

Faculté des sciences de la motricité

L'entraînement des muscles respiratoires à l'aide de dispositifs portables en pédiatrie : une revue narrative

Auteur : Claire Duhautois
Promoteur : Damien Moerman
Année académique 2024-2025
Master en kinésithérapie et réadaptation [60.0] – KINE2M

UCLouvain FSM : Déclaration d'utilisation des aides et outils Intelligence Artificielle (IA)

J'ai utilisé l'IA pour ce projet : ☒ Oui
☐ Non

Si vous avez utilisé l'IA dans ce travail, veuillez préciser comment ci-dessous :

Texte (par exemple, vérification orthographique, génération de texte, production d'idées, ...)

Le cas échéant, veuillez résumer (500 caractères maximum):

Utilisation du site "DeepL Traducteur" pour traduire une définition et certains mots.

Images

Le cas échéant, veuillez résumer (500 caractères maximum):

Code, aide à la programmation, ou algorithmes

Le cas échéant, veuillez résumer (500 caractères maximum):

Autres utilisations

Le cas échéant, veuillez résumer (500 caractères maximum):

Je connais les règles de l'UCLouvain en matière d'intelligence artificielle. Je déclare que toute utilisation d'aides ou d'outils d'intelligence artificielle est explicitement mentionnée dans le présent formulaire de déclaration.

Nom	Duhautois	Prénom	Claire
-----	-----------	--------	--------

Remerciements

A l'issue de ce travail, je souhaite remercier en premier lieu Monsieur Moerman pour son implication, sa disponibilité, sa réactivité et sa bienveillance qui m'ont permis de réaliser ce mémoire dans les meilleures conditions. Je tiens également à remercier l'ensemble de mes proches et tout particulièrement ma mère pour son soutien et son aide.

Claire Duhautois

Table des matières

I. Introduction	1
II. Notions théoriques	3
1. Anatomie des muscles inspiratoires	3
2. Anatomie des muscles expiratoires	4
3. Mécanisme de la respiration	5
4. Mesure de la fonction des muscles respiratoires	6
a) Mesure de la pression maximale	6
b) Mesure de la pression inspiratoire nasale de reniflement	7
c) Mesure du débit de pointe de la toux	8
5. L'entraînement des muscles respiratoires	9
a) Entraînement en force : dispositifs à restriction de flux	10
b) Entraînement en force : dispositifs à seuil de pression	11
c) Entraînement en endurance	12
III. Méthode	13
1. Protocole	13
2. Stratégie de recherche	13
3. Critères PICO(S)	13
4. Critères d'éligibilité	16
5. Sélection des articles	16
IV. Développement	18
1. Asthme	18
2. Mucoviscidose	21
3. Circulation de Fontan	24

4. Maladies neuromusculaires	26
5. Paralysie cérébrale	29
V. Discussion	32
VI. Conclusion	38
VII. Bibliographie	39
VIII. Annexes	47

Abréviations

CPT : Capacité pulmonaire totale

CRF : Capacité résiduelle fonctionnelle

CVF : Capacité vitale forcée

DEP : Débit expiratoire de pointe

DPT : Débit de pointe à la toux

GMFCS : Gross Motor Functional Classification System

Pemax : Pression expiratoire maximale

Pimax : Pression inspiratoire maximale

SpO₂ : Saturation pulsée en oxygène

VEMS : Volume expiré maximal en une seconde

I. Introduction

Depuis quelques années, le traitement proposé aux personnes souffrant de pathologies respiratoires chroniques s'est développé, dont la réadaptation pulmonaire. Celle-ci a été définie par l'« American Thoracic Society » et l'« European Respiratory Society » comme : « Une intervention complète basée sur une évaluation approfondie du patient suivie de thérapies adaptées au patient, incluant, mais sans s'y limiter, l'entraînement par l'exercice, l'éducation, et le changement de comportement, conçus pour améliorer l'état physique et psychologique des personnes atteintes d'une maladie respiratoire chronique et pour promouvoir l'adhésion à long terme à des comportements améliorant la santé.» (Spruit et al., 2013), traduit en [français] à l'aide de l'outil [DeepL traducteur utilisé le 11 février 2025].

La réadaptation pulmonaire propose un réentraînement à l'exercice qui comprend différents types d'entraînement dont l'exercice en endurance, par intervalles, en résistance, la stimulation électrique neuromusculaire et l'entraînement des muscles respiratoires (Spruit et al., 2013). Ce dernier se définit par tout traitement ayant pour but d'augmenter la force et/ ou l'endurance des muscles inspiratoires et/ ou expiratoires (Watson et al., 2022). Il existe différents protocoles pour y parvenir et dans la plupart des études, l'utilisation de dispositifs portables est fréquemment rapportée. Ainsi, il existe différentes méthodes d'entraînement grâce à des appareils portables : en force par le biais de dispositifs à restriction du flux respiratoire ou à seuil de charge en pression et l'entraînement en endurance ou autrement dit en hyperpnée normocapnique. Comme tout entraînement, le protocole se définit également en termes d'intensité, de durée (séries, répétitions et temps) et de fréquence (nombre de séances par semaine). Ainsi en fonction du type d'entraînement, que ce soit en force ou en endurance, les modalités seront différentes (Stanford et al., 2020).

Les bénéfices de la réadaptation pulmonaire ont été clairement démontrés chez les patients adultes atteints de bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) grâce à ses effets sur la dyspnée, la capacité à l'exercice et la qualité de vie (Nici et al., 2006). De plus, l'entraînement des muscles inspiratoires a également démontré des effets positifs sur la BPCO par une amélioration significative de la force et de

l'endurance des muscles respiratoires. Il induit également une diminution clinique significative de la dyspnée et une augmentation du débit inspiratoire de pointe de ces patients. Des améliorations de la distance de marche et de la qualité de vie relative à la santé ont également été rapportées (Spruit et al., 2013). Néanmoins, la réadaptation pulmonaire reste encore peu prescrite pour traiter les troubles ventilatoires au sein de la population pédiatrique (Bhammar et al., 2022).

De plus, les évidences concernant l'effet de l'entraînement des muscles respiratoires dans la population pédiatrique restent assez peu décrites. Hilton et Solis-Moya (2018) évoquent le caractère incertain des effets de l'entraînement des muscles respiratoires concernant les personnes atteintes de la mucoviscidose. Cette lacune est également énoncée par Silva et al. (2019), au sein de la population de patients présentant des maladies neuromusculaires.

En ce qui concerne les protocoles d'entraînement, ils suivent bien souvent le modèle de prescription d'exercice FITT (Fréquence, Intensité, Temps et Type d'exercice). Néanmoins, il n'existe aucune conclusion concernant la nature des composantes du modèle FITT et donc de la dose idéale d'entraînement à prescrire concernant les personnes atteintes de maladies neuromusculaires par exemple (Silva et al., 2019).

L'objectif de cette revue narrative est de déterminer les effets de l'entraînement des muscles respiratoires (à la fois inspiratoires et expiratoires) dans la population pédiatrique. Après le regroupement et l'analyse de la littérature existante à ce sujet, le but de ce mémoire est de déterminer les différents types d'entraînement, de décrire leurs modalités et d'évaluer les bénéfices de l'entraînement des muscles respiratoires en pédiatrie.

II. Notions théoriques

Le système respiratoire est le système permettant la fonction biologique de la respiration à savoir l'entrée d'oxygène dans l'organisme et sa diffusion dans le sang et l'élimination du dioxyde de carbone (CO₂) (Ratnovsky et al., 2008). Il se compose des poumons, de la structure osseuse de la cage thoracique, des centres respiratoires, des muscles inspiratoires et expiratoires ainsi que des nerfs permettant l'innervation de ces derniers (Milic-Emili, 1998, p. 34). Etant donné la nature inerte des poumons, la présence des muscles respiratoires est essentielle pour permettre leur approvisionnement en air (Bhammar et al., 2022).

Les muscles respiratoires sont les muscles squelettiques qui mobilisent la paroi thoracique et permettent la ventilation pulmonaire (De Troyer & Boriek, 2011). Il en existe deux types : les muscles inspiratoires et expiratoires. Le premier groupe se constitue du diaphragme, des muscles intercostaux externes et d'un sous-groupe ayant un rôle accessoire, regroupant les muscles sterno-cléido-mastoïdiens et les muscles scalènes. Le second groupe comprend les muscles intercostaux internes et les muscles abdominaux tels que le muscle grand droit de l'abdomen, les muscles obliques externes et internes et le muscle transverse de l'abdomen (Ratnovsky et al., 2008).

Les muscles inspiratoires permettent l'entrée de l'air à l'intérieur des poumons, par le biais des voies aériennes supérieures grâce à leur fonction d'expansion du thorax. A l'inverse, les muscles expiratoires permettent d'éliminer cet air lorsque les échanges gazeux au niveau des alvéoles se sont produits, grâce à la rétraction du thorax (Ratnovsky et al., 2008).

1. Anatomie des muscles inspiratoires

Le diaphragme est le muscle principal de l'inspiration. Il s'étend depuis le noyau fibreux et s'insère sur les trois premières vertèbres lombaires pour sa portion vertébrale, sur le processus xiphoïde du sternum ainsi que sur la surface interne des six côtes inférieures pour sa partie costale (De Troyer & Boriek, 2011).

Les muscles intercostaux externes s'insèrent depuis les tubercules costaux jusqu'aux jonctions costo-chondrales des côtes sous-jacentes. L'orientation des fibres est oblique vers le bas et ventrale (Milic-Emili, 1998, p. 25).

Les muscles sterno-cléido-mastoïdiens s'étendent depuis le processus mastoïde de l'os temporal et se divisent en deux chefs : le chef sternal qui s'insère sur le manubrium sternal et le chef claviculaire qui s'insère au tiers médian de clavicule (De Troyer & Boriek, 2011).

Les muscles scalènes constituent un groupe de trois muscles qui s'insèrent depuis les processus transverses des cinq dernières vertèbres cervicales jusqu'à la surface supérieure des deux premières côtes (De Troyer & Boriek, 2011).

2. Anatomie des muscles expiratoires

Les muscles intercostaux internes, comparés à la couche externe, possèdent une orientation vers le bas et dorsale. Ainsi ils s'insèrent depuis les jonctions chondro-sternales des côtes sus-jacentes pour s'attacher sur les côtes sous-jacentes (Milic-Emili, 1998, p. 26).

Avec la position la plus superficielle, le muscle grand droit de l'abdomen s'étend depuis le sternum et les cinquièmes, sixièmes et septièmes cartilages costaux pour s'insérer distalement sur le pubis. Le muscle oblique externe s'insère depuis les surfaces externes des huit dernières côtes pour s'attacher distalement sur la crête iliaque, le ligament inguinal ainsi que sur la ligne blanche. Celui-ci recouvre le muscle oblique interne, qui prend ses origines depuis la crête iliaque et le ligament inguinal et s'insère sur la surface antéro-latérale des cartilages des trois dernières côtes ainsi que sur la ligne blanche (Ratnovsky et al., 2008). Enfin, le muscle transverse abdominal est le plus profond de ce groupe musculaire contribuant à l'expiration. Celui-ci recouvre de manière circonférentielle l'abdomen grâce à ses origines sur la surface interne des six dernières côtes, sur le fascia lombaire, sur la crête iliaque, sur le ligament inguinal ainsi que dans la gaine du muscle grand droit de l'abdomen (De Troyer & Boriek, 2011).

3. Mécanisme de la respiration

La respiration est une fonction biologique constituée de deux phases, inspiratoire et expiratoire, et faisant intervenir en fonction des situations différents muscles.

Au repos, ce sont essentiellement les muscles inspiratoires qui sont sollicités tandis que lors d'un effort physique, les muscles expiratoires s'ajoutent pour accomplir la fonction respiratoire (Ratnovsky et al., 2008).

A l'inspiration, c'est majoritairement le diaphragme qui mobilise la paroi thoracique. Lorsque les fibres musculaires du diaphragme se raccourcissent, le dôme diaphragmatique descend dans la cavité abdominale, entraînant un accroissement de la pression abdominale et à l'inverse, une réduction de la pression pleurale. Par ailleurs, il induit également un mouvement de redressement des côtes inférieures et les fait tourner vers l'extérieur à l'inspiration (Milic-Emili, 1998, p. 23).

L'expansion de la paroi thoracique et du poumon, est également permise grâce aux muscles intercostaux externes, qui, grâce à leur orientation, induisent un mouvement de redressement des côtes (De Troyer & Boriek, 2011).

Ce n'est que lorsqu'une augmentation de la capacité pulmonaire totale (CPT) est nécessaire, comme lors d'un exercice physique, que les muscles inspiratoires accessoires sont impliqués lors de l'inspiration (Muñoz-Cofré et al., 2023). Grâce à leurs insertions costales, ces muscles permettent une expansion de la cage thoracique en élevant le sternum ainsi que les côtes (Ratnovsky et al., 2008).

L'expiration se définit par la relaxation des muscles inspiratoires notamment du diaphragme qui reprend sa position initiale en remontant depuis la cavité abdominale (Bhammar et al., 2022). De cette manière, la pression pleurale augmente et à l'inverse, la pression abdominale diminue (Milic-Emili, 1998, p. 31). Les muscles abdominaux ont également une action lors de l'expiration en déplaçant la cage thoracique vers l'intérieur et en diminuant son volume (Milic-Emili, 1998, p. 30). La contribution des muscles abdominaux, et d'une manière moins importante les muscles intercostaux internes, se produit également lors d'un exercice physique. Ainsi, grâce à leurs contractions, l'expiration devient plus brève ce qui la rend plus aisée. Ils permettent également d'assister le diaphragme lors de son ascension depuis la cavité abdominale (Bhammar et al., 2022).

4. Mesure de la fonction des muscles respiratoires

La mesure de la fonction des muscles respiratoires est un élément important dans le diagnostic et le suivi de la faiblesse des muscles respiratoires induite par certaines pathologies (Ratnovsky et al., 2008). Les muscles, de manière générale, exercent leur fonction de développement de force grâce au raccourcissement de leurs fibres (“ATS/ERS Statement on Respiratory Muscle Testing,” 2002). Dès lors, lorsque les muscles respiratoires s’affaiblissent, leur contraction est amoindrie ce qui ne leur permet pas de générer des niveaux de pression et de débit d’air suffisants lors de la respiration (Menzes et al., 2018). Ainsi, la quantification de la force des muscles respiratoires consiste en la mesure de la fluctuation des volumes pulmonaires, du déplacement des structures de la paroi thoracique et de la mesure de pressions. Il existe deux procédures qui permettent de mesurer la pression générée par les muscles respiratoires : la première par le biais de manœuvres volontaires et la seconde grâce à la stimulation du nerf phrénique et donc involontaire (“ATS/ERS Statement on Respiratory Muscle Testing,” 2002).

La prochaine section s’intéresse donc aux types de mesures volontaires majoritairement employés dans les articles inclus dans la partie développement.

a) Mesure de la pression maximale

Afin d’évaluer la force des muscles inspiratoires ou expiratoires, la mesure de la pression buccale maximale inspiratoire ou expiratoire est couramment utilisée. Elle permet d’obtenir les valeurs de pression maximale inspiratoire (P_{imax}) et expiratoire (P_{emax}) (“ATS/ERS Statement on Respiratory Muscle Testing,” 2002).

Le dispositif MicroRPM (Micro Medical/CareFusion, Kent, United Kingdom) est majoritairement utilisé pour la mesure de la force des muscles respiratoires (*Annexes 2 : figure 2*). Il s’agit d’un manomètre portable constitué d’un embout buccal à bride en caoutchouc. Il est muni d’un écran qui permet d’obtenir les valeurs en cmH₂O (Dimitriadis et al., 2011).

Le sujet est installé en position assise et reçoit comme instruction de maintenir fermement ses lèvres autour de l’embout buccal afin d’éviter les fuites lors du test. L’utilisation de pince nez n’est pas obligatoire. De plus, l’ensemble de la procédure

est supervisé par un observateur qualifié afin de s'assurer que les efforts produits par le sujet soient bien maximaux ("ATS/ERS Statement on Respiratory Muscle Testing," 2002).

Le participant est invité à réaliser des efforts inspiratoires et expiratoires maximaux d'une durée minimale de 1,5 secondes afin d'obtenir la valeur à 1 seconde ("ATS/ERS Statement on Respiratory Muscle Testing," 2002). La mesure doit être réalisée à 3 reprises et la valeur de pression maximale fluctuant de moins de 10% est retenue (Laveneziana et al., 2019). Par convention, la Pimax est mesurée en débutant du volume résiduel tandis que la Pemax est mesurée en débutant de la CPT ("ATS/ERS Statement on Respiratory Muscle Testing," 2002).

Chez le sujet pédiatrique, il existe quelques notions à prendre en compte lors de la mesure. En effet, étant donné la nature volontaire de cette procédure, il est difficile d'obtenir des valeurs fiables et reproductibles auprès d'un jeune enfant. Les auteurs concluent donc que si 3 efforts maximaux ont été fournis, alors les valeurs maximales sont obtenues. Afin d'obtenir deux valeurs maximales reproductibles, il est également conseillé d'effectuer au minimum 5 mesures. En outre, en fonction du type de pathologies, le nombre minimal d'essais n'a pas été validé chez l'enfant (Fauroux & Aubertin, 2007).

b) Mesure de la pression inspiratoire nasale de reniflement

L'évaluation de la force des muscles inspiratoires s'effectue également par le biais de la mesure de la pression inspiratoire nasale lors du reniflement. En effet, le reniflement est permis grâce à la contraction du diaphragme et plus généralement, des muscles inspiratoires ("ATS/ERS Statement on Respiratory Muscle Testing," 2002).

Cette mesure est permise grâce à l'introduction d'un cathéter à ballonnet relié à un transmetteur de pression dans la narine, ou grâce à des capteurs directement fixés au cathéter. Afin d'obstruer correctement la narine, différentes méthodes existent tels que les bouchons en caoutchouc ou l'utilisation de mousse. Le sujet renifle par la narine qui est non obstruée et le cathéter de la narine controlatérale enregistre la pression inspiratoire nasale de reniflement ("ATS/ERS Statement on Respiratory Muscle Testing," 2002). Cette mesure est également effectuée grâce au dispositif

MicroRPM (Micro Medical/CareFusion, Kent, United Kingdom) (*Annexes 2 : figure 2*).

