



HAL
open science

Exploration fonctionnelle respiratoire : explorer l'enfant

N. Beydon, R. Abou Taam, C. Delclaux, C. Du Boisbaudry, R. Gauthier, I. Ioan, M. Le Bourgeois, M.-A. Giroux-Metges, Stefan Matecki

► To cite this version:

N. Beydon, R. Abou Taam, C. Delclaux, C. Du Boisbaudry, R. Gauthier, et al.. Exploration fonctionnelle respiratoire : explorer l'enfant. *Revue des Maladies Respiratoires*, 2024, 41 (7), pp.488-497. 10.1016/j.rmr.2024.06.005 . hal-04700871

HAL Id: hal-04700871

<https://hal.science/hal-04700871v1>

Submitted on 24 Sep 2024

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

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

Exploration fonctionnelle respiratoire : explorer l'enfant

[Pulmonary function test: The testing of children]

N Beydon ¹, R Abou Taam ², C Delclaux ³, C Du Boisbaudry ⁴, R Gauthier ⁵, I Ioan ⁶, M Le Bourgeois ², M-A Giroux-Metges ⁴, S Matecki ⁷; Groupe Efr pédiatrique français

¹ Inserm U938, unité fonctionnelle d'explorations fonctionnelles respiratoire et somnologie, centre de recherche Saint-Antoine, hôpital Armand-Trousseau, Sorbonne université, AP-HP, 75012 Paris, France. Electronic address: nicole.beydon@aphp.fr.

² Laboratoire d'explorations fonctionnelles respiratoires pédiatriques, service de pneumologie et allergologie pédiatriques, hôpital Necker-Enfants-Malades, université de Paris, AP-HP, Paris, France.

³ Inserm NeuroDiderot, service de physiologie et centre du sommeil, hôpital Robert-Debré, université Paris-Cité, AP-HP, 75019 Paris, France.

⁴ EA 4324 Orphy, service d'explorations fonctionnelles, centre hospitalier de Brest, 29200 Brest, France.

⁵ Service de cardiologie et pneumo-allergologie pédiatriques, unité d'explorations fonctionnelles respiratoires pédiatriques, CHU d'Amiens-Picardie, Amiens, France.

⁶ Service de physiologie, unité d'explorations fonctionnelles pédiatriques, hôpital d'Enfants, CHRU de Nancy, Nancy, France.

⁷ Inserm U1046, Physiology and experimental Medicine: Heart-Muscle UMR CNRS 9214, Unité d'Exploration Fonctionnelle Pédiatrique, Université de Montpellier, CHU de Montpellier, Montpellier, France.

Keywords:

Exploration fonctionnelle respiratoire; Fonction respiratoire; Lung function; Pediatrics; Pulmonary function test; Pédiatrie; Resistance; Résistance; Spirometry; Spirométrie.

***Auteur correspondant.**

Service de physiologie-explorations fonctionnelles, unité fonctionnelle d'EFR et de somnologie, hôpital Armand-Trousseau, 75571 Paris cedex 12, France.

Adresse e-mail :

(N. Beydon).

Abstract

In paediatrics, the pulmonary function test (PFT) is most often performed to support the diagnosis or in follow-up of asthma patients. Whatever the pathology responsible for respiratory symptoms and/or functional impairment, repeated PFTs make it possible to establish a prognosis (pulmonary function trajectories...) and to orient preventive interventions. PFT can be performed routinely from the age of three years, provided that the following requirements are met: suitable techniques and equipment, staff trained to apply the techniques and to receive young children, reference values for each technique indicating the limits of normal values and of between-test significant variation. From the age of three, children can be subjected to tidal breathing measurement of: resistance of the respiratory system (oscillometry, Rrs; airflow interruption, Rint) or of airways specific resistance (sRaw) and functional residual capacity (by applying a dilution technique). With maturity, the child will become capable of mobilizing his or her slow vital capacity to measure total lung capacity (TLC), once again by applying a dilution technique, then later by breathing against a closed shutter (plethysmography TLC and Raw). Finally, the child will be able to carry out forced expiration (forced spirometry) along with all of the other PFTs. It is important to take into account the paediatric adaptations specified in the international recommendations regarding the performance, reproducibility and quality of PFTs targeting this population.

