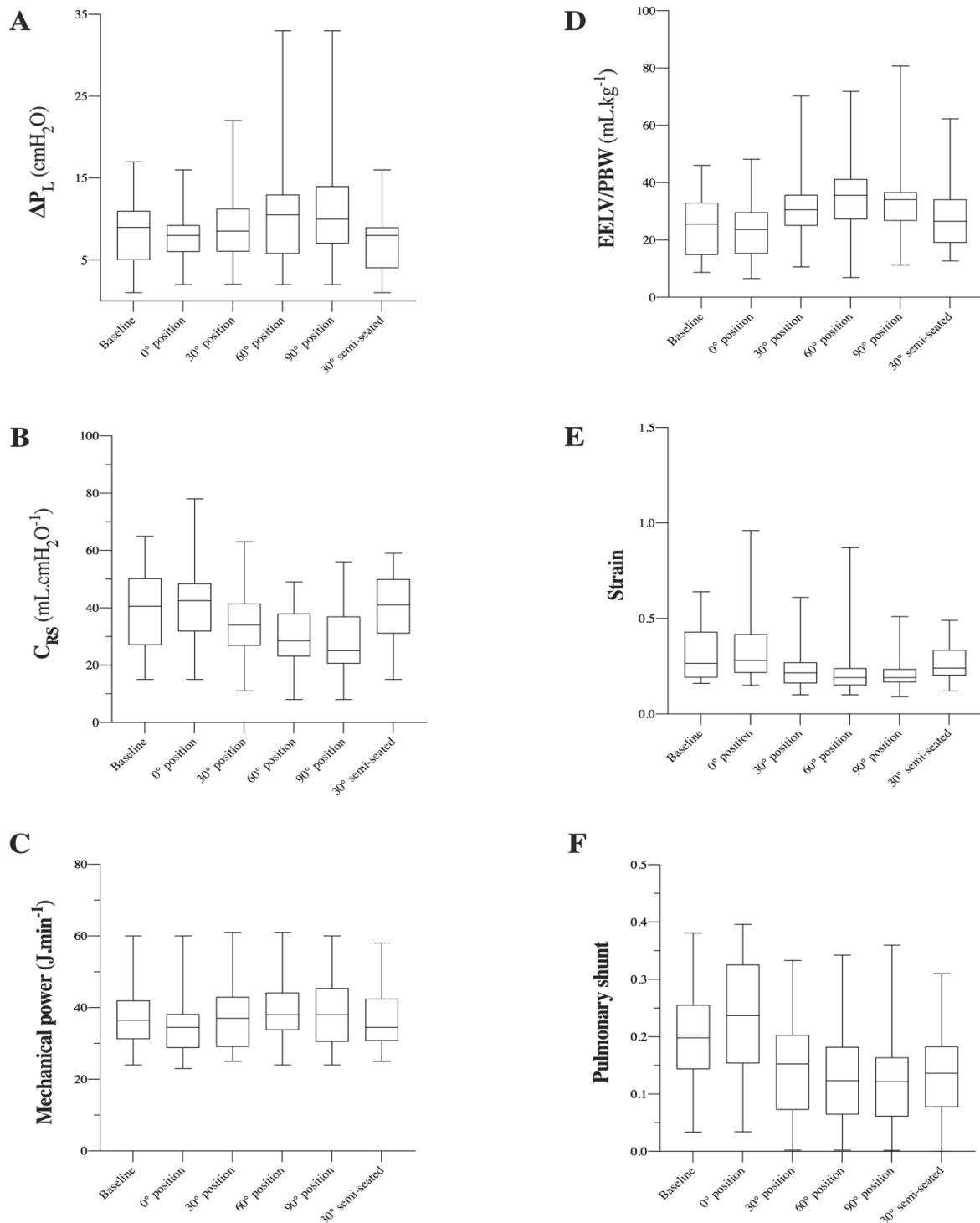


Figure 2. Physiological values evaluated at each position, from baseline (30° semi-seated position) to the standing upright position (90°), and a repositioning to 30° semi-seated. Values are reported as box and whisker plots. **(A)** Transpulmonary driving pressure (ΔP_L), computed as the difference between end-inspiratory and end-expiratory transpulmonary pressures, as measured using an esophageal balloon catheter. **(B)** Static compliance of the respiratory system (C_{RS}). **(C)** Mechanical power in the different study steps. **(D)** End-expiratory lung volume, as expressed in milliliters per kilogram of predicted body weight (EELV_{PBW}). **(E)** Strain, computed as the tidal volume-to-EELV ratio. **(F)** Pulmonary shunt measured using the venous-to-arterial difference in oxygen concentrations. Mixed-effects models were used.