Le sujet est assis ou allongé et est invité à effectuer des reniflements maximaux, en débutant à partir de la capacité résiduelle fonctionnelle (CRF), avec une période de pause entre les tentatives. Pour la plupart des sujets, les valeurs maximales se stabilisent après 5 à 10 essais (“ATS/ERS Statement on Respiratory Muscle Testing,” 2002).

Comparée à la mesure de la Pimax, elle semble plus aisée à réaliser selon les sujets notamment chez les enfants. En effet, elle paraît plus naturelle et plus courte à réaliser, car elle ne nécessite pas de maintenir la pression pendant une certaine durée (Fauroux & Aubertin, 2007).

c) Mesure du débit de pointe de la toux

La mesure du débit de pointe de la toux (DPT) permet d'évaluer spécifiquement la force des muscles expiratoires (“ATS/ERS Statement on Respiratory Muscle Testing,” 2002). Pour rappel, la toux est un processus physiologique de défense, constitué de trois phases successives. La première phase est la phase de réception, où un signal est transmis au niveau central via le nerf vague en raison de l'activation des récepteurs de la toux. La seconde est la phase inspiratoire qui se définit par une inhalation rapide induite par une importante ouverture de la glotte. La troisième est la phase compressive liée à la fermeture de la glotte et s'accompagnant de la contraction des muscles abdominaux. Ce processus se termine par la phase expiratoire où l'air est relâché de manière abrupte depuis les poumons par la réouverture de la glotte (Andrani et al., 2019).

La toux est alors le témoin de la force des muscles expiratoires qui contribuent majoritairement à la phase compressive de celle-ci. Toutefois, le rôle des muscles inspiratoires dans le mécanisme de la toux est également important. En effet, la toux nécessite un volume pulmonaire correspondant à environ 50% de la capacité vitale. Ainsi la faiblesse des muscles inspiratoires est également une cause de la diminution de la valeur du DPT (Brennan et al., 2022).

Afin de procéder à cette mesure, les spiromètres et les débitmètres de pointe sont communément utilisés pour des raisons financières, de reproductibilité des mesures et d'accessibilité. Lors de la mesure, le sujet est assis et effectue 3 à 6 toux maximales après une inspiration complète. A l'issue de la procédure, une valeur en litres par minute ou en litres par seconde est recueillie. Néanmoins, il persiste un manque de standardisation concernant la procédure d'évaluation de la toux selon l'« European Respiratory Society Task Force » (Brennan et al., 2022).

5. L'entraînement des muscles respiratoires

L'entraînement des muscles respiratoires semble être une intervention permettant d'aboutir à une meilleure fonction de ces muscles. Il consiste en la prescription d'exercices respiratoires répétés contre une résistance externe. En effet, pour obtenir un bénéfice de cette thérapie et donc induire des adaptations, les fibres musculaires doivent contrer une charge à laquelle ils ne sont pas ordinairement confrontés. Cette résistance est fournie grâce à des dispositifs portables qui induisent une charge lors de la respiration permettant un entraînement en force avec une charge importante et peu de répétitions ou inversement avec un entraînement en endurance (Menzes et al., 2018). Les autres modalités de cet entraînement doivent également être définies telles que sa durée (nombre de répétitions, de séries et la durée totale), sa fréquence (nombre de séances par semaine) et son intensité. De même, il est possible de choisir entre un entraînement continu ou par intervalles. Enfin, l'entraînement en force peut s'effectuer de manière indépendante ou sous le contrôle d'un thérapeute expérimenté (Stanford et al., 2020).

Ainsi, il existe deux catégories d'entraînement par le biais de dispositifs portables : en force ou en endurance. L'entraînement en force se définit par l'application d'une résistance lors de la respiration soit par restriction du flux respiratoire, soit par l'application d'un seuil de pression (Stanford et al., 2020). L'entraînement en endurance se définit par un protocole où le sujet est invité à ventiler à un haut pourcentage de sa ventilation volontaire maximale pendant une durée déterminée. Ce type d'entraînement se distingue du précédent par le fait qu'il cible plus particulièrement l'endurance des muscles respiratoires grâce à des respirations profondes et accélérées. De plus, il permet l'entraînement des muscles inspiratoires et expiratoires de manière simultanée contrairement à l'entraînement en force

(Stanford et al., 2020). Dans la prochaine section, les aspects techniques des différents dispositifs seront détaillés. La liste des dispositifs cités ci-dessous n'est pas exhaustive et reprend ceux ayant été employés dans les études qui seront abordées dans la section développement.

a) Entraînement en force : dispositifs à restriction de flux

Ce type de dispositif se définit par la restriction du flux respiratoire permis par la modulation du diamètre de l'orifice par lequel le sujet respire. Ainsi, à mesure que le diamètre de l'orifice diminue, la résistance à la respiration augmente (Bhammar et al., 2022).

Les dispositifs de la gamme POWERbreathe K-Series (POWERbreathe International Ltd., Southam, ENG, UK) font partie de cette catégorie d'appareils (*Annexes 3 : figure 3*). Ce dispositif induit une résistance à l'inspiration grâce à un mécanisme de valve électronique (Menzes et al., 2018). Ainsi, le diamètre de l'orifice est déterminé électroniquement par l'utilisateur (Bhammar et al., 2022). La résistance peut être ajustée selon une gamme allant de 10 à 240 cmH₂O. Il possède plusieurs avantages notamment la présence d'un feedback en temps réel lors de l'entraînement. Il permet également de garder en mémoire les historiques des entraînements. La batterie permet une durée d'utilisation d'environ 60 minutes. Néanmoins, son utilisation s'adresse plutôt à des institutions spécialisées en raison de son coût important (entre 275 et 550 euros) (Menzes et al., 2018). En outre, ce coût peut augmenter davantage par l'utilisation des modèles POWERbreathe K4 et K5. En effet, ceux-ci nécessitent un support informatique afin de pouvoir utiliser le logiciel Breathe-Link, qui procure un feedback au participant durant l'entraînement (Bhammar et al., 2022).

b) Entraînement en force : dispositifs à seuil de pression

Les dispositifs à seuil de pression se constituent d'un mécanisme de valve à ressort qui ne s'ouvre que lorsque l'effort respiratoire est suffisant. Cela permet notamment d'induire une charge quantifiable qui reste indépendante du débit respiratoire (Bhammar et al., 2022). Cette charge se définit par un pourcentage de la Pimax ou de la Pemax (Stanford et al., 2020).

Parmi cette catégorie d'appareils, les dispositifs POWERbreathe (POWERbreathe International Ltd., Southam, ENG, UK) se divisent en plusieurs catégories : POWERbreathe classic et POWERbreathe plus (*Annexes 3 : figure 4 et 5*). Ces dispositifs fournissent des charges de pression allant de 17 à 274 cmH₂O. Le dispositif POWERbreathe medic fait également partie de cette gamme de dispositif à seuil de pression et propose 9 niveaux de résistance pouvant aller jusqu'à 90 cmH₂O pour la résistance maximale (*Annexes 3 : figure 6*) (Neidenbach et al., 2023). Ces dispositifs sont munis d'un embout buccal souple ce qui les rend faciles à utiliser et plus étanches lors de la respiration. Un autre avantage est qu'ils sont faciles d'utilisation et restent relativement peu coûteux (environ 37 euros). Néanmoins, ils ne concernent que l'entraînement des muscles inspiratoires (Menzes et al., 2018).

Le Threshold IMT (Respironics Inc., Murrysville, PA, USA) est également un appareil fournissant une charge constante lors de l'inspiration des participants (*Annexes 3 : figure 7*). La résistance applicable de ce dispositif s'étend de 9 à 41 cmH₂O, et peut être augmentée par intervalle de 2 cmH₂O. Ce dispositif, tout comme le précédent, reste assez peu coûteux (environ 28 euros). Néanmoins, son étanchéité lors des entraînements peut être compromise en raison de l'embout buccal qui reste assez rigide et pouvant engendrer des fuites. De plus, il permet un entraînement avec une gamme de résistance assez faible ce qui pourrait compromettre l'exécution de programmes d'entraînement adéquats (Menzes et al., 2018).

Comparé au Threshold IMT (Respironics Inc., Murrysville, PA, USA), l'appareil Threshold PEP (Respironics Inc., Murrysville, PA, USA) a été conçu spécifiquement pour l'entraînement des muscles expiratoires (*Annexes 3 : figure 8*). Il possède le même mécanisme que son homologue inspiratoire, et la résistance qu'il induit s'étend de 5 à 20 cmH₂O. Néanmoins, quelques limitations concernant

cet appareil restent à prendre en compte : son embout buccal reste trop rigide et sa résistance d'entraînement est assez faible (Menzes et al., 2018).

c) Entraînement en endurance

L'entraînement en endurance se définit par l'exécution d'hyperventilations par le sujet pendant une durée de 30 minutes (Bhammar et al., 2022). A l'instar de l'entraînement en force, l'intensité est définie par le pourcentage de ventilation par minute (Stanford et al., 2020). La fréquence d'entraînement est généralement prescrite avec une fréquence de 3 à 5 fois par semaine à un seuil de 60 à 90 % de la ventilation volontaire maximale. Pour réaliser ce type d'exercice, la présence d'un espace mort ou l'apport d'oxygène est nécessaire afin de prévenir l'hypoxémie et de maintenir le taux de CO₂ dans le sang (Bhammar et al., 2022).

Ainsi, le SpiroTiger (Idag AG, Volketswill, ZH, CHE) a été développé spécifiquement pour l'entraînement en endurance (*Annexes 3 : figure 9*). Ce dispositif se compose d'un ensemble portable constitué d'un embout buccal, relié à un ballon en silicone ou sac de recirculation par le biais d'un tuyau. Comme mentionné précédemment, les hyperventilations peuvent induire une hypocapnie. Pour éviter ce phénomène, à l'expiration, la valve s'ouvre et le sac de recirculation se remplit de l'air expiré riche en CO₂. La valve finit par se fermer à la fin de l'expiration. A l'inspiration, dans un premier temps, le sac se vide de cet air qui retourne dans le circuit et dans un second temps, une autre valve s'ouvre pour laisser entrer dans le circuit de l'air ambiant. Enfin, pour contrôler la vitesse et la profondeur de la respiration, cette unité portable est connectée à un appareil de monitoring muni d'un écran (Sartori et al., 2008).

Le participant est alors invité à se munir de l'embout buccal et à respirer à l'intérieur du dispositif tout en portant attention à l'écran de monitoring. L'avantage de cet appareil est qu'il procure à l'utilisateur un feedback visuel mais aussi auditif afin de maintenir le taux de CO₂ dans le sang. Cependant, son coût reste assez élevé (environ 640 euros) (Menzes et al., 2018).

III. Méthode :

1. Protocole :

L'échelle SANRA (Scale for the Assessment of Narrative Review Articles) a été utilisée afin de mener cette revue narrative. Celle-ci comprend 6 items (justification de l'importance de la revue narrative pour le lectorat, énoncé d'objectifs concrets ou formulation de questions, description de la recherche documentaire, référencement, raisonnement scientifique et présentation appropriée des données) qui ont servi de support méthodologique pour la rédaction de ce travail.

2. Stratégie de recherche :

Après la conception de la question de recherche, celle-ci a été convertie à l'aide des critères PICO(S). Cela a permis de trouver les mots clés permettant de répondre à la question : « Quels sont les effets de l'entraînement des muscles respiratoires en pédiatrie ? ». Ces mots clés ont été ensuite articulés entre eux grâce aux opérateurs booléens « AND » et « OR », et ont permis d'obtenir les équations de recherche (*Annexes 1*). Ces équations ont ensuite été introduites dans les bases de données Embase, Pubmed et Cochrane Library. Afin de procéder à un premier tri sur base des dates de publication, un filtre allant de l'année 2014 à 2024 a été appliqué avant l'extraction des articles des bases de données.

3. Critères PICO(S) :

Critères PICO(S)	Français	Anglais
« Population »	Enfants du nouveau-né à l'adolescent (jusque 18 ans)	child, children, adolescent, teenager
« Intervention »	Entraînement des muscles inspiratoires Entraînement des muscles expiratoires	Inspiratory muscle training Expiratory muscle training

	Entraînement des muscles respiratoires	Respiratory muscle training
	Appareil d'exercice de la respiration : « Dhd cliniflo », « Frolov device », « Frolovs device », « Powerbreathe, k1, k2, k3, k4, k5, classic, plus », « Threshold IMT », « Treshold PEP »	Respiratory exerciser: Dhd cliniflo, Frolov device, Frolovs device, Powerbreathe (k1, k2, k3, k4, k5, classic, plus), Threshold IMT, Threshold PEP
	Entraîneur respiratoire	Breathing exerciser Respiratory trainer
	Exercice respiratoire	Breathing exercise Respiratory exercise
	Thérapie respiratoire	Breathing therapy
	Entraînement de la force des muscles inspiratoires	Inspiratory muscle strength training
	Entraînement de la force des muscles expiratoires	Expiratory muscle strength training
	Chargement inspiratoire	Inspiratory loading
	Chargement expiratoire	Expiratory loading
	Entraîneur musculaire inspiratoire	Inspiratory muscle trainer
	Entraîneur musculaire expiratoire	Expiratory muscle trainer
	Entraîneur musculaire respiratoire	Respiratory muscle trainer
	Dispositif de restriction inspiratoire	Inspiratory restriction device
	Entraînement à l'inspiration	Inspiratory training
	Entraînement à l'expiration	Expiratory training

	Charge résistive inspiratoire Charge résistive expiratoire Entraînement des muscles respiratoires en résistance Entraînement de la force musculaire respiratoire Entraînement à l'endurance des muscles respiratoires Entraînement au seuil IMT Inspiratoire Expiratoire Muscle Entraîner Force	Inspiratory resistive loading Expiratory resistive loading Resistance respiratory muscle training Respiratory muscle strength training Respiratory muscle endurance training Threshold training IMT (Inspiratory Muscle Training) Inspiratory Expiratory Muscle Train Strength
« Comparateur »	Aucun comparateur n'a été pris en compte	/
« Outcome »	/	/
« Study design »	/	/

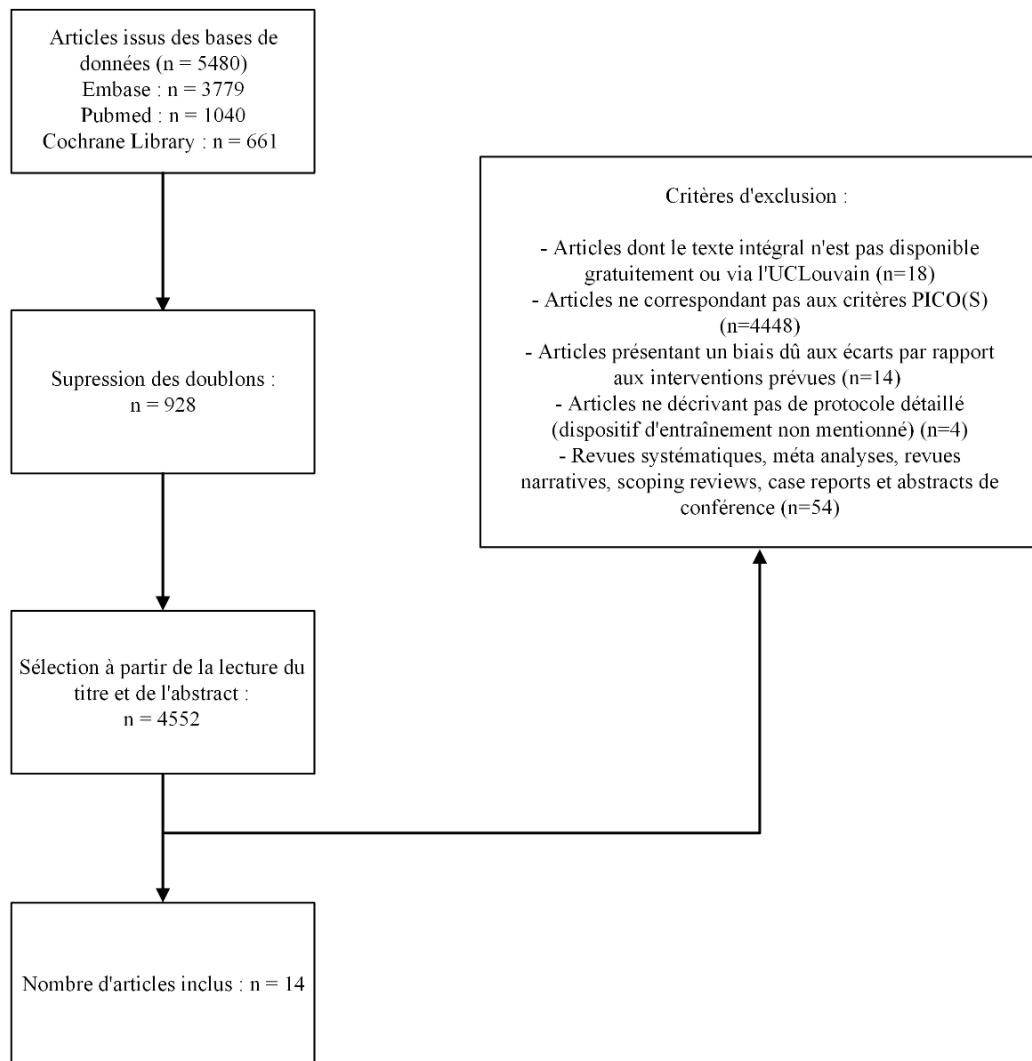
4. Critères d'éligibilité :

Critères d'inclusion	Critères d'exclusion
- Articles rédigés en anglais ou en français - Articles datant de moins de 10 ans (date de publication $\geq$ 2014) - Etudes réalisées sur des sujets pédiatriques (âge < 18 ans)	- Articles dont le texte intégral n'est pas disponible gratuitement ou via l'UCLouvain - Articles ne correspondant pas aux critères PICO(S) - Articles présentant un biais dû aux écarts par rapport aux interventions prévues - Articles ne décrivant pas de protocole détaillé (dispositif d'entraînement non mentionné) - Revues systématiques, méta analyses, revues narratives, scoping reviews, case reports et abstracts de conférence

5. Sélection des articles :

Le nombre d'articles obtenus dans les différentes bases de données était : Embase n = 3779 ; Pubmed = 1040 ; Cochrane Library n = 661. Après l'élimination des doublons et la sélection des articles sur base de la lecture du titre et de l'abstract et en utilisant les critères d'éligibilité, 14 articles ont été inclus dans ce mémoire.