Résumé

L'exploration fonctionnelle respiratoire (EFR) de l'enfant est le plus souvent réalisée pour étayer le diagnostic ou participer au suivi d'un asthme. Quelle que soit la pathologie respiratoire motivant l'EFR, sa répétition permet d'établir un pronostic (trajectoires) et de résistance guider les actions de prévention. Une EFR est réalisable en routine dès l'âge de 3 ans sous réserve de disposer : de techniques et matériels de mesure adaptés, d'un personnel formé à ces techniques et à l'accueil des jeunes enfants, de normes pour chaque technique avec les limites de la normale et celles de la variation significative. Dès cet âge, l'enfant peut réaliser en volume courant des mesures : de résistance du système respiratoire (par oscillométrie, Rrs, ou interruption du débit, Rint) ou spécifique des voies aériennes (sRaw), du volume de repos par une technique de dilution. Avec la maturité deviendront possible la mobilisation de la capacité vitale lente et donc de capacité pulmonaire totale (CPT) en dilution, puis des respirations contre une valve fermée (CPT en pléthysmographie, Raw), et enfin l'expiration forcée (spirométrie forcée) et toutes les autres mesures de fonction respiratoire. Il faut appliquer les aménagements pédiatriques des recommandations internationales concernant la réalisation, la reproductibilité et la qualité des mesures d'EFR.

Abréviations

AX aire sous la courbe de la réactance en oscillométrie

CRF capacité résiduelle fonctionnelle

CPT capacité pulmonaire totale

CVF capacité vitale forcée

Zrs impédance du système respiratoire par oscillométrie

LIN et LSN limite inférieure et supérieure de la normale

Xrs réactance du système respiratoire par oscillométrie

Raw résistance des voies aériennes par pléthysmographie corporelle

Rrs résistance du système respiratoire par oscillométrie

Rint résistance du système respiratoire par interruption du débits

Raw résistance spécifique des voies aériennes par pléthysmographie corporelle

VEM0,75 volume expiré maximal en 0,75 seconde

VEMS volume expiré maximal en 1 seconde

VR volume résiduelVRE volume de réserve expiratoire

Éléments d'interrogatoire et généralités

La fonction respiratoire à la naissance et l'environnement précoce conditionnent la fonction respiratoire à l'âge adulte, il est donc raisonnable, autant que faire se peut, de recueillir les facteurs délétères auxquels le sujet aurait été exposé à un jeune âge. L'exposition précoce et cumulée à des facteurs tels que le tabagisme maternel in utero, le tabagisme passif ensuite, la prématurité, avec ou sans dysplasie bronchopulmonaire, les infections sévères des voies respiratoires, la pollution atmosphérique (dont les composés organiques volatils) prédisposent à une réduction de la fonction respiratoire maximale à l'âge adulte. Les antécédents chirurgicaux thoraciques sont importants à noter car ils peuvent conduire à une réduction du volume pulmonaire dont la compensation dépendra de la cause(qualité du poumon restant), de l'âge de l'intervention chirurgicale (compensation d'autant plus importante que l'intervention est précoce, < 1—2 ans), de l'étendue de la résection éventuelle et de la voie d'abord (thoroscopie versus thoracotomie). Il peut aussi s'agir d'une restriction des volumes en cas de chirurgie thoracique pour malformations pulmonaires (hypoplasie pulmonaire homolatérale à une hernie diaphragmatique, résections étendues pour malformations kystiques), ou extra-pulmonaires (cardiovasculaires, rachidiennes) [1] ou d'une obstruction des voies ariennes (trachéomalacie en cas d'atrésie de l'œsophage ou de malformations des gros vaisseaux comprimant la trachée).

La maladie respiratoire chronique la plus fréquente à l'âge pédiatrique étant l'asthme, c'est la pathologie la plus fréquemment à l'origine de la réalisation d'une exploration fonctionnelle respiratoire (EFR) chez l'enfant. Les principales autres pathologies justifiant d'une EFR initiale (diagnostique) et éventuellement d'un suivi fonctionnel sont rapportées dans le Tableau 1. Après le bilan fonctionnel initial, la fonction respiratoire est surveillée régulièrement pour ajuster la prise en charge thérapeutique (préserver la meilleure fonction respiratoire possible) et suivre la croissance pulmonaire.

Spécificité de l'accueil pédiatrique

Accueillir un enfant dans le cadre de la réalisation d'une EFR requiert certaines exigences propres à la pédiatrie qui nécessitent un personnel formé, entraîné, des techniques adaptées plus à la maturité qu'à l'âge de l'enfant, et du temps (plus de temps que pour tester un patient adulte) essentiellement chez les jeunes enfants. Les locaux doivent être accueillants, l'ambiance rassurante et le discours compréhensible et adapté à l'enfant.