Progressive verticalization to a full, standing upright position has recently been rendered very easy using dedicated beds and support straps to maintain the patient's posture. A single person is needed to perform this procedure. All patients included in the present study were successfully fully verticalized, except for two who presented hemodynamic instability during the last step (90°). No other serious adverse events were noted during the protocol, which is consistent with the literature available to date (11, 12). Although, relative hypovolemia induced by verticalization resulted in a decrease in cardiac output, no major impact on mean arterial pressure and microcirculatory parameters, including SvO₂ and lactatemia, were observed, confirming good hemodynamic tolerance. The present results confirm the feasibility and safety of bed verticalization of mechanically ventilated ICU patients who are deeply sedated and on neuromuscular blocking agents, and might reinforce perspectives for future clinical applications.

Aside from these reassuring data on feasibility and safety, strict verticalization significantly improved EELV, compared to a 30° semi-seated position. Indeed, keeping the legs fully extended may have allowed fewer constraints on the abdomen, with a potential impact on pulmonary strain; this supports a recent report on ventilatory mechanics improvements when the body position is changed from semi-recumbent to supine-flat in COVID-19 ARDS patients (22). Given the remarkable effect of trunk inclination on respiratory mechanics, we believe that reporting the angle of trunk inclination is of extreme importance to obtain a reliable assessment and monitoring the respiratory mechanics of mechanically ventilated patients.

In contrast, the use of a thoracic support strap, deemed essential for the patient's safety, may have induced an unavoidable degree of thoracic constraint and a subsequent decrease in chest wall and respiratory system compliances, without any significant impact on lung compliance or mechanical power. However, we observed a slight but significant increase in transpulmonary driving pressure, which could be due to improper ventilator settings. Indeed, ventilatory parameters remained unchanged throughout whole protocol, despite physiological changes in the respiratory system induced by verticalization. Therefore, inappropriate PEEP or V_T may have been involved. These data highlight the value of reassessing ventilator settings after any mobilization, whether it is PP or verticalization, as in this study. In addition, verticalization is associated with improved distribution of lung perfusion, as evidenced by the decrease in pulmonary shunt. Nevertheless, there were no changes in V_D/V_T , an independent predictive mortality factor (23), during verticalization in our study. In addition to microvascular endothelial injury and microvascular thrombi and derangements in pulmonary blood flow caused by ARDS (23), the lack of decrease in pulmonary dead space may be due to moderate overdistention related to improper ventilator settings. Indeed, an excessive PEEP or too low V_T may be the cause (24, 25). Therefore, the increase in arterial oxygenation following verticalization could be explained by improved pulmonary aeration and optimized distribution of pulmonary perfusion.

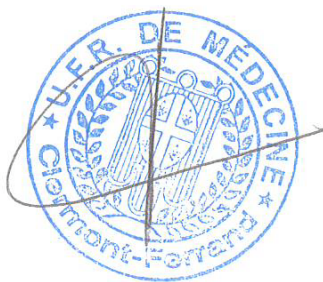
These findings suggest that the greater the angle of verticalization, the greater the benefit for EELV and oxygenation. However, multiparametric improvements were less pronounced between the 60° and the 90° positions, and which position best improves respiratory mechanics and lung function remains uncertain and deserves further investigation. Because this procedure is easy to implement when dedicated beds are available,

a clinical application could be to apply prolonged verticalization, either the same way PP is currently used, or for shorter but repeated periods of time.

The present study has limitations. First, position sequences were not randomized. A potential risk of a cumulative effect of the verticalization steps exists; therefore, the specific and independent effects of each position remain unknown. However, the 30° semi-seated repositioning at the end of the procedure showed an immediate loss of benefits from verticalization, notably regarding EELV. Second, the results might have been minimized due to prior optimization of ventilation parameters and lung aeration, notably with PEEP titration following an alveolar recruitment maneuver. Third, we were unable to use EIT data, which could not be extracted due to software issues. However, although it allows for the regional analysis of lung aeration, this measurement is limited by the 2-dimensional plane of the belt, and the fall of the mediastinum during verticalization can make its interpretation difficult. Results will be reported elsewhere once software issues are resolved. Finally, this study included a majority of COVID-19-associated ARDS patients, so whether our results translate to ARDS from other causes remains uncertain.