Figure 1 : diagramme de flux



IV. Développement

La respiration est la fonction biologique qui est permise par le système respiratoire et plus précisément par les muscles respiratoires. Lorsque ces muscles s'affaiblissent, leur contraction est amoindrie ce qui ne leur permet pas de générer des niveaux de pression et des débits d'air suffisants lors de la respiration (Menzes et al., 2018). Cette incapacité peut résulter de l'apparition de certaines pathologies.

Dans les prochains chapitres, les effets de l'entraînement des muscles respiratoires dans l'asthme, la mucoviscidose, la circulation de Fontan, les maladies neuromusculaires et la paralysie cérébrale seront décrits.

1. Asthme

L'asthme est une pathologie respiratoire obstructive. Elle se caractérise par une résistance accrue des voies aériennes, une hyperinflation pulmonaire et une augmentation de la fréquence respiratoire. Ces phénomènes expliquent l'augmentation du travail des muscles respiratoires lors de la respiration. En effet, les muscles respiratoires sont aptes à générer une force maximale si leur longueur est optimale (Ratnovsky et al., 2008). Or en raison de l'augmentation des résistances au débit respiratoire, l'air s'accumule créant ainsi une hyperinflation. Par conséquent, la forme du diaphragme est altérée en raison de la modification de la configuration de la cage thoracique. Les muscles respiratoires doivent alors générer des efforts contractiles plus importants que la normale pour pouvoir effectuer leur fonction impliquant une demande énergétique à la respiration plus importante (Elnaggar et al., 2022). Ce phénomène s'accroît d'autant plus lorsque la demande ventilatoire s'intensifie notamment lors d'un exercice physique conduisant ainsi à une fatigue de ces muscles (Ratnovsky et al., 2008).

A. Analyse des résultats

L'ensemble des résultats sont présentés en annexes 4 (tableau1).

Les entraînements proposés concernaient essentiellement les muscles inspiratoires avec un objectif de renforcement. Seuls Elnaggar et al. (2022) évaluaient l'effet de l'entraînement des muscles inspiratoires et expiratoires dans le même cycle respiratoire. Pour cela, les dispositifs Threshold IMT et EMT étaient reliés ensemble par un tube contenant une valve unidirectionnelle à ressort. Dans les autres études, le dispositif utilisé était le Threshold IMT. L'intensité variait de 30 à 55% de la Pimax et pour l'entraînement expiratoire de 10 à 35% de la Pemax. Les séances duraient entre 20 et 40 minutes chacune avec une fréquence de 2 à 7 fois par semaine ainsi qu'une durée totale d'entraînement variant de 5 à 12 semaines.

Les résultats de 3 études ont démontré que l'entraînement des muscles inspiratoires (et expiratoires sur le même cycle respiratoire) améliorait significativement les valeurs de la Pimax et Pemax (cmH₂O et %) par rapport au groupe contrôle. Dans l'étude de David et al. (2018), le groupe intervention a montré une amélioration significative des valeurs de la Pimax et de la Pemax (cmH₂O).

Concernant l'effet de l'entraînement des muscles inspiratoires sur la fonction pulmonaire, uniquement les deux études menées par Elnaggar RK démontraient une amélioration significative de toutes les valeurs de la spirométrie par rapport aux groupes contrôle à savoir les valeurs du volume expiratoire maximal en une seconde (VEMS) (% prédit), de la capacité vitale forcée (CVF) (% prédit) et du rapport VEMS/CVF. En outre, l'étude de Gokcek et al. (2023) a montré une différence significative entre les deux groupes uniquement des valeurs du rapport VEMS/CVF.

Le contrôle de l'asthme s'est également significativement amélioré par rapport aux groupes contrôle dans les deux études d'Elnaggar RK avec une amélioration du score au « Asthma control test » (ACT). Dans l'étude de David et al. (2018), une différence clinique importante au « Asthma Control Questionnaire » (ACQ6) a été rapportée et ce, dans tous les groupes.

L'étude de David et al. (2018), est la seule étude permettant de connaître les effets de l'entraînement des muscles inspiratoires sur l'inflammation pulmonaire et sur le phénomène de bronchoconstriction à l'exercice. Les valeurs de fraction expirée d'oxyde nitrique (FeNO), témoins de l'inflammation pulmonaire, n'ont pas été significativement modifiées au sein du groupe intervention après l'entraînement inspiratoire. Pour évaluer l'effet de l'intervention sur l'apparition d'un bronchospasme à l'exercice, les valeurs du VEMS ont été enregistrées lors du test de bronchoconstriction induit par l'exercice. Il s'agit d'un test où le sujet est invité à courir sur un tapis de course pendant une durée de 6 à 8 minutes et d'enregistrer les valeurs du VEMS à 10, 15, 20 et 25 minutes après la fin de celui-ci (David et al., 2018). Aucun changement significatif des valeurs du VEMS n'a été démontré dans le groupe intervention contrairement aux autres groupes de l'étude.

L'étude de Gokcek et al. (2023) était la seule à investiguer l'effet de cette thérapie sur les marqueurs inflammatoires. Elle démontrait une amélioration significative des valeurs de TAS (Total antioxydant state), TOS (Total oxidant state), OSI (Oxydative stress index), TGF- β (Transforming growth factor- β) et de périostine après 6 semaines d'entraînement des muscles inspiratoires. Néanmoins, aucune différence significative par rapport au groupe contrôle n'a été observée après intervention.

En conclusion, sur base de ces quatre études, l'entraînement en force des muscles respiratoires chez les patients asthmatiques, semble être efficace pour améliorer la force des muscles respiratoires, le contrôle de l'asthme et les valeurs spirométriques du VEMS, de la CVF et du rapport VEMS/ CVF.

2. Mucoviscidose

La mucoviscidose est également une pathologie respiratoire obstructive d'origine génétique autosomique récessive. Ce sont les mutations du gène régulateur de la conductance membranaire (CFTR) qui sont à l'origine de cette pathologie, affectant majoritairement les poumons et le système digestif. Ce gène joue un rôle majeur dans le transport des électrolytes (ions sodium et chlore) dans les cellules épithéliales des poumons, jusqu'aux organes du système digestif comme le pancréas, la vésicule biliaire, les intestins ou encore dans d'autres glandes exocrines (Fonseca et al., 2020).

Il en résulte alors une hyperviscosité du mucus respiratoire, et une diminution de la clairance mucociliaire induisant des épisodes d'infection ou d'inflammation respiratoire (Fonseca et al., 2020). Les efforts pour respirer deviennent alors plus importants, et les échanges gazeux diminuent en raison du mucus qui adhère aux parois des voies aériennes. C'est alors également une cause d'insuffisance respiratoire et d'intolérance à l'effort (Cai et al., 2024). Les épisodes d'infections respiratoires sont aussi responsables d'une altération de l'épithélium pulmonaire conduisant à une atteinte de la fonction pulmonaire (Stanford et al., 2020).

A. Analyse des résultats

L'ensemble des résultats sont présentés en annexes 4 (tableau 2).

Les protocoles proposés par ces différentes études étaient tous différents. Deux études proposaient un entraînement en force, l'un ciblant les muscles inspiratoires dans l'étude de Zeren et al. (2019), l'autre ciblant les muscles expiratoires dans l'étude de Emirza et al. (2021). La troisième étude a étudié l'effet d'un entraînement en endurance. Les dispositifs à seuil de pression, Threshold IMT et PEP, ont alors été respectivement employés pour les entraînements inspiratoires et expiratoires. Bieli et al. (2017) ont utilisé le dispositif SpiroTiger. L'intensité proposée par les auteurs pour l'entraînement en force, était de 30% de la Pimax et de la Pemax. L'intensité proposée dans l'étude de Bieli et al. (2017) n'a pas été déterminée de manière précise mais en fonction de la ventilation volontaire maximale et de la CVF de l'enfant. La durée des séances s'étendait de 5 à 20 minutes avec une fréquence

de 2 fois par jour et de 5 à 7 fois par semaine. La durée totale de l'entraînement variait de 6 à 8 semaines.

L'entraînement en force des muscles respiratoires a permis une amélioration significative des valeurs de la Pimax et Pemax dans les études de Zeren et al. (2019) et de Emirza et al. (2021). Une amélioration significativement plus importante de la Pimax (cmH₂O) dans l'étude de Zeren et al. (2019) et de la Pemax (% prédit et cmH₂O) dans l'étude de Emirza et al. (2021), a été observée par rapport aux groupes contrôle.

Concernant les valeurs spirométriques, aucune des études n'a montré de résultats significatifs par rapport aux groupes contrôle. En revanche, l'entraînement des muscles expiratoires a permis une amélioration significative par rapport au groupe contrôle, du DPT (% prédit et L/min).

La capacité fonctionnelle à l'exercice a été évaluée dans les études de Emirza et al. (2021) et de Zeren et al. (2019) par le biais du test de marche de 6 minutes. Les deux études ont montré une augmentation significative de la distance parcourue après l'entraînement des muscles respiratoires sans pour autant montrer une différence avec le groupe contrôle. De plus, les valeurs de saturation pulsée en oxygène (SpO₂) restaient inchangées après l'entraînement et comparables au groupe contrôle.

La qualité de vie évaluée par Emirza et al. (2021) par le biais de la version turque du « Cystic Fibrosis Questionnaire-Revised », montrait un changement significatif uniquement pour le domaine « Physical functioning » du test réalisé chez les enfants après entraînement au sein du groupe intervention. L'étude de Bieli et al. (2017) a également investigué l'impact de l'entraînement sur la qualité de vie via le score obtenu au « Cystic Fibrosis Questionnaire ». Le score ne s'est pas amélioré de manière significative après l'intervention. De même, la sévérité des symptômes, évaluée par le « Cystic Fibrosis Clinical Score », restait inchangée après entraînement.

Zeren et al. (2019) sont les seuls à avoir évalué l'effet de l'entraînement des muscles inspiratoires sur la stabilité posturale grâce aux tests « Postural Stability Test » (PST) pour la mesure de l'équilibre statique et le « Limits Of Stability Test » (LOST) pour l'équilibre dynamique. Les scores au PST ont tous diminué, indiquant

une meilleure stabilité posturale. Concernant les scores au LOST, les valeurs ont augmenté après l'intervention dans tous les groupes d'étude indiquant un meilleur équilibre dynamique. Toutefois, aucun changement significatif entre le groupe intervention et contrôle n'a été observé que ce soit pour le PST ou le LOST.

Bieli et al. (2017), ont également investigué l'effet de l'entraînement en endurance par le biais des résultats aux tests d'endurance respiratoire et sur cycloergomètre à charge constante. Le premier test consiste en la mesure du temps écoulé jusqu'à l'épuisement quand le sujet est invité à respirer au volume et à la fréquence respiratoire déterminés pendant les séances d'entraînement (Bieli et al., 2017). L'entraînement des muscles respiratoires a montré une amélioration significative de la durée au test d'endurance respiratoire comparé au groupe contrôle. Lors du test effectué sur cycloergomètre, le sujet est invité à pédaler le plus longtemps possible jusqu'à l'épuisement, à la fréquence de pédalage définie à 75% de la capacité maximale définie au préalable (Bieli et al., 2017). Aucune différence significative n'a été démontrée entre les deux groupes.

En conclusion, sur base de ces études, l'entraînement des muscles respiratoires en force dans la mucoviscidose semble avoir un effet positif pour améliorer la force des muscles respiratoires, le DPT (uniquement après un entraînement expiratoire) et un possible effet sur la qualité de vie. L'entraînement en endurance a démontré des effets significatifs uniquement pour l'endurance respiratoire.

3. Circulation de Fontan

L'opération de Fontan est une intervention palliative adressée à des patients souffrant d'une malformation cardiaque congénitale se définissant par la présence d'un seul ventricule. Pour pallier cette malformation, une nouvelle circulation est mise en place. Elle consiste en la connexion du flux sanguin veineux systémique directement aux artères pulmonaires (Abdulkarim et al., 2023). Ainsi, contrairement à la circulation cardiaque physiologique qui relie les circulations pulmonaire et systémique par le biais des deux ventricules, dans la circulation de Fontan, le retour veineux est directement redirigé vers la circulation pulmonaire sans passer par le ventricule. Après avoir été oxygéné, le sang est redirigé vers la circulation systémique par le biais du ventricule gauche (Perrin et al., 2022).

Néanmoins, il a été rapporté que 61 % des opérations étaient suivies de complications pulmonaires. En effet, ces patients peuvent présenter divers symptômes comme la cyanose, la bronchite plastique, un sommeil altéré ou encore l'apparition d'un schéma de pathologie respiratoire restrictive. Le caractère restrictif de cette insuffisance respiratoire peut s'expliquer par la ou les sternotomies induites par la chirurgie, une paralysie du diaphragme ou encore une faiblesse des muscles respiratoires. Cette maladie pulmonaire restrictive entraîne alors une réduction de la capacité à l'exercice mais aussi une réduction des activités de la vie quotidienne. De plus, le flux sanguin s'écoulant par le biais des artères pulmonaires est dit pulsatile grâce au ventricule droit dans la circulation cardiaque physiologique. Cependant, dans le cas d'une circulation de Fontan, ce flux est continu mis à part lors de l'inspiration. La maladie pulmonaire restrictive réduisant cette capacité inspiratoire, une diminution du débit cardiaque et une intolérance à l'effort peuvent apparaître. Pour pallier le trouble ventilatoire restrictif, certaines options de traitement existent tel que l'exercice physique, la ventilation à deux niveaux de pression ou encore l'entraînement des muscles respiratoires (Abdulkarim et al., 2023).

A. Analyse des résultats

L'ensemble des résultats sont présentés en annexes 4 (tableau 3).

Uniquement un article concernant l'entraînement des muscles respiratoires adressé aux patients ayant subi une intervention de Fontan a été inclus dans ce mémoire.

Il s'agit de l'article de Neidenbach et al. (2023) qui proposait un entraînement des muscles inspiratoires en force, à l'aide d'un dispositif à seuil de pression : le POWERbreathe « Medic ». L'intensité d'entraînement n'a pas été définie de manière précise dans l'étude, mais plutôt selon la sensibilité du participant. Il leur a été demandé de débiter à partir du niveau 1 du dispositif (10 cmH₂O) puis d'augmenter progressivement pour aboutir à une résistance adéquate. Les sujets ont été entraînés à raison de 1 à 2 fois par jour, pour une durée d'entraînement totale de 6 mois. Toutefois, aucune notion de durée de séance n'a été mentionnée.

Concernant la fonction pulmonaire, aucune des valeurs ne différait significativement après entraînement que ce soit au sein ou entre les groupes d'étude.

La capacité à l'exercice a été évaluée par le biais d'un test sur cycloergomètre. Après un échauffement de 3 minutes sur cycloergomètre, le test, d'une durée de 8 à 12 minutes, consistait en l'augmentation de la résistance de 5 à 30 watts par minute jusqu'à l'épuisement, puis d'une phase de récupération. Les valeurs de tension artérielle, de fréquence cardiaque, de SpO₂ et de consommation maximale en oxygène (VO₂ max) ont été mesurées durant ce test. Par rapport au groupe contrôle, la SpO₂ au repos (%) est la seule variable ayant montré une amélioration significative après 6 semaines d'entraînement inspiratoire.

En conclusion, sur base de cette étude, l'entraînement des muscles inspiratoires en force auprès de patients avec circulation de Fontan, semble être efficace pour améliorer la SpO₂ au repos.

4. Maladies neuromusculaires

Cette section regroupe un ensemble de pathologies connues sous le nom de pathologies neuromusculaires. Par définition, les maladies neuromusculaires se caractérisent par un groupe hétérogène de pathologies pouvant affecter la corne antérieure de la moelle épinière, la jonction neuromusculaire, les nerfs périphériques ou les muscles. Elles génèrent alors une perte progressive de la force musculaire et notamment des muscles respiratoires. En outre, elles sont également responsables de mouvements involontaires (Silva et al., 2019).

Les conséquences de ces maladies sur les muscles respiratoires conduisent généralement à une insuffisance respiratoire. Ainsi, cette insuffisance respiratoire se manifeste par de la dyspnée (au repos comme à l'effort), de la tachypnée au repos, l'utilisation des muscles inspiratoires accessoires, des mouvements inadaptés du diaphragme, de l'orthopnée et une toux inefficace (Silva et al., 2019). La faiblesse des muscles inspiratoires se manifeste par un schéma de pathologie respiratoire restrictive par diminution de la capacité vitale, de la CPT et de la CRF avec un rapport de Tiffeneau normal. Le volume résiduel pourrait également être réduit en raison de la faiblesse des muscles expiratoires (Laghi & Tobin, 2003).

L'inefficacité des muscles respiratoires augmente donc le risque d'atélectasie, de pneumonie ou d'insuffisance respiratoire chronique. Cela réduit alors de manière considérable la qualité de vie de ces patients par la limitation des activités de la vie quotidienne et de leurs capacités physiques (Silva et al., 2019).

Les pathologies ayant un impact sur la force des muscles respiratoires sont les dystrophies musculaires (dystrophie de Becker, de Duchenne, myotonique, des ceintures des membres, de Emery-Dreifuss et la dystrophie musculaire facio-scapulo-humérale), les myopathies métaboliques (maladie de Pompe, de McArdle et mitochondriale), les syndromes myasthéniques, les myopathies inflammatoires, les neuropathies, la sclérose latérale amyotrophique, la poliomyélite et l'amyotrophie spinale (Bhammar et al., 2022 ; Silva et al., 2019).

A. Analyse des résultats

L'ensemble des résultats sont présentés en annexes 4 (tableau 4).

Les protocoles proposés concernaient à la fois les muscles inspiratoires et expiratoires. De plus, les dispositifs utilisés étaient tous de nature différente. L'étude de Rodríguez et al. (2014) a utilisé des dispositifs à seuil de pression tandis que le Powerbreathe K3, un dispositif à restriction de flux, a été choisi dans l'étude de Human et al. (2024) pour l'entraînement des muscles inspiratoires. Les sujets se sont entraînés avec une intensité imposée s'étendant de 30 à 50% de la Pimax. Concernant l'entraînement expiratoire, uniquement employé dans l'étude de Rodríguez et al. (2014), une intensité de 30 à 50% de la Pemax a également été proposée. Les sujets se sont entraînés à raison de 1 à 2 fois par jour, 5 à 7 fois par semaine. La durée des séances n'a pas été stipulée systématiquement. Uniquement Rodríguez et al. (2014) ont rapporté une durée de 11 minutes pour l'entraînement inspiratoire. Finalement, les entraînements se sont déroulés sur une période de 13 à 39 semaines.

Les valeurs de la Pimax (cmH₂O et % valeur prédite) se sont améliorées significativement dans toutes les études. Dans l'étude de Human et al. (2024), les valeurs de la Pimax (cmH₂O) ont significativement augmenté après la période intervention par rapport à la fin de la période contrôle. Concernant les valeurs de la Pemax (cmH₂O et % valeur prédite), uniquement évaluées dans l'étude de Rodríguez et al. (2014), elles ont significativement augmenté après 6 semaines d'entraînement respiratoire. Enfin, concernant les valeurs de pression inspiratoire nasale de reniflement (cmH₂O), elles, restaient inchangées par rapport à la période contrôle dans l'étude de Human et al. (2024).

Concernant l'habileté à la toux, le débit expiratoire de pointe (DEP) (L/min) a augmenté significativement après intervention uniquement dans l'étude de Rodríguez et al. (2014). Les valeurs du DPT (L/min) se sont également significativement améliorées par rapport au groupe contrôle dans l'étude de Rodríguez et al. (2014). Cette augmentation significative du DPT (L/min) a aussi été constatée pendant la période d'entraînement des muscles inspiratoires par rapport à la période contrôle dans l'étude de Human et al. (2024).

L'étude de Human et al. (2024) s'est intéressée au nombre d'événements indésirables liés à l'entraînement des muscles inspiratoires à savoir le nombre d'hospitalisations non-programmées pour des complications respiratoires (infections bactériennes ou virales). Aucune différence en termes de nombre de jours médians d'infection respiratoire ou d'hospitalisation entre les deux groupes d'étude n'a été observée.

Enfin, le niveau perçu d'effort lié à l'entraînement a été évalué grâce à l'échelle OMNI. Les scores ont significativement diminué entre la sixième et la huitième semaine d'entraînement.

En conclusion, sur base de ces études, l'entraînement des muscles respiratoires en force dans les pathologies neuromusculaires semble avoir un impact sur la force des muscles inspiratoires, l'habileté à la toux (DPT) et sur la capacité à l'expiration forcée (DEP).

5. Paralyse cérébrale

La paralysie cérébrale se définit par toute atteinte non progressive d'un cerveau immature ou en développement induisant une atteinte de la fonction motrice (Sadowska et al., 2020). Cela provoque différents symptômes tels que la perturbation du mouvement, de la posture et de l'équilibre. En outre, les enfants atteints de paralysie cérébrale sont également sujets à des troubles respiratoires. En effet, les facteurs associés à la paralysie cérébrale tels que l'altération des mécanismes de protection des voies aériennes supérieures, la déformation de la cage thoracique et de la colonne vertébrale, l'altération du mécanisme de la toux et le statut nutritionnel de l'enfant contribuent à développer des troubles respiratoires. Ainsi, ces enfants présentent généralement une faiblesse des muscles respiratoires et une hypo mobilité de la paroi du thorax (Kepenek-Varol et al., 2021).

Il existe différentes classifications notamment la classification qui se définit en fonction du tonus musculaire à savoir les types spastiques, dyskinétiques ou ataxiques. En fonction du nombre de membres atteints, il existe également les catégories hémiplégiques, diplégiques ou quadriplégiques. Enfin, une autre classification, la « Gross Motor Functional Classification System » (GMFCS), permet de définir le niveau moteur de ces enfants. Il a été démontré que les scores GMFCS III avaient une fonction respiratoire et des pressions respiratoires inférieures à celles des scores GMFCS I et II (Kwon & Lee, 2014). En effet, en raison de la sévérité de l'atteinte motrice et du score GMFCS, le niveau d'activité est réduit impliquant alors un déconditionnement respiratoire (Anand & Karthikbabu, 2021).

A. Analyse des résultats

L'ensemble des résultats sont présentés en annexes 4 (tableau 5).

Parmi les études sélectionnées, 3 d'entre elles proposent un entraînement en force des muscles inspiratoires grâce au dispositif Threshold IMT et l'étude de Lee et al. (2014) est la seule à proposer un entraînement en endurance grâce au SpiroTiger. Les participants se sont entraînés avec une intensité de 30% de la Pimax et avec une fréquence respiratoire de 14 à 15 cycles par minute pour l'entraînement en endurance. La durée des sessions était de 15 minutes, à raison de 1 à 2 fois par jour et de 3 à 7 fois par semaine. Au total, les entraînements se sont déroulés sur une période de 4 à 8 semaines.

La force des muscles inspiratoires a significativement augmenté par rapport aux groupes contrôle dans les études de Kepenek-Varol et al. (2021) (Pimax en cmH₂O) et de Keles et al. (2018) (Pimax en % prédit et cmH₂O). Dans l'étude de Anand et Karthikbabu (2021), les valeurs de la Pimax (cmH₂O) ont significativement augmenté entre le début de l'étude et le suivi des 2 mois au sein du groupe intervention. Les valeurs de la Pemax (cmH₂O) montrent une amélioration significative par rapport au groupe contrôle uniquement dans l'étude de Kepenek-Varol et al. (2021).

L'effet de l'entraînement des muscles respiratoires a également été évalué sur la fonction pulmonaire. Uniquement l'étude de Anand et Karthikbabu (2021) a démontré une amélioration significative, par rapport au groupe contrôle, des valeurs du DEP (% prédit) après l'intervention. L'entraînement en endurance est le seul à avoir indiqué une amélioration significative des valeurs de la CVF (L) et du VEMS (L) entre les deux groupes d'étude.

La capacité fonctionnelle, évaluée par la distance parcourue au test de marche de 6 minutes (mètres, % prédit), ne s'est améliorée de manière significative par rapport au groupe contrôle que dans l'étude de Keles et al. (2018).

Kepenek-Varol et al. (2021) étaient les seuls à étudier l'effet de cette thérapie sur l'équilibre et la stabilité posturale. Les scores aux tests PST et LOST restaient inchangés entre les deux groupes, indiquant aucune incidence de l'entraînement sur ces variables. C'est également le cas pour le test d'intégration sensorielle et d'équilibre.

Le contrôle du tronc semblait également s'être amélioré après l'intervention. L'étude de Keles et al. (2018) a montré une amélioration significative entre les deux groupes en faveur du groupe intervention pour le score total de l'échelle « Trunk Control Measurement Scale » (TCMS) indiquant ainsi une amélioration du contrôle du tronc.

Enfin, Keles et al. (2018) ont démontré des changements après l'entraînement des muscles inspiratoires sur les activités de la vie quotidienne et la qualité de vie. L'entraînement des muscles inspiratoires a eu un impact sur les 3 domaines de l'échelle « Pediatric Evaluation of Disability Inventory - Functional Skill Scales ». L'augmentation significative des scores à ces différents domaines de l'échelle indiquait une amélioration de la fonction dans les activités de la vie quotidienne. Ce n'était cependant pas le cas pour l'échelle « Pediatric Evaluation of Disability Inventory - Caregiver Assistance Scale ». Les résultats de la version turque du « Cerebral Palsy Quality of Life Questionnaire for Children » ont montré une amélioration de la qualité de vie avec une amélioration significativement plus importante en faveur du groupe intervention uniquement pour les domaines du bien-être social, de l'acceptation et du domaine fonctionnel.

En conclusion, sur base de ces études, l'entraînement des muscles inspiratoires en force pour des patients atteints de paralysie cérébrale semblerait améliorer la force des muscles respiratoires, le DEP, le contrôle du tronc, la capacité à effectuer des activités de la vie quotidienne, la capacité fonctionnelle et la qualité de vie. L'entraînement en endurance, semble plutôt avoir des effets sur la fonction pulmonaire et plus précisément, sur les valeurs du VEMS et de la CVF.

V. Discussion

Cette revue narrative a pour but de déterminer les effets de l'entraînement des muscles respiratoires et d'en analyser les protocoles. D'une manière générale, il s'agit de l'entraînement en force qui était majoritairement employé grâce au dispositif Threshold IMT. Le Threshold PEP, lui, était le dispositif utilisé pour l'entraînement en force des muscles expiratoires. Les dispositifs POWERbreathe « Medic » et POWERbreathe K3 ont été employés à 2 reprises. Enfin, le dispositif SpiroTiger a été utilisé dans les protocoles étudiant les effets de l'entraînement en endurance (Bieli et al., 2017 ; Lee et al., 2014). L'intensité définie dans les protocoles était majoritairement de 30% de la Pimax et jusqu'à 55% dans certaines études. Concernant l'entraînement expiratoire, l'intensité variait de 10 à 50% de la Pemax. Lee et al. (2014) sont les seuls à avoir rapporté l'intensité de l'entraînement en endurance à savoir 14 à 15 cycles par minute. Les sujets se sont entraînés à une fréquence variant de 2 à 7 fois par semaine et parfois de 1 à 2 fois par jour. Finalement, la durée des études s'étendait de 4 à 39 semaines. Ainsi, hormis le fait que l'entraînement en force des muscles inspiratoires à l'aide du dispositif Threshold IMT à 30% de la Pimax ait été majoritairement employé, il persiste une hétérogénéité au niveau des protocoles en termes d'intensité, de durée, de fréquence ainsi qu'en termes de dispositif utilisé. De plus, un manque de justification concernant le choix des intensités d'entraînement a été constaté dans la majorité des études.

Il a été observé une amélioration de la fonction pulmonaire dans l'asthme (VEMS, CVF, VEMS/CVF), la mucoviscidose (DPT), les maladies neuromusculaires (DPT, DEP) et la paralysie cérébrale (DEP, CVF, VEMS). L'asthme se définit par un schéma de pathologie respiratoire obstructive : elle induit une diminution des valeurs du VEMS et donc une diminution du rapport de Tiffeneau (VEMS/ CVF) (Liou & Kanner, 2009). Les valeurs du VEMS et du rapport VEMS/ CVF ayant augmenté après un entraînement des muscles respiratoires, cette thérapie pourrait avoir un effet pour limiter l'obstruction des voies aériennes provoquées par l'asthme. Le contrôle de l'asthme s'est également amélioré grâce aux scores obtenus au ACT (Elnaggar, 2020 ; Elnaggar et al., 2022) et grâce à l'augmentation clinique significative au ACQ6 (David et al., 2018). Concernant les pathologies

respiratoires restrictives, Lee et al. (2014) ont démontré un effet sur les valeurs spirométriques du VEMS et de la CVF dans la paralysie cérébrale. Aucun bénéfice n'a été mis en évidence dans les études concernant les maladies neuromusculaires (Human et al., 2024 ; Rodríguez et al., 2014). Ainsi, il ne semble pas que l'incidence de l'entraînement des muscles respiratoires sur le caractère restrictif induites par la paralysie cérébrale et les maladies neuromusculaires ait été importante. Enfin, l'entraînement des muscles respiratoires semble avoir un effet sur la capacité à la toux par l'augmentation des valeurs du DPT et du DEP dans la mucoviscidose (Emirza et al., 2021), les maladies neuromusculaires (Human et al., 2024 ; Rodríguez et al., 2014) et la paralysie cérébrale (Anand & Karthikbabu, 2021). L'entraînement expiratoire employé dans l'étude de Emirza et al. (2021) semble apporter des effets sur la capacité à la toux en augmentant les valeurs du DPT par la stimulation des muscles responsables de la phase compressive de la toux. L'augmentation du DPT dans cette étude pourrait donc être corrélée à l'amélioration des valeurs de la Pemax. En outre, la toux dépend également de la phase inspiratoire car elle nécessite un volume pulmonaire minimal correspondant à environ 50% de la capacité vitale (Brennan et al., 2022). Néanmoins, dans cette étude, l'entraînement expiratoire n'a pas montré d'effet sur la force des muscles inspiratoires. Concernant les études sur les maladies neuromusculaires et la paralysie cérébrale, l'augmentation des valeurs du DPT et du DEP s'accompagnent d'une augmentation des valeurs de la Pimax après entraînement inspiratoire pouvant ainsi confirmer cette dernière hypothèse.

L'augmentation de la force des muscles respiratoires (Pimax et Pemax) suite à cette intervention a été largement rapportée dans l'asthme, la mucoviscidose, les maladies neuromusculaires et la paralysie cérébrale. En effet, tout comme les muscles squelettiques, lorsque les fibres des muscles respiratoires sont confrontées à une charge plus importante, des changements structurels apparaissent et se traduisent par une augmentation de leur force (Menzes et al., 2018). Cette augmentation de la force induit alors une amélioration de la pression générée par ceux-ci à l'inspiration ou à l'expiration à savoir les valeurs de la Pimax et de la Pemax. Ainsi, par l'amélioration de la force des muscles respiratoires et donc la réduction de leur faiblesse induite par ces différentes pathologies, leur capacité à générer des volumes pulmonaires serait également améliorée (Milic-Emili, 1998, p. 36). De plus, l'entraînement expiratoire aurait un impact additionnel sur les

muscles expiratoires. Avec une activation des muscles expiratoires et notamment des abdominaux à l'expiration, l'hyperinflation induite par l'asthme pourrait diminuer par le biais de l'augmentation de la pression intra-abdominale. Ainsi, le diaphragme retrouverait une conformation lui permettant de générer des forces suffisantes (Elnaggar et al., 2022). Enfin, les résultats concernant l'endurance des muscles respiratoires sont à interpréter de manière précautionneuse étant donné que Bieli et al. (2017) sont les seuls à rapporter un effet positif sur celle-ci.

Cette thérapie a montré des effets bénéfiques sur d'autres aspects comme la qualité de vie dans la mucoviscidose avec une amélioration du domaine « Physical functioning » du « Cystic Fibrosis Questionnaire-Revised ». Néanmoins, étant donné que l'intervention n'a pas induit de changements dans les autres catégories du questionnaire, la généralisation de ce résultat reste limitée. Cette amélioration de la qualité de vie a également été constatée dans la paralysie cérébrale par l'amélioration des domaines du bien-être social et du domaine fonctionnel au test « Cerebral Palsy Quality of Life Questionnaire for Children » dans l'étude de Keles et al. (2018). Comme l'évoquent Keles et al. (2018), différents aspects tels que la nationalité, les points de vue intra et interpersonnels ou encore la situation économique et éducative impactent la qualité de vie. L'évaluation de la qualité de vie reposant essentiellement sur des questionnaires ne regroupant pas nécessairement tous ces aspects, il est difficile de généraliser ces résultats.

La capacité à effectuer des activités de la vie quotidienne par les enfants souffrant de paralysie cérébrale s'est également améliorée par le biais de l'amélioration des domaines des soins personnels, de la mobilité et de la fonction sociale du test « Pediatric Evaluation of Disability Inventory - Functional Skill Scales » dans l'étude de Keles et al. (2018). Ces effets bénéfiques font écho avec l'amélioration, dans la même étude, de la distance parcourue au test de marche de 6 minutes et donc des capacités fonctionnelles.

Kepenek-Varol et al. (2021) et Keles et al. (2018) ont investigué le lien entre le contrôle du tronc et l'entraînement des muscles inspiratoires dans la paralysie cérébrale. L'objectif des auteurs était d'évaluer l'effet de l'entraînement des muscles inspiratoires sur la stabilité thoracique. Ces muscles seraient activés de manière coordonnée avec les muscles stabilisateurs du tronc lors de mouvements des membres et interviendraient dans le maintien de l'équilibre et notamment lors

de la marche (Kepenek-Varol et al., 2021). Néanmoins, seule l'étude de Keles et al. (2018) a démontré des résultats significatifs au score total de l'échelle TCMS. Ces résultats peuvent être mis en relation avec l'amélioration des valeurs de la Pimax et donc de la force des muscles inspiratoires dans la même étude. Kepenek-Varol et al. (2021) expliquent que le manque de résultats sur le contrôle du tronc dans leur étude serait dû en partie en raison de la spasticité présente dans leur échantillon d'étude.

Finalement, la seule étude concernant la circulation de Fontan permet de mettre en évidence une amélioration de la SpO₂ au repos après l'entraînement des muscles inspiratoires (SpO₂ au repos pré entraînement du groupe intervention : 91,5% ; SpO₂ au repos post entraînement du groupe intervention : 94,4%). En effet, la SpO₂ au repos des patients avec une circulation de Fontan se situe généralement aux alentours de 95% (Neidenbach et al., 2023). Toutefois, les valeurs de la SpO₂ étant plus basses au sein du groupe intervention au départ notifie une sévérité de la maladie plus importante par rapport au groupe contrôle (SpO₂ au repos pré entraînement du groupe intervention : 91,5% ; SpO₂ au repos pré entraînement du groupe contrôle : 93,7%).

Les résultats présentés précédemment sont comparables à la littérature en fonction des pathologies. Ainsi, les effets précédemment énoncés dans l'asthme sont similaires avec les résultats de la revue de Xiang et al. (2024) (Pimax, Pemax, CVF, VEMS, VEMS/ CVF et ACT). Concernant la mucoviscidose, la revue de Stanford et al. (2020) qui concernait la population adulte et pédiatrique, rapportait également une amélioration des valeurs de la Pimax et de l'endurance des muscles respiratoires dans 3 études comprises dans la revue. Concernant la Pemax, aucune amélioration n'a été rapportée. Cette revue rapportait aussi une amélioration de la qualité de vie dans une étude. Toutefois, aucune analyse concernant le DPT n'a été effectuée. Concernant la circulation de Fontan, Turquetto et al. (2021) ont étudié l'effet de l'entraînement des muscles inspiratoires auprès d'un échantillon de sujets comprenant des enfants et des adultes. Cette dernière n'indiquait, par contre, aucune différence significative après intervention au niveau de la SpO₂ au repos. Concernant les maladies neuromusculaires, la revue de Watson et al. (2022) dont les résultats s'adressaient également à la population adulte, évoquait une amélioration de la force des muscles respiratoires dans la moitié des études

sélectionnées après entraînement des muscles respiratoires. Néanmoins, en ce qui concerne le DEP et le DPT, aucun impact de la thérapie n'a été rapportée. Enfin, concernant la paralysie cérébrale, l'étude de Martin-Sanchez et al. (2024) a aussi constaté une amélioration de la force des muscles respiratoires (Pimax et Pemax) et de la fonction pulmonaire (VEMS, DEP) après un entraînement des muscles inspiratoires dans un échantillon de sujets adultes. Cette étude montrait qu'avec un entraînement utilisant une intensité supérieure à 40% de la Pimax, les effets sur les valeurs de la Pimax, de la Pemax et du DEP étaient significativement plus importants. Les effets concernant la qualité de vie, les capacités fonctionnelles, le contrôle du tronc, ou les activités de la vie quotidiennes n'ont pas été étudiés dans cet essai.