This study also has several strengths. First, it is the first to investigate the effects of strict verticalization up to 90°, with legs extended, in ARDS patients. Verticalization procedures have already been proposed, but were limited to the 60° seated position (11, 12), without any evaluation of the transpulmonary driving pressure, pulmonary artery measurements, or pulmonary shunt fraction. Second, our study confirmed the simplicity, feasibility, and safety of verticalizing ICU patients, opening new prospects for future research.

In conclusion, this study suggests that strict verticalization of ARDS patients is both feasible and safe, with an acceptable hemodynamic impact. It appears to improve arterial oxygenation through lung reaeration and regional redistribution of lung perfusion. The placement of a thoracic support strap is mandatory for this procedure and may induce a decrease in the compliance of the respiratory system, albeit the overall impact on pulmonary mechanics seems minimal. This study opens novel perspectives for future research assessing to the potential clinical applications of verticalization.



Le Doyen de l'UFR de Médecine,

Pr Pierre CLAVÉLOU

A handwritten signature in black ink, appearing to read "E. Futier".

Le président du Jury,

Pr Emmanuel FUTIER

1. European Centre for Disease Prevention and Control. Surveillance of COVID-19 in long-term care facilities in the EU/EEA. *ECDC* 2021.
2. Alhazzani W, Møller MH, Arabi YM, Loeb M, Gong MN, Fan E, *et al.* Surviving Sepsis campaign: guidelines on the management of critically ill adults with coronavirus disease 2019 (COVID-19). *Intensive Care Med* 2020;46:854–887.
3. Marini JJ, Gattinoni L. Management of COVID-19 respiratory distress. *JAMA* 2020;323:2329-2330.
4. Guérin C, Reignier J, Richard JC, Beuret P, Gacouin A, Boulain T, *et al.* Prone positioning in severe acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med* 2013;368:2159–2168.
5. Abroug F, Ouanes-Besbes L, Elatrous S, Brochard L. The effect of prone positioning in acute respiratory distress syndrome or acute lung injury: a meta-analysis. Areas of uncertainty and recommendations for research. *Intensive Care Med* 2008;34:1002-1011.
6. Ali HS, Kamble M. Prone positioning in ARDS: physiology, evidence and challenges. *Qatar Med J* 2019;2.
7. Gattinoni L, Caironi P. Prone positioning. *Anesthesiology* 2010;113:1262–1264.
8. Fan E, Del Sorbo L, Goligher EC, Hodgson CL, Munshi L, Walkey AJ, *et al.* An official American Thoracic Society/European Society of Intensive Care Medicine/Society of Critical Care Medicine Clinical Practice Guideline: mechanical ventilation in adult patients with acute respiratory distress syndrome. *Am J Respir Crit Care Med* 2017;195:1253–1263.
9. González-Seguel F, Pinto-Concha JJ, Aranís N, Leppe J. Adverse events of prone positioning in mechanically ventilated adults with ARDS. *Respir Care* 2021;66:1898–1911.
10. Berkemeier QN, Alumbaugh BW, Gillum T, Coburn J, Kim JK, Reeder M, *et al.* Physiological and biomechanical differences between seated and standing uphill cycling. *Int J Exerc Sci*. 2020;13(2):996–1011.

11. Richard JCM, Maggiore SM, Mancebo J, Lemaire F, Jonson B, Brochard L. Effects of vertical positioning on gas exchange and lung volumes in acute respiratory distress syndrome. *Intensive Care Med* 2006;32:1623–1626.
12. Dellamonica J, Lerolle N, Sargentini C, Hubert S, Beduneau G, Di Marco F, *et al.* Effect of different seated positions on lung volume and oxygenation in acute respiratory distress syndrome. *Intensive Care Med* 2013;39:1121–1127.
13. ARDS Definition Task Force, Ranieri VM, Rubenfeld GD, Thompson BT, Ferguson ND, Caldwell E, *et al.* Acute respiratory distress syndrome: the Berlin definition. *JAMA* 2012;307:2526–2533.
14. Chiumello D, Cressoni M, Chierichetti M, Tallarini F, Botticelli M, Berto V, *et al.* Nitrogen washout/washin, helium dilution and computed tomography in the assessment of end expiratory lung volume. *Critical Care* 2008;12:R150.
15. Akoumianaki E, Maggiore SM, Valenza F, Bellani G, Jubran A, Loring SH, *et al.* The application of esophageal pressure measurement in patients with respiratory failure. *Am J Respir Crit Care Med* 2014;189:520–531.
16. Vallet B, Blanloeil Y, Cholley B, Orliaguet G, Pierre S, Tavernier B, *et al.* Guidelines for perioperative haemodynamic optimization. *Ann Fr Anesth Reanim* 2013;32:e151–158.
17. Fenn WO, Rahn H, Otis AB. A theoretical study of the composition of the alveolar air at altitude. *Am J Physiol* 1946;146:637–653.
18. Long CL, Schaffel N, Geiger JW, Schiller WR, Blakemore WS. Metabolic response to injury and illness: estimation of energy and protein needs from indirect calorimetry and nitrogen balance. *JPEN J Parenter Enteral Nutr* 1979;3:452–456.
19. Berggren SM. The oxygen deficit of arterial blood caused by non-ventilating parts of the lung. *Acta Physiologica Scandinavica* 1942;11:4;1–92
20. Chiumello D, Carlesso E, Cadringer P, Caironi P, Valenza F, Polli F, *et al.* Lung stress and strain during mechanical ventilation for acute respiratory distress syndrome. *Am J Respir Crit Care Med* 2008;178:346–355.