Si l'entraînement des muscles respiratoires semble avoir un impact positif sur différents aspects, il est important de considérer les limitations des articles compris dans cette revue narrative. La 1^{ère} concerne l'hétérogénéité des sujets d'étude, d'abord en termes de diagnostic. Dans les deux études de Elnaggar RK, les enfants présentaient un asthme dit « stable », ainsi les résultats ne sont interprétables que pour des enfants dont l'asthme est contrôlé. C'est également le cas dans les études concernant les maladies neuromusculaires. En effet, si le dénominateur commun à ces sujets est la faiblesse des muscles respiratoires, en raison de la pluralité des types et des atteintes associées, il est difficile de généraliser les résultats. Enfin, dans les études concernant la paralysie cérébrale, l'échelle GMFCS a été utilisée pour catégoriser les niveaux d'atteinte des participants. Toutefois, ce score étant le témoin de la gravité de l'atteinte motrice et fonctionnelle de l'enfant, la différence des scores obtenus expliquait la difficulté de comparer les résultats. Ce biais est également évoqué dans les études de Kepenek-Varol et al. (2021) et de Keles et al. (2018), où les sujets sélectionnés étaient principalement des enfants avec un score GMFCS I et II. L'âge des participants est également assez hétérogène notamment dans les études concernant les maladies neuromusculaires où les enfants étaient âgés de 5 à 17 ans (Human et al., 2024 ; Rodríguez et al., 2014). Ces variabilités en termes de caractéristiques des participants réduisent alors la validité externe des résultats. La seconde limitation est la taille d'échantillon trop faible (n=24) dans l'étude de Keles et al. (2018). Ainsi, elle ne permettait pas de mesurer de manière optimale les effets de l'entraînement. La 3^{ème} concerne la durée d'intervention (4 semaines) de l'étude de Lee et al. (2014) qui ne permettait pas de constater d'effets

à long terme. La 4^{ème} concerne la poursuite du traitement habituel tel que le drainage des voies respiratoires (Emirza et al., 2021) ou la pratique d'une activité physique d'intensité modérée (Zeren et al., 2019) en parallèle de l'intervention. L'utilisation de ces techniques ne permet pas d'exclure de possibles effets additionnels à l'intervention. La 5^{ème} fait référence à la méthodologie de certaines études : l'effet de report (Bieli et al., 2017), l'ordre des traitements (Bieli et al., 2017 ; Human et al., 2024) et l'absence de caractère aveugle lors de l'attribution des groupes (Human et al., 2024), des évaluations pré/post-intervention et de la supervision des séances d'entraînement (Kepenek-Varol et al., 2021).

VI. Conclusion

Cette revue narrative permet de mettre en évidence les effets de l'entraînement des muscles respiratoires dans l'asthme, la mucoviscidose, la circulation de Fontan, les maladies neuromusculaires et la paralysie cérébrale au sein de la population pédiatrique. Ainsi, cette thérapie semble avoir une incidence sur la fonction pulmonaire, la force et l'endurance des muscles respiratoires, la SpO₂ au repos, le contrôle de l'asthme, les capacités fonctionnelles, la qualité de vie et le contrôle du tronc. Pour y parvenir, l'entraînement en force des muscles inspiratoires par le biais du dispositif portable Threshold IMT avec une intensité de 30% de la Pimax est fréquemment décrit. Cependant, étant donné qu'un manque de recommandations persiste concernant les protocoles, de futures études restent nécessaires afin de préciser les modalités d'entraînement. De plus, différents aspects tels que l'adhésion des sujets pédiatriques aux programmes d'entraînement et l'adaptation des dispositifs portables en fonction des pathologies restent également à décrire.

VII. Bibliographie

Abdulkarim A., Shaji S., Elfituri M., Gunsaulus M., Zafar M. A., Zaidi A., et al. (2023). Pulmonary complications in patients with fontan circulation : JACC review topic of the week. *Journal Of The American College Of Cardiology*, 81(25) : 2434-2444. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2023.04.036>

Anand B., Karthikbabu S. (2021). Effects of additional inspiratory muscle training on mobility capacity and respiratory strength for school-children and adolescents with cerebral palsy : a randomized controlled trial. *Brazilian Journal Of Physical Therapy*, 25(6) : 891-899. <https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2021.10.006>

Andrani F., Aiello M., Bertorelli G., Crisafulli E., Chetta A. (2019). Cough, a vital reflex. mechanisms, determinants and measurements. *Acta bio-medica : Atenei Parmensis*, 89(4) : 477-480. <https://doi.org/10.23750/abm.v89i4.6182>

American Thoracic Society/European Respiratory Society (2002). ATS/ETS statement on respiratory muscle testing. (2002). *American Journal Of Respiratory And Critical Care Medicine*, 166(4) : 518-624. <https://doi.org/10.1164/rccm.166.4.518>

Bhammar D. M., Jones H. N., Lang J. E. (2022). Inspiratory muscle rehabilitation training in pediatrics : what is the evidence ? *Canadian Respiratory Journal*, 2022 : 5680311. <https://doi.org/10.1155/2022/5680311>

Bieli C., Summermatter S., Boutellier U., Moeller A. (2017). Respiratory muscle training improves respiratory muscle endurance but not exercise tolerance in children with cystic fibrosis. *Pediatric Pulmonology*, 52(3) : 331-336. <https://doi.org/10.1002/ppul.23647>

Brennan M., McDonnell M., Duignan N., Gargoum F., Rutherford R. (2022). The use of cough peak flow in the assessment of respiratory function in clinical practice - a narrative literature review. *Respiratory Medicine*, 193 : 106740. <https://doi.org/10.1016/j.rmed.2022.106740>

Cai W., Li M., Xu Y., Li M., Wang J., Zuo Y., et al. (2024). The effect of respiratory muscle training on children and adolescents with cystic fibrosis : a systematic review and meta-analysis. *BMC Pediatrics*, 24(1) : 252. <https://doi.org/10.1186/s12887-024-04726-x>

Chiang J., Mehta K., Amin R. (2018). Respiratory diagnostic tools in neuromuscular disease. *Children*, 5(6) : 78. <https://doi.org/10.3390/children5060078>

David M. M. C., De Freitas Dantas Gomes E. L., Mello M. C., Costa D. (2018). Noninvasive ventilation and respiratory physical therapy reduce exercise-induced bronchospasm and pulmonary inflammation in children with asthma : randomized clinical trial. *Therapeutic Advances In Respiratory Disease*, 12 : 1-11. <https://doi.org/10.1177/1753466618777723>

De Troyer A., Boriek A. M. (2011). Mechanics of the respiratory muscles. *Comprehensive Physiology*, 1(3) : 1273-1300. <https://doi.org/10.1002/cphy.c100009>

Dimitriadis Z., Kapreli E., Konstantinidou I., Oldham J., Strimpakos N. (2011). Test/retest reliability of maximum mouth pressure measurements with the MicroRPM in healthy volunteers. *Respiratory Care*, 56(6) : 776-782. <https://doi.org/10.4187/respcare.00783>

Elnaggar R. K. (2020). A randomized placebo-controlled study investigating the efficacy of inspiratory muscle training in the treatment of children with bronchial asthma. *The Journal Of Asthma : Official Journal Of The Association For The Care Of Asthma*, 58(12) : 1661-1669. <https://doi.org/10.1080/02770903.2020.1821058>

Elnaggar R. K., Osailan A. M., Elbanna M. F. (2022). The rationale of applying inspiratory/expiratory muscle training within the same respiratory cycle in children with bronchial asthma : a placebo-controlled randomized clinical investigation. *The Journal Of Asthma : Official Journal Of The Association For The Care Of Asthma*, 60(5) : 900-911. <https://doi.org/10.1080/02770903.2022.2103708>

Emirza C., Aslan G. K., Kilinc A. A., Cokugras H. (2021). Effect of expiratory muscle training on peak cough flow in children and adolescents with cystic fibrosis : a randomized controlled trial. *Pediatric Pulmonology*, 56(5) : 939-947. <https://doi.org/10.1002/ppul.25259>

Fauroux B., Aubertin G. (2007). Measurement of maximal pressures and the sniff manoeuvre in children. *Paediatric Respiratory Reviews*, 8(1) : 90-93. <https://doi.org/10.1016/j.prrv.2007.02.006>

Fonseca C., Bicker J., Alves G., Falcão A., Fortuna A. (2020). Cystic fibrosis : physiopathology and the latest pharmacological treatments. *Pharmacological Research*, 162 : 105267. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2020.105267>

Gokcek O., Yurdalan U., Tugay B. U., El C., Dogan S. (2023). Evaluation of the possible effect of inspiratory muscle training on inflammation markers and oxidative stress in childhood asthma. *European Journal Of Pediatrics*, 182(8) : 3713-3722. <https://doi.org/10.1007/s00431-023-05047-4>

Herkenrath S. D., Treml M., Priegnitz C., Galetke W., Randerath W. J. (2017). Effects of respiratory muscle training (RMT) in patients with mild to moderate obstructive sleep apnea (OSA). *Sleep And Breathing*, 22(2) : 323-328. <https://doi.org/10.1007/s11325-017-1582-6>

Hilton N., Solis-Moya A. (2018). Respiratory muscle training for cystic fibrosis. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 5(5) : CD006112. <https://doi.org/10.1002/14651858.cd006112.pub4>

Human A., Corten L., Lozano-Ray E., Morrow B. M. (2024). Inspiratory muscle training in children with neuromuscular disorders. *The South African Journal Of Physiotherapy*, 80(1) : 2055. <https://doi.org/10.4102/sajp.v80i1.2055>

Kagaya H., Inamoto Y. (2022). Possible rehabilitation procedures to treat sarcopenic dysphagia. *Nutrients*, 14(4) : 778. <https://doi.org/10.3390/nu14040778>

Keles M. N., Elbasan B., Apaydin U., Aribas Z., Bakirtas A., Kokturk N. (2018). Effects of inspiratory muscle training in children with cerebral palsy : a randomized controlled trial. *Brazilian Journal Of Physical Therapy*, 22(6) : 493-501. <https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2018.03.010>

Kepenek-Varol B., Gürses H. N., İçağasioğlu D. F. (2021). Effects of inspiratory muscle and balance training in children with hemiplegic cerebral palsy : a randomized controlled trial. *Developmental Neurorehabilitation*, 25(1) : 1-9. <https://doi.org/10.1080/17518423.2021.1905727>

Kwon Y. H., Lee H. Y. (2014). Differences of respiratory function according to level of the Gross Motor Function Classification System in children with cerebral palsy. *Journal Of Physical Therapy Science*, 26(3) : 389-391. <https://doi.org/10.1589/jpts.26.389>

Laghi F., Tobin M. J. (2003). Disorders of the respiratory muscles. *American Journal Of Respiratory And Critical Care Medicine*, 168(1) : 10-48. <https://doi.org/10.1164/rccm.2206020>

Laveneziana P., Albuquerque A., Aliverti A., Babb T., Barreiro E., Dres M., et al. (2019). ERS statement on respiratory muscle testing at rest and during exercise. *The European Respiratory Journal*, 53(6) : 1801214. <https://doi.org/10.1183/13993003.01214-2018>

Lee H. Y., Cha Y. J., Kim K. (2014). The effect of feedback respiratory training on pulmonary function of children with cerebral palsy : a randomized controlled preliminary report. *Clinical Rehabilitation*, 28(10) : 965-971. <https://doi.org/10.1177/0269215513494876>

Liou T. G., Kanner R. E. (2009). Spirometry. *Clinical Reviews In Allergy & Immunology*, 37(3) : 137-152. <https://doi.org/10.1007/s12016-009-8128-z>

Martin-Sanchez C., Barbero-Iglesias F. J., Amor-Esteban V., Martin-Sanchez M., Martin-Nogueras A. M. (2024). Benefits of inspiratory muscle training therapy in institutionalized adult people with cerebral palsy : a double-blind randomized controlled trial. *Brain and behavior*, 14(9) : e70044. <https://doi.org/10.1002/brb3.70044>

Menzes K. K. P., Nascimento L. R., Avelino P. R., Polese J. C., Salmela L. F. T. (2018). A review on respiratory muscle training devices. *Journal Of Pulmonary & Respiratory Medicine*, 8(2) : 1000451. <https://doi.org/10.4172/2161-105x.1000451>

Milic-Emili J. (1998). *Applied Physiology in Respiratory Mechanics*. Springer Milano. <https://doi.org/10.1007/978-88-470-2928-6>

Muñoz-Cofré R., Roa I., Del Sol M., Conei D., Lizama-Pérez R., Pacheco-Valles A., et al. (2023). Respiratory muscles : structure, function and relationship with the ACE gene. A brief morphofunctional communication. *International Journal Of Morphology*, 41(2) : 675-685. <https://doi.org/10.4067/s0717-95022023000200675>

Neidenbach R., Freilinger S., Stöcker F., Ewert P., Nagdyman N., Oberhoffer-Fritz R., et al. (2023). Clinical aspects and targeted inspiratory muscle training in children and adolescents with Fontan circulation : a randomized controlled trial. *Cardiovascular Diagnosis And Therapy*, 13(1) : 11-24. <https://doi.org/10.21037/cdt-22-308>

Nici L., Donner C., Wouters E., Zuwallack R., Ambrosino N., Bourbeau J., et al. (2006). American Thoracic Society/European Respiratory Society statement on pulmonary rehabilitation. *American Journal Of Respiratory And Critical Care Medicine*, 173(12) : 1390-1413. <https://doi.org/10.1164/rccm.200508-1211st>

Perrin N., Dore A., Van de Bruaene A., Mongeon F., Mondésert B., Poirier N., et al. (2022). The fontan circulation : from ideal to failing hemodynamics and drug therapies for optimization. *The Canadian Journal Of Cardiology*, 38(7) : 1059-1071. <https://doi.org/10.1016/j.cjca.2022.04.014>

POWERbreathe International. (2025). POWERbreathe. Consulté le 1^{er} mai 2025 sur <https://www.powerbreathe.com/>

Ratnovsky A., Elad D., Halpern P. (2008). Mechanics of respiratory muscles. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 163(1-3) : 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2008.04.019>

Rodríguez I., Zenteno D., Manterola C. (2014). Effects of home-based respiratory muscle training in children and adolescents with chronic lung disease. *Jornal Brasileiro De Pneumologia, Publicacao Oficial Da Sociedade Brasileira De Pneumologia E Tisiologia*, 40(6) : 626-633. <https://doi.org/10.1590/s1806-37132014000600006>

Sadowska M., Sarecka-Hujar B., Kopyta I. (2020). Cerebral palsy : current opinions on definition, epidemiology, risk factors, classification and treatment options. *Neuropsychiatric Disease And Treatment*, 16 : 1505-1518. <https://doi.org/10.2147/ndt.s235165>

Sartori R., Barbi E., Poli F., Ronfani L., Marchetti F., Amaddeo A., et al. (2008). Respiratory training with a specific device in cystic fibrosis : a prospective study. *Journal Of Cystic Fibrosis : Official Journal Of The European Cystic Fibrosis Society*, 7(4) : 313-319. <https://doi.org/10.1016/j.jcf.2007.12.003>

Silva I. S., Pedrosa R., Azevedo I. G., Forbes A., Fregonezi G. A., Dourado M. E., et al. (2019). Respiratory muscle training in children and adults with neuromuscular disease. *The Cochrane Database Of Systematic Reviews*, 9(9) : CD011711. <https://doi.org/10.1002/14651858.cd011711.pub2>

Spruit M. A., Singh S. J., Garvey C., ZuWallack R., Nici L., Rochester C., et al. (2013). An official American Thoracic Society/European Respiratory Society statement : key concepts and advances in pulmonary rehabilitation. *American Journal Of Respiratory And Critical Care Medicine*, 188(8) : e13-e64. <https://doi.org/10.1164/rccm.201309-1634st>

Stanford G., Ryan H., Solis-Moya A. (2020). Respiratory muscle training for cystic fibrosis. *The Cochrane Database Of Systematic Reviews*, 12(12) : CD006112. <https://doi.org/10.1002/14651858.cd006112.pub5>

Turquetto A. L. R., Santos M. R. D., Agostinho D. R., Sayegh A. L. C., De Souza F. R., Amato L. P., et al. (2021). Aerobic exercise and inspiratory muscle training increase functional capacity in patients with univentricular physiology after Fontan operation : a randomized controlled trial. *International Journal Of Cardiology*, 330 : 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2021.01.058>

Watson K., Egerton T., Sheers N., Retica S., McGaw R., Clohessy T., et al. (2022). Respiratory muscle training in neuromuscular disease : a systematic review and meta-analysis. *European Respiratory Review : An Official Journal Of The European Respiratory Society*, 31(166) : 220065. <https://doi.org/10.1183/16000617.0065-2022>

Xiang Y., Luo T., Chen X., Zhang H., Zeng L. (2024). Effect of inspiratory muscle training in children with asthma : a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Frontiers In Pediatrics*, 12 : 1367710. <https://doi.org/10.3389/fped.2024.1367710>

Zeren M., Cakir E., Gurses H. N. (2019). Effects of inspiratory muscle training on postural stability, pulmonary function and functional capacity in children with cystic fibrosis : a randomised controlled trial. *Respiratory Medicine*, 148 : 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.rmed.2019.01.013>

VIII. Annexes

Annexes 1 : équations de recherche

Embase :

('child'/exp OR 'child' OR 'children' OR 'adolescent'/exp OR 'adolescent' OR 'teenager') AND ('inspiratory muscle training'/exp OR 'expiratory muscle training'/exp OR 'respiratory exerciser'/exp OR 'inspiratory muscle training' OR 'expiratory muscle training' OR 'dhd cliniflo' OR 'frolov device' OR 'frolovs device' OR 'powerbreathe' OR 'powerbreathe classic' OR 'powerbreathe k1' OR 'powerbreathe k2' OR 'powerbreathe k3' OR 'powerbreathe k4' OR 'powerbreathe k5' OR 'powerbreathe plus' OR 'threshold imt' OR 'threshold pep' OR 'breathing exerciser' OR 'respiratory exercisers' OR 'respiratory trainer' OR 'respiratory muscle training'/exp OR 'respiratory muscle training' OR 'breathing exercise'/exp OR 'breathing exercise' OR 'breathing exercises' OR 'breathing therapy' OR 'respiratory exercise' OR 'inspiratory muscle strength training' OR 'expiratory muscle strength training'/exp OR 'expiratory muscle strength training' OR 'expiratory loading' OR 'inspiratory loading' OR 'inspiratory muscle trainer' OR 'expiratory muscle trainer' OR 'respiratory muscle trainer' OR 'inspiratory restriction device' OR 'inspiratory training' OR 'expiratory training' OR 'inspiratory resistive loading' OR 'expiratory resistive loading' OR 'resistance respiratory muscle training' OR 'respiratory muscle strength training' OR 'respiratory muscle endurance training' OR 'threshold training' OR 'imt' OR (('inspiratory' OR 'expiratory') AND 'muscle' AND ('train' OR 'strength'))))

Pubmed :

("child"[MeSH Terms] OR "adolescent"[MeSH Terms] OR child[TIAB] OR "children"[Title/Abstract] OR teenager*[Title/Abstract] OR adolescent*[TIAB]) AND ("breathing exercises"[MeSH Terms] OR "expiratory muscle train*" [Title/Abstract] OR "inspiratory muscle train*" [Title/Abstract] OR "respiratory muscle train*" [Title/Abstract] OR "powerbreathe" [Title/Abstract] OR "inspiratory restriction device" [Title/Abstract] OR "inspiratory

train*"[Title/Abstract] OR "expiratory train*"[Title/Abstract] OR "inspiratory resistive loading"[Title/Abstract] OR "expiratory resistive loading"[Title/Abstract] OR "resistance respiratory muscle training"[Title/Abstract] OR "respiratory muscle endurance training"[Title/Abstract] OR "threshold training"[Title/Abstract] OR "inspiratory loading"[Title/Abstract] OR "expiratory loading"[Title/Abstract] OR "respiratory muscle strength training"[Title/Abstract] OR "breathing exercis*"[TIAB] OR "respiratory exercis*"[TIAB] OR "IMT"[Title/Abstract] OR ("inspiratory"[Title/Abstract] OR "expiratory"[Title/Abstract]) AND "muscle"[Title/Abstract] AND ("train"[Title/Abstract] OR "strength"[Title/Abstract])) OR "frolov device"[Title/Abstract] OR "frolovs device"[Title/Abstract] OR "dhd cliniflo"[Title/Abstract] OR "powerbreathe k1"[Title/Abstract] OR "powerbreathe k2"[Title/Abstract] OR "powerbreathe k3"[Title/Abstract] OR "powerbreathe k4"[Title/Abstract] OR "powerbreathe k5"[Title/Abstract] OR "powerbreathe plus"[Title/Abstract] OR "threshold imt"[Title/Abstract] OR "threshold pep"[Title/Abstract] OR "respiratory trainer"[Title/Abstract] OR "inspiratory muscle strength training"[Title/Abstract] OR "powerbreathe classic"[Title/Abstract] OR "breathing therapy"[Title/Abstract] OR "expiratory muscle strength training"[Title/Abstract])

Cochrane Library :

("child" OR "children" OR "adolescent" OR "teenager") AND ("inspiratory muscle training" OR "expiratory muscle training" OR "respiratory muscle training" OR "inspiratory muscle trainer" OR "respiratory muscle trainer" OR "powerbreathe" OR "inspiratory restriction device" OR "inspiratory training" OR "expiratory training" OR "inspiratory resistive loading" OR "expiratory resistive loading" OR "resistance respiratory muscle training" OR "respiratory muscle endurance training" OR "threshold training" OR "inspiratory loading" OR "expiratory loading" OR "respiratory muscle strength training" OR "inspiratory muscle strength training" OR "expiratory muscle strength training" OR "breathing exercise" OR "IMT" OR ("inspiratory" OR "expiratory") AND "muscle" AND ("train" OR "strength")) OR "powerbreathe k1" OR "powerbreathe k2" OR "powerbreathe k3" OR "powerbreathe k4" OR "powerbreathe k5" OR "powerbreathe plus" OR "dhd cliniflo" OR "threshold imt" OR "frolov device" OR "frolovs device" OR

"threshold pep" OR "breathing exerciser" OR "respiratory exerciser" OR "respiratory trainer" OR "expiratory muscle trainer" OR "powerbreathe classic" OR "breathing therapy" OR "respiratory exercise" OR "breathing exercises")

Annexes 2 : illustrations des dispositifs de mesure de la force des muscles respiratoires

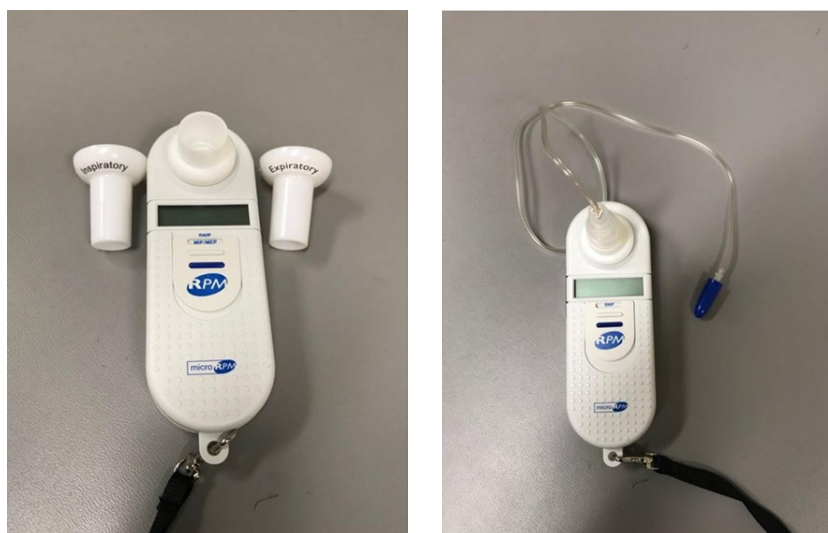


Figure 2 : Dispositif MicroRPM (mesure de la Pimax et Pemax à gauche et mesure de la pression inspiratoire nasale de reniflement à droite). D'après Chiang et al. (2018).

Annexes 3 : illustrations des dispositifs d'entraînement des muscles respiratoires



Figure 3 : Dispositifs de la gamme POWERbreathe K-Series, de la gauche vers la droite dans l'ordre : POWERbreathe K1, POWERbreathe K2, POWERbreathe K3, POWERbreathe K4, POWERbreathe K5. D'après POWERbreathe International Ltd., Northfield Road, Southam, Warwickshire, CV47 0FG, England, UK. URL site internet : https://www.powerbreathe.com/?_gl=1*1mfe4q8*_up*MQ..*_ga*Mjc3MDA5ODYuMTc0NTU5MzQ0Nw..*_ga_DN8J5554RQ*MTc0NTU5MzQ0Ni4xLjAuMTc0NTU5MzQ0Ni4wLjAuMA



Figure 4 : Dispositif de la gamme POWERbreathe « Classic ». D'après POWERbreathe International Ltd., Northfield Road, Southam, Warwickshire, CV47 0FG, England, UK. URL site internet : https://www.powerbreathe.com/?_gl=1*1mfe4q8*_up*MQ..*_ga*Mjc3MDA5ODYuMTc0NTU5MzQ0Nw..*_ga_DN8J5554RQ*MTc0NTU5MzQ0Ni4xLjAuMTc0NTU5MzQ0Ni4wLjAuMA



Figure 5 : Dispositif de la gamme POWERbreathe « Plus ». D'après POWERbreathe International Ltd., Northfield Road, Southam, Warwickshire, CV47 0FG, England, UK. URL site internet : https://www.powerbreathe.com/?_gl=1*1mfe4q8*_up*MQ..*_ga*Mjc3MDA5ODYuMTc0NTU5MzQ0Nw..*_ga_DN8J5554RQ*MTc0NTU5MzQ0Ni4xLjAuMTc0NTU5MzQ0Ni4wLjAuMA



Figure 6 : Dispositif de la gamme POWERbreathe « Medic ». D'après POWERbreathe International Ltd., Northfield Road, Southam, Warwickshire, CV47 0FG, England, UK. URL site internet :https://www.powerbreathe.com/?_gl=1*1mfe4q8*_up*MQ..*_ga*Mjc3MDA5ODYuMTc0NTU5MzQ0Nw..*_ga_DN8J5554RQ*MTc0NTU5MzQ0Ni4xLjAuMTc0NTU5MzQ0Ni4wLjAuMA



Figure 7 : Dispositif Threshold IMT (Respironics Inc., Murrysville, PA, USA). D'après Bhammar et al. (2022).



Figure 8 : Dispositif Threshold PEP (Respironics Inc., Murrysville, PA, USA). D'après Kagaya et Inamoto (2022).



Figure 9 : Dispositif SpiroTiger (Idag AG, Volketswill, ZH, CHE). D'après Herkenrath et al. (2017).

Annexes 4 : tableaux synthèse des études incluses

Tableau 1 : synthèse des études sur l'asthme

Auteur (année)	Design de l'étude	Groupes (protocoles)	Intervention	Résultats
David et al. (2018)	RCT	GI (n=20) : séance de 60 min : 20 min ex respi + 40 min EMI GC CPAP (n=22) : CPAP + 20 min ex respi GC VNI-2P (n=22) : VNI-2P + 20 min ex respi	Dispositif : Threshold IMT (Respironics, Cedar Grove, NJ, USA) Intensité : 30% Pimax (↑ de 10% après les 5^{èmes} sessions) Fréquence : 2 x/ sem Durée de la séance : 40 min Durée totale : 5 sem	Fonction pulmonaire : CVF (%) : GI : ↑ de 92,7 à 95,1*, GC CPAP : ↓ de 98,4 à 97,8*, GC VNI-2P : ↑ de 90,7 à 92,5* VEMS (%) : GI : ↑ de 80,2 à 82,2*, GC CPAP : ↓ de 83,7 à 81,5*, GC VNI-2P : ↑ 77,3 à 80,5* VEMS/CVF (%) : GI : ↓ de 85,3 à 85,2*, GC CPAP : ↓ de 85 à 83,8*, GC VNI-2P : ↑ de 82,3 à 86,8* DEM 25-75% (%) : GI : ↓ de 71,2 à 67,9*, GC CPAP : ↓ de 72,4 à 68,3*, GC VNI-2P : ↑ de 60,63 à 72,9* Force des muscles respiratoires : Pimax (cmH₂O) : GI : ↑ de 55,5 à 84,5 (p ≤ 0,05), GC CPAP : ↑ de 52,5 à 59,7 (p ≤ 0,05), GC VNI-2P : ↑ de 48,1 à 56,3 (p ≤ 0,05) Pemax (cmH₂O) : GI : ↑ de 53,5 à 73,5 (p ≤ 0,05), GC CPAP : ↑ 46,13 à 52,04*, GC VNI 2-P : ↑ de 50 à 56,8* Contrôle de l'asthme : ACQ6 (score) : GI : ↓ de 0,83 à 0,33*, GC CPAP : ↓ de 1,16 à 0,66*, GCVNI-2P : ↓ de 1,25 à 0,58* Test de bronchoconstriction provoquée à l'exercice : valeurs du VEMS à 5, 10, 15, 20 et 25 minutes après le test

* : P-valeur pré-post ≥ 0,05

				GI : aucune différence significative après intervention, GC CPAP : différence significative uniquement à 5 min après intervention (p < 0,05), GC VNI-2P : ↑ à 10 min (p = 0,01), à 15 min (p = 0,04) et 20 min (p = 0,01) après intervention Inflammation pulmonaire : FeNO (ppb) : GI : ↓ de 40,8 à 35,9*, GC CPAP : ↓ de 53,5 à 37,7 (p ≤ 0,05), GC VNI-2P : ↓ de 52,7 à 35,3 (p ≤ 0,05)
Elnaggar (2020)	RCT	GI (n=16) : PRP (30 min) + EMI : - Phase 1 : 15 min de respiration diaphragmatique, 15 respirations avec 10 sec de repos entre chaque ; - Phase 2 : respiration continue pendant 5 min GC (n=15) : PRP + EMI (5% Pimax)	Dispositif : Threshold IMT (Respironics, Cedar Grove, NJ, USA) Intensité : 40 % - 50 % Pimax Fréquence : 3 x/ sem Durée de la séance : 20 min Durée totale : 12 sem	Fonction pulmonaire : ** CVF (% prédit) : GI : ↑ de 73,44 à 85,94, GC : ↑ de 71,87 à 79,73 ; P_{intergroupe} : p = 0,001 VEMS (% prédit) : GI : ↑ de 67,56 à 79,56, GC : ↑ de 65,47 à 71,13 ; P_{intergroupe} : p = 0,003 VEMS/CVF : GI : ↑ de 75,43 à 86,88, GC : ↑ de 73,93 à 80,33 ; P_{intergroupe} : p = 0,004 Force des muscles respiratoires : ** Pimax (cmH₂O) : GI : ↑ de 69,81 à 87,25, GC : ↑ de 67,53 à 78,47 ; P_{intergroupe} : p = 0,002 Pemax (cmH₂O) : GI : ↑ de 72,75 à 91,56, GC : ↑ de 71,67 à 82,40 ; P_{intergroupe} : p = 0,004 Contrôle de l'asthme : ** ACT (score) : GI : ↑ de 17,19 à 21,75, GC : ↑ de 16,40 à 19,47 ; P_{intergroupe} : p = 0,001

** : P-valeurs pré-post non communiquées

Elnaggar et al. (2022)	RCT	GI (n=17) : 12 séries de 3 min d'EMI et d'EME pendant le même cycle respiratoire + 2 min de repos entre chaque série. Inspiration rapide en gonflant la poitrine et expiration la plus rapide possible + PRP GEMI (n= 17) : 6 séries d'EMI et 6 séries sans charge + PRP GC (n=17) : 12 séries d'entraînement sans charge + PRP	Dispositif : Threshold IMT (Respironics, USA) et Threshold EMT (Respironics, USA) attachés à un tube muni d'une valve unidirectionnelle Intensité : EMI : 30% à 55% Pimax ; EME : 10 à 35% Pemax Fréquence : 3 x/ sem (48h de repos entre chaque) Durée de la séance : 35 min Durée totale : 12 sem	Fonction pulmonaire : CVF (% prédit) : GI : ↑ de 72,35 à 84,12 (p < 0,001), GCEMI : ↑ de 71,12 à 78,17 (p = 0,0005), GC : ↑ de 71,24 à 75,82 (p = 0,0009) ; Interaction groupe/ temps : p = 0,003 VEMS (% prédit) : GI : ↑ de 68,24 à 79,88 (p < 0,001), GEMI : ↑ de 66,89 à 73,41 (p < 0,001), GC : ↑ de 65,94 à 70,76 (p = 0,0005) ; Interaction groupe/ temps : p = 0,002 VEMS/CVF : GI : ↑ de 75,10 à 85,18 (p < 0,001), GCEMI : ↑ de 74,12 à 79,29 (p = 0,0003), GC : ↑ de 73,94 à 76,18 (p = 0,017) ; Interaction groupe/ temps : p = 0,001 Force des muscles respiratoires : Pimax (cmH₂O) : GI : ↑ de 71,76 à 86,76 (p < 0,001), GCEMI : ↑ de 66,94 à 78,24 (p < 0,001), GC : ↑ de 70,82 à 74,47 (p = 0,012) ; Interaction groupe/ temps : p < 0,001 Pemax (cmH₂O) : GI : ↑ de 71,18 à 87,12 (p < 0,001), GCEMI : ↑ de 70,59 à 76,94 (p = 0,008), GC : ↑ de 71,88 à 73,71 (p = 0,21) ; Interaction groupe/ temps : p < 0,001 Contrôle de l'asthme : ACT (score) : GI : ↑ de 17,29 à 21,59 (p < 0,001), GCEMI : ↑ de 15,94 à 19,18 (p < 0,001), GC : ↑ de 15,76 à 17,88 (p = 0,005) ; Interaction groupe/ temps : p = 0,031
--------------------------------------	------------	---	---	---

Gokcek et al. (2023)	RCT	GI (n=35) : 10 à 15 répétitions avec pause de 10 à 15 sec GC (n=35) : médication (β agonistes à court et long terme, antagonistes des récepteurs du leucotriène)	Dispositif : Threshold IMT Intensité : 30% Pimax Fréquence : 7 x/ sem Durée de la séance : 30 min Durée totale : 6 sem	Fonction pulmonaire : CVF (%) : GI : ↑ de 84,77 à 97,91 (p < 0,001), GC : ↑ de 87,71 à 93 (p = 0,022) ; P_{intergroupe} : p = 0,14 VEMS (%) : GI : ↑ de 83,62 à 94,34 (p < 0,001), GC : ↑ de 84,91 à 88,20 (p = 0,286) ; P_{intergroupe} : p = 0,1 VEMS/CVF (%) : GI : ↓ de 98,78 à 98,44 (p = 0,857), GC : ↓ de 96,10 à 89,84 (p = 0,024) ; P_{intergroupe} : p = 0,008 DEM 25-75% (%) : GI : ↑ de 79,77 à 87,94 (p = 0,02), GC : ↓ 81,02 à 79,25 (p = 0,677) ; P_{intergroupe} : p = 0,133 Force des muscles respiratoires : Pimax (cmH₂O) : GI : ↑ de 79,17 à 108,54 (p < 0,001), GC : ↑ de 70,85 à 81,88 (p < 0,001) ; P_{intergroupe} : p < 0,001 Pimax (%) : GI : ↑ de 92,72 à 126,77 (p < 0,001), GC : ↑ de 76,89 à 88,90 (p = 0,001) ; P_{intergroupe} : p < 0,001 Pemax (cmH₂O) : GI : ↑ de 56,09 à 70,26 (p < 0,001), GC : ↑ de 57,48 à 60,31 (p = 0,039) ; P_{intergroupe} : p = 0,001 Pemax (%) : GI : ↑ de 50,77 à 63,62 (p < 0,001), GC : ↑ de 48,42 à 50,42 (p = 0,094) ; P_{intergroupe} : p < 0,001 Marqueurs inflammatoires : CRP (mg/dL) : GI : ↓ de 5,19 à 3,79 (p = 0,23), GC : ↓ de 4,44 à 3,37 (p = 0,027) ; P_{intergroupe} : p = 0,31
-----------------------------	-----	--	--	--