21. Gattinoni L, Tonetti T, Cressoni M, Cadringer P, Herrmann P, Moerer O, *et al.* Ventilator-related causes of lung injury: the mechanical power. *Intensive Care Med* 2016;42:1567–1575.
22. Marrazzo F, Spina S, Forlini C, Guarnieri M, Giudici R, Bassi G, *et al.* Effects of trunk inclination on respiratory mechanics in patients with COVID-19-associated acute respiratory distress syndrome: let's always report the angle! *Am J Respir Crit Care Med* 2022;205:582–584.
23. Nuckton TJ, Alonso JA, Kallet RH, Daniel BM, Pittet JF, Eisner MD, *et al.* Pulmonary dead-space fraction as a risk factor for death in the acute respiratory distress syndrome. *N Eng J M* 2002;346:1281–1286.
24. Tusman G, Suarez-Sipmann F, Böhm SH, Pech T, Reissmann H, Meschino G, *et al.* Monitoring dead space during recruitment and PEEP titration in an experimental model. *Intensive Care Med* 2006;32:1863–1871.
25. Kiiski R, Kaitainen S, Karppi R, Takala J. Physiological effects of reduced tidal volume at constant minute ventilation and inspiratory flow rate in acute respiratory distress syndrome. *Intensive Care Med* 1996;22:192–198.

RATIONALE : Patient position, such as prone position, can improve prognoses in acute respiratory distress syndrome. Total verticalization is now possible using dedicated beds, but the effects of the position remain unknown.

OBJECTIVES : To evaluate the physiological effects of bed verticalization on ventilation and hemodynamics in cases of early acute respiratory distress syndrome, and to assess safety and feasibility.

METHODS : Patients were gradually verticalized, using a dedicated bed, from a 30° semi-seated position (baseline) to different levels of inclination (0°, 30°, 60°, and 90°), before returning to the baseline. The duration of each level was 30 minutes, after which hemodynamic and ventilatory parameters, end-expiratory lung volume, transpulmonary pressures, and gas exchange parameters were recorded.

MEASUREMENTS AND MAIN RESULTS : Thirty moderate to severe acute respiratory distress syndrome patients were included; all were successfully verticalized without serious adverse event. Transpulmonary driving pressure increased slightly from baseline to the 90° position (9 [5 ; 11] to 10 [7 ; 14] cmH₂O, P<0,01). Although static compliance of the respiratory system decreased (41 [27 ; 50] to 25 [21 ; 37] mL.cmH₂O⁻¹.kg⁻¹, P<0,01), lung compliance remained stable (47 [39 ; 84] to 43 [30 ; 63] mL.cmH₂O⁻¹.kg⁻¹, P<0,75). End-expiratory lung volume increased (26 [15 ; 33] to 34 [27 ; 37] mL.kg⁻¹ of predicted body weight, P<0,01), thus leading alveolar strain to decrease (0,27 [0,19 ; 0,43] to 0,19 [0,17 ; 0,24], P<0,01). Mechanical power did not change from baseline to the 90° position (37 [31 ; 42] à 38 [31 ; 46] J.min⁻¹, P=0,83). There was a significant increase in arterial oxygenation, as assessed by an increase of PaO₂/FiO₂ ratio (116 [84 ; 140] à 136 [113 ; 186], P<0,01). Mean arterial pressure remained stable, although cardiac output decreased moderately, with no changes in lactatemia or oxygen saturation of mixed venous blood (SvO₂).

CONCLUSIONS : Bed verticalization is feasible, safe, and may improve lung function and respiratory mechanics in patients with acute respiratory distress syndrome. Its effects on clinical outcomes should be investigated further.