				TAS (mmol Trolox equiv. /L) : GI : ↑ de 1,89 à 2,11 (p = 0,020), GC : ↑ de 2,04 à 2,06 (p = 0,773) ; P_{intergroupe} : p = 0,064 TOS (μmol H₂O₂ equiv. /L) : GI : ↓ de 22,88 à 15,97 (p < 0,001), GC : ↓ de 19,25 à 15,05 (p < 0,001) ; P_{intergroupe} : p = 0,404 OSI (unité arbitraire) : GI : ↓ de 1,31 à 0,75 (p < 0,001), GC : de ↓ 0,97 à 0,75 (p < 0,001) ; P_{intergroupe} : p = 0,961 Périostine (ng/mL) : GI : ↓ de 8,88 à 7,41 (p < 0,001), GC : de ↓ 7,58 à 6,53 (p = 0,004) ; P_{intergroupe} : p = 0,058 TGF- β (ng/mL) : GI : ↓ de 6,36 à 5,33 (p = 0,009), GC : ↓ de 5,68 à 5,43 (p = 0,552) ; P_{intergroupe} : p = 0,803
--	--	--	--	--

Légende : valeurs pré et post traitement exprimées en valeurs moyennes hormis pour les résultats au ACQ6 exprimés en valeurs médianes, valeurs en gras : significatives (p ≤ 0,05)

ACQ6 : Asthma Control Questionnaire ; ACT : Asthma Control Test ; CPAP : Continuous Positive Airway Pressure ; CRP : C-reactive protein ; CVF : capacité vitale forcée ; DEM 25-75% : débit expiratoire moyen mesuré entre 25 et 75% de la CVF ; EME : entraînement des muscles expiratoires ; EMI : entraînement des muscles inspiratoires ; FeNO : fraction expirée d'oxyde nitrique ; GC : groupe contrôle ; GEMI : groupe entraînement des muscles inspiratoires ; GI : groupe intervention ; OSI : oxydative stress index ; P_{emax} : pression expiratoire maximale ; P_{imax} : pression inspiratoire maximale ; ppb : partie par milliard ; PRP : programme de réhabilitation pulmonaire (exercices de respiration diaphragmatique, exercices de contrôle et de retenue de la respiration, respiration nasale avec expiration lèvres pincées, manœuvres d'expiration passive, mobilisation de la cage thoracique, exercices de correction posturale, techniques comportementales basées sur la relaxation et exercices aérobie sur tapis de course ou cycloergomètre) ; RCT : Randomized Controlled Trial ; TAS : total antioxydant state ; TGF- β : Transforming growth factor-β ; TOS : Total oxidant state ; VEMS : volume expiratoire maximal en une seconde ; VNI-2P : ventilation non invasive à deux niveaux de pression

Tableau 2 : synthèse des études sur la mucoviscidose

Auteur (année)	Design de l'étude	Groupes (protocoles)	Intervention	Résultats
Emirza et al. (2021)	RCT	GI (n=14) : EME GC (n=14) : 6 sem d'EME à la plus basse intensité (5% Pemax)	Dispositif : Threshold PEP (Respironics, New Jersey, Inc.) Intensité : 30% Pemax (recalculée toutes les 2 sem) Fréquence : 2 x/ j, 5 j/ sem Durée de la séance : 20 min Durée totale : 6 sem	Fonction pulmonaire : CVF (%) : GI : ↓ de 88,42 à 86,92 (p = 0,724), GC : ↑ de 91 à 93,14 (p = 0,593) ; P _{intergroupe} : p = 0,581 VEMS (%) : GI : ↑ de 79,64 à 79,78 (p = 0,944), GC : ↑ de 82 à 84,5 (p = 0,556) ; P _{intergroupe} : p = 0,565 VEMS/CVF (%) : GI : ↓ de 92,57 à 92,42 (p = 0,9), GC : ↑ de 93,28 à 94,92 (p = 0,706) ; P _{intergroupe} : p = 0,854 DPT (L/ min) : GI : ↑ de 287,07 à 339,50 (p = 0,003), GC : ↑ de 238,64 à 258,35 (p = 0,003) ; P _{intergroupe} : p = 0,041 DPT (% prédit) : GI : ↑ de 74,97 à 88,72 (p = 0,003), GC : ↑ de 67,53 à 73,08 (p = 0,022) ; P _{intergroupe} : p = 0,043 Force des muscles respiratoires : Pimax (% prédit) : GI : ↑ de 69,15 à 77,89 (p = 0,023), GC : ↑ de 79,14 à 80,92 (p = 0,345) ; P _{intergroupe} : p = 0,103 Pimax (cmH ₂ O) : GI : ↑ de 60,79 à 67,71 (p = 0,028), GC : ↑ de 64,07 à 65,86 (p = 0,234) ; P _{intergroupe} : p = 0,565

				Pemax (% prédit) : GI : ↑ de 57,86 à 68,81 (p = 0,003), GC : ↓ de 67,35 à 67,22 (p = 0,861) ; P_{intergroupe} : p = 0,003 Pemax (cmH₂O) : GI : ↑ de 68,21 à 80,64 (p = 0,003), GC : ↓ de 73,79 à 73,43 (p = 0,972) ; P_{intergroupe} : p = 0,003 Capacité fonctionnelle à l'exercice : TM6 (m) : GI : ↑ de 526,78 à 575,32 (p = 0,035), GC : ↑ de 495,78 à 506,44 (p = 0,510) ; P_{intergroupe} : p = 0,077 Qualité de vie : CFQ-R (enfant) : changement significatif uniquement pour le domaine « Physical functioning » du test après intervention : GI : ↑ de 66,66 à 80,95 (p = 0,042), GC : ↑ de 60,49 à 67,28 (p = 0,352) ; P_{intergroupe} : non communiquée CFQ-R (adolescent : 14-18 ans) : aucun changement significatif pour aucun des domaines du test après intervention ; P_{intergroupe} : non communiquée
Zeren et al. (2019)	RCT	GI (n=18) : EMI + KR GC (n=18) : KR : exercices diaphragmatiques, expansion thoracique, spirométrie incitative, PEP oscillante, DP, percussion, techniques toux	Dispositif : Threshold IMT (Philips Respironics, UK) Intensité : 30% Pimax Fréquence : 2 x/ j Durée de la séance : 15 min Durée totale : 8 sem	Fonction pulmonaire : CVF (%) : GI : ↑ de 87,13 à 90,47 (p = 0,002), GC : ↑ de 88,91 à 92,06 (p = 0,001) ; P_{intergroupe} : p = 0,833 VEMS (%) : GI : ↑ de 79,36 à 82,93 (p = 0,006), GC : ↑ de 78,69 à 82,38 (p = 0,005) ; P_{intergroupe} : p = 0,968 DEP (%) : GI : ↑ de 78,38 à 90,56 (p < 0,001), GC : ↑ de 73,84 à 87,71 (p < 0,001) ; P_{intergroupe} : p = 0,829

				<i>Force des muscles respiratoires :</i> Pimax (cmH₂O) : GI : ↑ de 67,74 à 98,86 (p < 0,001), GC : ↑ de 71,29 à 84,23 (p < 0,001) ; P_{intergroupe} : p < 0,001 Pemax (cmH₂O) : GI : ↑ de 91,78 à 99,03 (p = 0,002), GC : ↑ de 86,14 à 91,88 (p = 0,002) ; P_{intergroupe} : p = 0,534 <i>Capacité fonctionnelle :</i> TM6 (m) : GI : ↑ de 561 à 603 (p < 0,001), GC : ↑ de 544 à 584 (p < 0,001) ; P_{intergroupe} : p = 0,936 SpO₂ au repos (%) : GI : ↑ de 97,56 à 97,71 (p = 0,104), GC : ↑ de 97,69 à 97,88 (p = 0,083) ; P_{intergroupe} : p = 0,756 <i>Stabilité posturale :</i> PST (Indice de stabilité globale) : GI : ↓ de 2,31 à 2,19 (p = 0,658), GC : ↓ de 2,39 à 2,21 (p = 0,086) ; P_{intergroupe} : p = 0,968 LOST (0-100) score global : GI : ↑ de 44,24 à 52,25 (p = 0,001), GC : ↑ de 42,83 à 47,44 (p = 0,034) ; P_{intergroupe} : p = 0,480
--	--	--	--	--

Bieli et al. (2017)	Cross-over randomisé	Période contrôle (PC) (8 sem) : KR standard Période intervention (PI) (8 sem) : EME (endurance) Groupe 1 (n=11) : PI → PC Groupe 2 (n=11) : PC → PI	Dispositif : SpiroTiger Intensité : déterminée en fonction de la MVV et de la CVF Fréquence : 2 x/ j, 5 j/ sem Durée de la séance : 5-10 min/ séance Durée totale : 8 sem	Fonction pulmonaire : (valeurs relevées à la fin des périodes) CVF (z-score) : PI : -1,10 vs PC : -1,17 (p = 0,472) VEMS (z-score) : PI : -1,48 vs PC : -1,62 (p = 0,436) DEM 25-75% (z-score) : PI : -1,59 vs PC : -1,92 (p = 0,171) Qualité de vie : (fin des périodes) CFQ (%) : PI : 74,56 vs PC : 74,31 (p = 0,808) Sévérité des symptômes : (fin des périodes) CFCS (score) : PI : 17,82 vs PC : 18,64 (p = 0,253) Test d'endurance des muscles respiratoires (min) : (fin des périodes) PI : 13,84 vs PC : 6,81 (p < 0,01) Test sur cycloergomètre à charge constante (min) : (fin des périodes) PI : 9,51 vs PC : 8,71 (p = 0,169)
----------------------------	----------------------	--	--	--

Légende : valeurs pré et post traitement exprimées en valeurs moyennes, valeurs en gras : significatives ($p \leq 0,05$)

CFCS : Cystic Fibrosis Clinical Score ; CFQ : Cystic Fibrosis Questionnaire ; CFQ-R : Cystic Fibrosis Questionnaire-Revised ; CVF : capacité vitale forcée ; DEP : débit expiratoire de pointe ; DP : drainage postural ; DPT : débit expiratoire de pointe à la toux ; DEM 25-75% : débit expiratoire moyen mesuré entre 25 et 75% de la CVF ; EME : entraînement des muscles expiratoires ; EMI : entraînement des muscles inspiratoires ; GC : groupe contrôle ; GI : groupe intervention ; KR : kinésithérapie respiratoire (KR standard : exercices d'expansion thoracique, percussion, saut sur trampoline, drainage autogène, utilisation d'appareils de PEP oscillante) ; LOST : Limits of Stability Test ; MVV : ventilation maximale volontaire ; Pemax : pression expiratoire maximale ; Pimax : pression inspiratoire maximale ; PEP : pression expiratoire positive ; PST : Postural stability test ; RCT : randomized controlled trial ; SpO₂ : saturation pulsée en oxygène ; TM6 : test de marche de 6 minutes, VEMS : volume expiratoire maximal en une seconde

Tableau 3 : synthèse de l'étude sur la circulation de Fontan

Auteur (année)	Design de l'étude	Groupes (protocole)	Intervention	Résultats
Neidenbach et al. (2023)	RCT	GI (n=18) : - Phase d'échauffement : 20 respirations à résistance basse (niveau 1 ou inférieur au niveau d'entraînement) - EMI : 3 séries de 30 respirations assis ou debout. Inspiration rapide avec pince nez. Expiration lente et sans charge. GC (n=19) : AVJ sans EMI	Dispositif : POWERbreathe medic (HaB International Ltd, Southam, UK) Intensité : 1 ^{er} j d'entraînement : niveau 1 = 10 cmH ₂ O pendant 30 respirations puis ↑ de 5 ou 10 cmH ₂ O pour exécuter 30 respirations. Fréquence : 1 à 2 x/j Durée de la séance : / Durée totale : 6 mois	Fonction pulmonaire : ** CVF (L) : GI : ↑ de 2,58 à 2,84, GC : ↑ de 2,3 à 2,57 ; P _{intergroupe} : p = 0,946 CVF prédite (%) : GI : ↑ de 81,8 à 83,7, GC : ↑ de 79,3 à 82,6 ; P _{intergroupe} : p = 0,669 VEMS (L) : GI : ↑ de 2,25 à 2,45, GC : ↑ de 2,1 à 2,28 ; P _{intergroupe} : p = 0,707 VEMS prédit (%) : GI : ↑ de 81,8 à 83,2, GC : ↑ de 82,8 à 84,1 ; P _{intergroupe} : p = 0,884 VEMS/CVF (%) : GI : ↓ de 87,26 à 86,13, GC : ↓ de 91,36 à 89,3 ; P _{intergroupe} : p = 0,576 VEMS/CVF prédit (%) : GI : ↓ de 100,6 à 99,35, GC : ↓ de 105 à 102,82 ; P _{intergroupe} : p = 0,639 Capacité à l'exercice : ** VO ₂ max (mL/min/kg) : GI : ↑ de 35,74 à 36,76, GC : ↑ de 32,98 à 33,93 ; P _{intergroupe} : p = 0,893 VO ₂ max prédite (%) : GI : ↓ de 79,5 à 78,97, GC : ↑ de 80,1 à 81,88 ; P _{intergroupe} : p = 0,793

				FC au repos (bpm) : GI : ↓ de 84,3 à 82,59, GC : ↑ de 82,5 à 83,37 ; P_{intergroupe} : p = 0,578 FC max (bpm) : GI : ↓ de 171,95 à 171, GC : ↑ de 168,05 à 170,11 ; P_{intergroupe} : p = 0,452 TAS au repos (mmHg) : GI : ↓ de 114,6 à 110,53, GC : ↑ de 110,5 à 114,63 ; P_{intergroupe} : p = 0,066 TAS max (mmHg) : GI : ↑ de 163,45 à 165,29, GC : ↑ de 152,05 à 157,21 ; P_{intergroupe} : p = 0,91 SpO₂ au repos (%) : GI : ↑ de 91,5 à 94,4, GC : ↑ de 93,7 à 94,1 ; P_{intergroupe} : p = 0,014 SpO₂ à l'effort max (%) : GI : ↑ de 87,1 à 91, GC : ↑ de 87 à 89,1 ; P_{intergroupe} : p = 0,225 Charge de travail max (W) : GI : ↑ de 123,89 à 140,44, GC : ↑ de 111,33 à 118,5 ; P_{intergroupe} : p = 0,113
--	--	--	--	--

**** : P-valeurs pré-post non communiquées**

Légende : valeurs pré et post traitement exprimées en valeurs moyennes, valeurs en gras : significatives ($p \leq 0,05$)

AVJ : activités de la vie quotidienne ; CVF : capacité vitale forcée ; EMI : entraînement des muscles inspiratoires ; FC : fréquence cardiaque (bpm : battements par minutes) ; GC : groupe contrôle ; GI : groupe intervention ; RCT : Randomized Controlled Trial ; SpO₂ : saturation pulsée en oxygène ; TAS : tension artérielle systolique ; VEMS : volume expiratoire maximal en une seconde ; VO₂ max : consommation maximale en oxygène

Tableau 4 : synthèse des études sur les maladies neuromusculaires

Auteur (date)	Design de l'étude	Groupes (protocole)	Intervention	Résultats
Human et al. (2024)	RCT cross-over	Intervention : EMI : 3 séries de 10 respirations Groupe 1 (PC en 1^{er}) (n=10) : période de repos (3 mois) → période intervention (3 mois) Groupe 2 (PI en 1^{er}) (n=13) : période d'intervention (3 mois) → période de repos (3 mois)	Dispositif : Powerbreathe K3 (HaB International Ltd, Southam, UK) Intensité : 30% Pimax Fréquence : 2 x/j, 5 à 7x/ sem Durée de la séance : / Durée totale : 3 mois	<i>Valeurs relevées pendant les périodes intervention et contrôle :</i> Fonction pulmonaire : CV (L) : PI : ↓ de 1,42 à 1,38 (p = 0,63), PC : ↑ de 1,41 à 1,50 (p = 0,17) ; P_{intergroupe} : p = 0,20 CVF (L) : PI : ↓ de 1,55 à 1,50 (p = 0,49), PC : / (p = 0,90) ; P_{intergroupe} : p = 0,53 VEMS (L/s) : PI ↑ de 1,34 à 1,37 (p = 0,44), PC : ↓ de 1,43 à 1,37 (p = 0,09) ; P_{intergroupe} : p = 0,27 DEP (L/min) : PI : ↓ de 189,09 à 188,26 (p = 0,94), PC : ↓ de 200,09 à 195,26 (p = 0,51) ; P_{intergroupe} : p = 0,76 DPT (L/min) : PI : ↑ de 200,87 à 238,18 (p = 0,0005), PC : ↓ de 220 à 204,57 (p = 0,12) ; P_{intergroupe} : p = 0,0005 Force des muscles respiratoires : Pimax (cmH₂O) : PI : ↑ de 40,57 à 55,13 (p = 0,0002), PC : ↑ de 46,61 à 49,65 (p = 0,23) ; P_{intergroupe} : p = 0,01 PINR (cmH₂O) : PI : ↑ de 46 à 53 (p = 0,01), PC : ↑ de 47 à 54 (p = 0,17) ; P_{intergroupe} : p = 0,45

				Evènements indésirables : nombre d'hospitalisation non programmées pour complications respiratoires (infections bactériennes ou virales) après EMI : PI : de 0 à 0 (p = 0,60), PC : de 0 à 0 (p = 0,21) Niveau d'effort perçu : Echelle graphique OMNI (score) : PI : de 3 [2–4] à 3 [1–4] (entre les sem 6 et 8) (p=0,02) PI : différence des scores entre sem 0-2 et sem 10-12 : NS (p = 0,32) PI : ↓ des scores entre semaine 0-2 et 3 mois : score médian de -1 [-2-0]
Rodríguez et al. (2014)	Etude prospective	Intervention : EMI + EME EMI : 3 séries de 3 min de respiration avec 1 min de repos entre chaque série EME : 3 séries de 15 expirations avec 1 min de repos entre chaque série Nombre de sujets : 18	Dispositif : Threshold IMT ou Threshold PEP (Philips Respironics, Murrysville, PA, USA) Intensité : 30-50 % de la Pimax et Pemax Fréquence : 1x/ j, au moins 5x/ sem Durée de la séance : EMI : 11 min ; EME : / Durée totale : 39 sem (en moyenne)	Fonction pulmonaire : DEP (L/min) : ↑ de 85 L/min (p = 0,001) DPT (L/min) : ↑ de 55 L/min (p = 0,001) Force des muscles respiratoires : Pimax (cmH₂O) : ↑ de 25 cmH₂O (p = 0,004) Pimax (% valeur prédite) : ↑ de 44,5 à 63% (p = 0,01) Pemax (cmH₂O) : ↑ de 15 cmH₂O (p = 0,007) Pemax (% valeur prédite) : ↑ de 28 à 33% (p = 0,002)

Légende : valeurs pré et post traitement exprimées en valeurs moyennes (hormis pour les valeurs de la PINR, le nombre d'hospitalisation ou d'infection des voies respiratoires ainsi que les scores à l'Echelle graphique OMNI dans l'étude de Human et al. (2024) exprimées en valeurs médianes), valeurs en gras : significatives (p ≤ 0,05)

CV : capacité vitale ; CVF : capacité vitale forcée ; DEP : débit expiratoire de pointe ; DPT : débit de pointe à la toux ; EME : entraînement des muscles expiratoires ; EMI : entraînement des muscles inspiratoires ; NS : non significatif ; PC : période contrôle ; Pemax : pression expiratoire maximale ; PI : période intervention ; Pimax : pression inspiratoire maximale ; PINR : pression inspiratoire nasale de reniflement ; RCT : randomized controlled trial ; VEMS : volume expiratoire maximal en une seconde

Tableau 5 : synthèse des études sur la paralysie cérébrale

Auteur (date)	Design de l'étude	Groupes (protocoles)	Intervention	Résultats
Kepenek-Varol et al. (2021)	RCT	GI (n=15) : EMI + PTN GC (n=15) : PTN	Dispositif : Threshold IMT (Philips-Respironics, Pittsburgh, USA) Intensité : 30% Pimax Fréquence : 2 x/j, 7 x/sem Durée de la séance : 15 min Durée totale : 8 sem	Fonction pulmonaire : CVF (% prédit) : GI : ↑ de 82,07 à 83,33 (p = 0,777), GC : ↑ de 80,92 à 82,91 (p = 0,431) ; P _{intergroupe} : p = 0,885 VEMS (% prédit) : GI : ↑ de 86,53 à 86,87 (p = 0,774), GC : ↑ de 87,47 à 87,53 (p = 0,951) ; P _{intergroupe} : p = 0,866 VEMS/CVF (%) : GI : ↓ de 103,91 à 102,37 (p = 0,643), GC : ↑ de 101,26 à 102,17 (p = 0,804) ; P _{intergroupe} : p = 0,652 DEP (% prédit) : GI : ↑ de 69,21 à 77,16 (p = 0,019), GC : ↑ de 67,55 à 76,85 (p = 0,026) ; P _{intergroupe} : p = 0,772 Force des muscles respiratoires : Pimax (cmH ₂ O) : GI : ↑ de 58,93 à 87,20 (p = 0,001), GC : ↑ de 64,47 à 69,76 (p = 0,001) ; P _{intergroupe} : p = 0,001 Pemax (cmH ₂ O) : GI : ↑ de 61,93 à 94,53 (p = 0,001), GC : ↑ de 70,60 à 74,47 (p = 0,001) ; P _{intergroupe} : p = 0,001 Capacité fonctionnelle : TM6 (m) : GI : ↑ de 522,40 à 572,27 (p = 0,001), GC : ↑ de 518,02 à 562,47 (p = 0,001) ; P _{intergroupe} : p = 0,767 Equilibre et stabilité posturale : PST : Indice de stabilité globale : GI : ↓ de 1,79 à 1,13 (p = 0,001) ; GC : ↓ de 1,74 à 1,09 (p = 0,001) ; P _{intergroupe} : p = 0,896

				LOST (0-100) : Score global : GI : ↑ de 25,06 à 53,85 (p = 0,001), GC : ↑ de 28,40 à 50,98 (p = 0,001) ; P_{intergroupe} : p = 0,084 Test d'intégration sensorielle et d'équilibre : amélioration significative pour les deux groupes uniquement pour les items : « yeux ouverts sur surface ferme » : GI : ↓ de 1,67 à 1,04 (p = 0,001), GC : ↓ de 1,62 à 1,11 (p = 0,001) ; P_{intergroupe} : p = 0,389 « yeux ouverts sur surface en mousse » : GI : ↓ de 1,90 à 1,53 (p = 0,016), GC : ↓ de 2,14 à 1,86 (p = 0,031) ; P_{intergroupe} : p = 0,614
Anand et Karthikbabu (2021)	RCT	GI (n= 20) : EMI : 10 à 15 inspirations profondes, 30 sec de repos entre chaque. Position assise, lèvres pincées correctement autour de l'embout buccal + KS GC (n=20) : KS	Dispositif : Threshold IMT (Respironics Inc, Murrysville, PA, USA) Intensité : au début à 30% Pimax (puis ↑ de 5% chaque sem) Fréquence : 3 x/ sem Durée de la séance : 15 min Durée totale : 6 sem	Fonction pulmonaire : CVF (% prédite) : GI : ↑ de 60,1 à 60,8 (6 sem)* et 68,9 (2 mois)*, GC : ↑ de 63,2 à 70,6 (6 sem)* et 72,8 (2 mois)* ; Interaction groupe/temps : p = 0,731 VEMS (% prédit) : GI ↑ de 62 à 63,1 (6 sem)* et 64,5 (2 mois)*, GC : ↓ de 68,4 à 66,1 (6 sem)* et ↑ 72,6 (2 mois)* ; Interaction groupe/temps : p = 0,794 DEP (% prédit) : GI : ↑ de 56,7 à 74,4 (6 sem) (p < 0,05 après 6 sem) et ↓ 66 (2 mois)*, GC : ↓ de 58,7 à 57 (6 sem)* et ↑ 66,9 (2 mois)* ; Interaction groupe/temps : p = 0,024

* : P-valeur pré-post $\geq 0,05$

				Force des muscles respiratoires : Pimax (cmH₂O) : GI : ↑ de 31,3 à 34,7 (6 sem)* et 40,5 (2 mois) (p < 0,05 après 2 mois), GC : ↑ de 26,9 à 30,9 (6 sem)* et 31,1 (2 mois)* ; Interaction groupe/ temps : p = 0,18 Pemax (cmH₂O) : GI : ↑ de 29,1 à 29,9 (6 sem)* et ↓ 29,6 (2 mois)*, GC : ↑ de 28,8 à 32,4 (6 sem)* et 36,4 (2 mois)* ; Interaction groupe/temps : p = 0,17 Capacité fonctionnelle : TM6 (m) : GI : ↑ de 213,3 à 230,8 (6 sem)* et ↓ 223,4 (2 mois)*, GC : ↓ de 281 à 278,7 (6 sem)* et 268,9 (2 mois)* ; Interraction groupe/ temps : p = 0,35
Keles et al. (2018)	RCT	GI (n=13) : EMI : respiration diaphragmatique à travers le dispositif, 10 à 15 respirations, 5 à 10 sec de repos entre les respirations + 3 fois 40 min/ semaine de KC (activités conventionnelles sur tapis, étirement, exercices d'amplitude, facilitation	Dispositif : Threshold IMT (Philips-Respironics, Pittsburgh, PA, USA) Intensité : 30% Pimax Fréquence : 2 x/j, 7 x/ sem Durée de la séance : 15 min Durée totale : 6 sem	Fonction pulmonaire : CVF (%) : GI : ↑ de 80,3 à 81,6 (p = 0,565), GC : ↑ de 84,77 à 86 (p = 0,608) ; P_{intergroupe} : p = 0,981 VEMS (%) : GI : ↑ de 88,30 à 88,90 (p = 0,797), GC : ↑ de 91,77 à 94 (p = 0,372) ; P_{intergroupe} : p = 0,633 VEMS/CVF : GI : ↑ de 105,5 à 106,7 (p = 0,277), GC : ↓ de 106 à 105,44 (p = 0,628) ; P_{intergroupe} : 0,274 DEM 25-75% (%) : GI : ↓ de 88,1 à 87,8 (p = 0,828), GC : ↑ de 87,66 à 89,44 (p = 0,483) ; P_{intergroupe} : p = 0,539

		des schémas de mouvement) GC (n=12) : Entraînement fictif (5% Pimax) pendant 6 sem + KC		DEP (%) : GI : ↑ de 69,3 à 77,1 (p = 0,001), GC : ↑ de 69,36 à 73,18 (p = 0,049) ; P _{intergroupe} : p = 0,127 <i>Force des muscles respiratoires :</i> Pimax (cmH ₂ O) : GI : ↑ de 65,83 à 94,5 (p < 0,001), GC : ↑ de 51,54 à 57,36 (p = 0,041) ; P _{intergroupe} : p < 0,001 Pimax (% prédit) : GI : ↑ de 89,92 à 129,65 (p < 0,001), GC : ↑ de 69,03 à 77,25 (p = 0,041) ; P _{intergroupe} : p < 0,001 Pemax (cmH ₂ O) : GI : ↑ de 68 à 82,5 (p = 0,001), GC : ↑ de 52,9 à 60,9 (p = 0,023) ; P _{intergroupe} : p = 0,165 Pemax (% prédit) : GI : ↑ de 74,14 à 89,23 (p < 0,001), GC : ↑ de 56,2 à 65,85 (p = 0,010) ; P _{intergroupe} : p = 0,265 <i>Capacité fonctionnelle :</i> TM6 (m) : GI : ↑ de 500,21 à 566,6 (p < 0,001), GC : ↑ de 456,69 à 465,89 (p = 0,169) ; P _{intergroupe} : p < 0,001 TM6 (% prédit) : GI : ↑ de 75,86 à 85,98 (p < 0,001), GC : ↑ de 69,91 à 71,30 (p = 0,19) ; P _{intergroupe} : p < 0,001 <i>Contrôle du tronc : TCMS :</i> TCMS Total (0-58) : GI : ↑ de 47,08 à 51,58 (p < 0,001), GC : ↑ de 47,18 à 47,81 (p = 0,167) ; P _{intergroupe} : p < 0,001
--	--	---	--	--

				Activités de la vie quotidienne : PEDI FSS (0-100) : Domaine soins personnels : GI : ↑ de 90,86 à 93,15 (p = 0,002), GC ↑ de 86,30 à 86,69 (p = 0,410) ; P_{intergroupe} : p = 0,049 Domaine mobilité : GI : ↑ de 94,63 à 98,02 (p < 0,001), GC : ↑ de 95,06 à 95,68 (p = 0,427) ; P_{intergroupe} : p = 0,016 Domaine fonction sociale : GI : ↑ de 94,1 à 96,6 (p = 0,035), GC : ↓ de 93,42 à 92,02 (p = 0,252) ; P_{intergroupe} : p = 0,025 PEDI CAS (score) : Domaine soins personnels : ↑ de 91,45 à 92,7 (p = 0,243), GC : ↑ de 85,68 à 86,81 (p = 0,38) ; P_{intergroupe} : p = 0,941 Domaine mobilité : ↑ de 96,42 à 97,85 (p = 0,147), GC : ↑ de 93,24 à 94,8 (p = 0,13) ; P_{intergroupe} : p = 0,925 Domaine fonction sociale : ↑ de 96,33 à 97,66 (p = 0,155), GC : ↑ de 93,45 à 94,54 (p = 0,261) ; P_{intergroupe} : p = 0,855 Qualité de vie : CP QOL-Child (0-100) : Bien-être social et acceptation : GI : ↑ de 78,19 à 88,63 (p < 0,001), GC : ↓ de 78,03 à 74,73 (p = 0,138) ; P_{intergroupe} : p < 0,001 Fonctionnel : GI ↑ de 76,56 à 80,15 (p = 0,006), GC : ↓ de 70,91 à 69,4 (p = 0,234) ; P_{intergroupe} : p = 0,007
--	--	--	--	---

				Participation et santé physique : GI : ↑ de 88,19 à 92,62, GC (p = 0,12), GC : ↑ de 76,62 à 80,31 (p = 0,106) ; P_{intergroupe} : p = 0,572 Bien-être émotionnel : GI : ↑ de 72,67 à 80,22 (p = 0,016) ; GC : ↑ de 60,94 à 61,43 (p = 0,872) ; P_{intergroupe} : p = 0,105 Accès aux services : GI : ↑ de 34,79 à 35,48 (p = 0,638), GC : ↑ de 30,07 à 33,69 (p = 0,064) ; P_{intergroupe} : p = 0,073 Douleur et impact du handicap : GI : ↓ de 32,94 à 24,30 (p = 0,059), GC : ↑ de 41,85 à 42,09 (p = 0,957) ; P_{intergroupe} : p = 0,17 Santé familiale : GI : ↑ de 67,18 à 67,55 (p = 0,828), GC : ↓ de 60,22 à 58,98 (p = 0,483) ; P_{intergroupe} : p = 0,511
--	--	--	--	--

Lee et al. (2014)	RCT (rapport préliminaire)	GI (n=9) : entraînement en endurance : position assise, attention portée sur le moniteur du dispositif, pince nez + 30 min de KC (mises assise, transferts, marche, montées d'escaliers) GC (n=11) : KC (3x/ sem pendant 4 sem)	Dispositif : SpiroTiger (Idiag AG, Volketswil, Switzerland) Intensité : FR = 14-15 cycles/ min Fréquence : 3 j/ sem Durée de la séance : 15 min/ j Durée totale : 4 sem	Fonction pulmonaire : CVF (L) : GI : ↑ de 1,0 à 1,5 (p < 0,001), GC : de 1,4 à 1,4*; P _{intergroupe} : p < 0,001 VEMS (L) : GI : ↑ de 1,0 à 1,4 (p < 0,001), GC : ↑ de 1,1 à 1,2* ; P _{intergroupe} : p = 0,006 DEP (L/s) : GI : ↑ de 2,2 à 2,5*, GC : ↓ de 2,4 à 2,2* ; ** CV (L) : GI : ↑ de 2,0 à 2,3*, GC : ↓ de 2,2 à 2,0* ; ** VC (L) : GI : de 0,3 à 0,3*, GC : ↑ de 0,4 à 0,5* ; ** VRE (L) : GI : ↑ de 0,7 à 0,9*, GC : de 0,6 à 0,6* ; ** VRI (L) : GI : ↑ de 1,0 à 1,1*, GC : ↓ de 1,0 à 0,8* ; **
--------------------------	----------------------------	--	--	--

* : P-valeur pré-post $\geq 0,05$

** : P_{intergroupe} $\geq 0,05$

Légende : valeurs pré et post traitement exprimées en valeurs moyennes, valeurs en gras : significatives ($p \leq 0,05$)

CP QOL-Child : the Cerebral Palsy Quality of Life Questionnaire for Children ; CV : capacité vitale ; CVF : capacité vitale forcée ; DEM 25-75 : débit expiratoire moyen mesuré entre 25 et 75% de la CVF ; DEP : débit expiratoire de pointe ; EMI : entraînement des muscles inspiratoires ; FR : fréquence respiratoire ; GC : groupe contrôle ; GI : groupe intervention ; KC : kinésithérapie conventionnelle ; KS : kinésithérapie sensorimotrice (jeux avec balle, franchissement d'obstacles, sauts sur trampoline, montées d'escaliers, grimpeur sur des rampes, course, exercices des membres supérieurs, exercices d'équilibre, exercices de mobilité) ; LOST : Limits Of Stability Test ; PEDI-FSS : Pediatric Evaluation of Disability Inventory - Functional Skill Scales ; PEDI-CAS : Pediatric Evaluation of Disability Inventory- Caregiver Assistance Scale ; Pemax : pression expiratoire maximale ; Pimax : pression inspiratoire maximale ; PST : Postural Stability Test ; PTN : programme de thérapie neurodéveloppementale (exercices de déplacement du poids, facilitation des réactions de redressement, de protection et d'équilibration, étirement des membres supérieurs et inférieurs, utilisation des entrées sensorielles, exercices d'équilibre dont des exercices réalisés avec le « Biodex Balance System ») ; RCT : Randomized Controlled Trial ; TCMS : Trunk Control Measurement Scale ; TM6 : test de marche de 6 minutes ; VC : volume courant ; VEMS : volume expiratoire maximal en une seconde ; VRE : volume de réserve expiratoire ; VRI : volume de réserve inspiratoire

Résumé :

Objectifs : L'objectif était de répondre à la question : « Quels sont les effets de l'entraînement des muscles respiratoires en pédiatrie ? ». Le but était de déterminer les différents types d'entraînement, de décrire leurs modalités et d'évaluer les bénéfices de l'entraînement des muscles respiratoires en pédiatrie.

Méthode : La recherche documentaire a débuté par la création des équations de recherche sur base des critères PICO(S). Elles ont ensuite été introduites sur 3 bases de données (Embase, Pubmed et Cochrane Library). A l'aide des critères d'éligibilité, 14 articles ont été inclus.

Résultats : L'entraînement en force des muscles inspiratoires avec le dispositif Threshold IMT et une intensité de 30% de la Pimax est fréquemment décrit malgré une hétérogénéité importante des protocoles. De plus, l'entraînement des muscles respiratoires semble avoir une incidence sur la fonction pulmonaire, la force et l'endurance des muscles respiratoires, la SpO₂ au repos, le contrôle de l'asthme, les capacités fonctionnelles, la qualité de vie et le contrôle du tronc. Ces résultats sont variables selon les pathologies étudiées à savoir l'asthme, la mucoviscidose, la circulation de Fontan, les maladies neuromusculaires et la paralysie cérébrale.

Conclusion : L'entraînement des muscles respiratoires semble être un traitement complémentaire pour traiter les troubles ventilatoires de ces enfants. Néanmoins, il persiste un manque de recommandations concernant les protocoles.