SERMENT D'HIPPOCRATE (Conseil national de l'ordre des médecins)

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

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

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

J'informerai les patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences. Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des circonstances pour forcer les consciences.

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

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

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

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

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

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

Louis Bouchant



SERMENT D'HIPPOCRATE

En présence des Maîtres de cette FACULTE et de mes chers CONDISEIPLES, je promets et je jure 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 je n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail. Admis 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 et reconnaissant 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 d'OPPROBRE et méprisé de mes confrères si j'y manque.

Louis Bouchant

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right.

RESUME DE LA THESE

Effets physiologiques et sécurité de la verticalisation de patients en syndrome de détresse respiratoire aiguë

INTRODUCTION : La mobilisation du patient, telle que la mise en décubitus ventral, peut améliorer le devenir de patients souffrant d'un syndrome de détresse respiratoire aiguë (SDRA). La verticalisation complète des patients (station debout) est désormais possible grâce à l'apparition et au développement de dispositifs médicaux dédiés tels que des lits de réanimation spécifiques. Cependant, les effets cliniques et physiologiques d'un tel positionnement sont encore peu connus.

OBJECTIFS : Évaluer la faisabilité et la sécurité de la procédure, et étudier les effets physiologiques de la verticalisation sur la ventilation et l'hémodynamique, chez des patients atteints de SDRA précoce en réanimation.

METHODES : Les patients ont été progressivement verticalisés, au moyen d'un lit dédié, d'une position semi-assise à 30° (position de base) à différents paliers d'inclinaison (0°, 30°, 60° et 90°), avant de revenir à la position de base. La durée de chaque palier était de 30 minutes, aux termes desquelles a été enregistré un ensemble de paramètres hémodynamiques et ventilatoires, ainsi que biologiques.

RESULTATS : Trente patients atteints de SDRA modéré à sévère ont été inclus et ont tous été verticalisés avec succès, sans événement indésirable grave. La pression motrice transpulmonaire a légèrement augmenté entre la position initiale et le palier 90° (9 [5 ; 11] à 10 [7 ; 14] cmH₂O, P<0,01). Bien que la compliance du système respiratoire ait diminué (41 [27 ; 50] à 25 [21 ; 37] mL.cmH₂O⁻¹.kg⁻¹, P<0,01), la compliance pulmonaire est restée stable (47 [39 ; 84] à 43 [30 ; 63] mL.cmH₂O⁻¹.kg⁻¹, P<0,75). Entre la position initiale et le palier 90°, le volume pulmonaire télé-expiratoire a augmenté (26 [15 ; 33] à 34 [27 ; 37] mL.kg⁻¹ de poids idéal théorique, P<0,01), le strain alvéolaire a diminué (0,27 [0,19 ; 0,43] à 0,19 [0,17 ; 0,24], P<0,01), et la puissance mécanique n'a pas changé (37 [31 ; 42] à 38 [31 ; 46] J.min⁻¹, P=0,83). L'hématose s'est améliorée avec une augmentation significative du ratio PaO₂/FiO₂ (116 [84 ; 140] à 136 [113 ; 186], P<0,01). La pression artérielle moyenne est restée stable au fur et à mesure de la verticalisation au prix d'une discrète majoration des posologies de noradrénaline. Bien que le débit cardiaque ait diminué modérément, on ne note pas d'augmentation significative de la lactatémie ou de la saturation en oxygène du sang veineux mêlé (SvO₂), montrant l'absence d'impact sur la perfusion tissulaire.

CONCLUSION : La verticalisation des patients en réanimation est une procédure réalisable, sûre et qui peut potentiellement améliorer la fonction pulmonaire ainsi que la mécanique ventilatoire chez des patients atteints de SDRA. La verticalisation en tant qu'alternative ou complément thérapeutique à la prise en charge des patients atteints de SDRA nécessite cependant de plus amples investigations pour en affirmer l'efficacité clinique.

Mots-clés : Réanimation, Hémodynamique, Syndrome de détresse respiratoire aiguë, Mécanique ventilatoire, Ventilation mécanique, Physiologie respiratoire, Verticalisation, COVID-19

Président du jury : Monsieur FUTIER Emmanuel, Professeur

Membres du jury : Monsieur JABAUDON Matthieu, Professeur
Monsieur GODET Thomas, Docteur

Directeur de thèse : Monsieur AUDARD Jules, Docteur

DATE DE LA SOUTENANCE : 19 octobre 2022, 19h15