Les appareils utilisés doivent être en adéquation avec l'âge de l'enfant : embout buccal adapté à la taille de la bouche de l'enfant (possibilité de couper les languettes latérales des embouts buccaux) et hauteur du siège réglable, mais l'enfant peut être assis sur les genoux d'un parent. Si le pince-nez est mal toléré, un adulte peut pincer les ailes du nez. Il faut vérifier la mobilité ou la perte récente d'une dent de lait afin d'adapter l'embout buccal. Les appareils orthodontiques et les corsets doivent être ôtés si cela est possible. Une toise et une balance calibrées sont nécessaires pour la mesure, sans chaussure ni manteau, des mensurations de l'enfant indispensables à la détermination des normes. Pour les patients atteints de scoliose ou de maladie neuromusculaire, il est nécessaire d'utiliser une taille estimée soit par la mesure de l'envergure brachiale soit par celle de l'ulna dont la mesure est plus facile et fiable (recommandée chez les patients atteints de maladie neuromusculaire) [2,3].

Points forts à retenir•

- Même si l'asthme reste la pathologie la plus fréquemment explorée en fonction respiratoire pédiatrique d'autres pathologies (pulmonaires et extra-pulmonaires) et des expositions précoces délétères peuvent impacter de façon durable la fonction respiratoire.
- L'EFR du jeune enfant nécessite la maîtrise de techniques réalisables en volume courant avec du matériel adapté (filtres d'espace mort réduit, taille des embouts. . .) par un personnel motivé.

Compte tenu des difficultés possibles de réalisation de l'examen à l'âge pédiatrique, regarder l'enfant souffler est un prérequis indispensable à toute interprétation de l'EFR.

Techniques et méthodes de mesures

Les mesures de fonction respiratoire de l'enfant (volumes, relation débit-volume, résistance) doivent être réalisées avec les mêmes techniques et méthodes d'acquisition que celle utilisées

pour établir les normes pédiatriques utilisées pour leur interprétation. Outre le pourcentage de la valeur prédite, ces normes permettent le calcul du z-score qui indique exactement à quel point une mesure donnée est éloignée de la moyenne d'une population normale, en unités d'écart-type. Les valeurs attendues sont comprises entre limite inférieure et limite supérieure de la normale (LIN et LSN) soit entre $-1,64$ et $+1,64$ z-score ou écart-type [4—11]. Quelle que soit la technique utilisée, il est important de connaître pour en tenir compte l'espace mort machine et celui du filtre qui ne doit pas excéder 2 mL.kg^{-1} . Cet article traite des particularités pédiatriques des techniques d'EFR utilisées en routine chez l'enfant. Il ne détaille pas les techniques de mesure par rinçage d'un gaz inerte (mesure de capacité résiduelle fonctionnelle (CRF) et de distribution ventilatoire), ni celle du transfert du monoxyde de Carbone dont la réalisation et l'interprétation ne sont pas différentes comparées au sujet adulte (utilisation des normes de la Global Lung Initiative [GLI] recommandée). Concernant la mesure de la fraction nasale du monoxyde d'Azote(NO) dans la démarche diagnostique des enfants suspects de dyskinésie ciliaire primitive, il est possible de l'adapter en ventilation spontanée dès l'âge nourrisson. La description complète des mesures pédiatriques de NO nasal accompagnée de vidéos explicatives est disponible dans un rapport technique publié récemment [12].

Spirométrie forcée

La spirométrie est l'examen le plus pratiqué chez l'enfant car il fournit rapidement des informations sur les volumes pulmonaires mobilisables et évalue de manière indirecte le calibre bronchique de base et après des tests induisant une broncho-motricité. La technique d'expiration forcée est souvent acquise vers 6 ans (taux de réussite $\sim 80\%$ à 6 ans et $\sim 100\%$ à 8 ans) et nécessite une expertise pédiatrique pour être réalisée chez l'enfant d'âge préscolaire [13].

L'utilisation de logiciels incitatifs peut être une aide mais elle n'est pas obligatoire. Les dernières recommandations internationales pour la spirométrie comprennent les spécificités pédiatriques suivantes [14] :

- le nombre maximal de manoeuvres respiratoires n'est pas limité chez l'enfant car les expirations ne sont pas forcément maximales à chaque essai lors de l'apprentissage. Néanmoins, il faut veiller à ne pas fatiguer ou décourager l'enfant en vue d'explorations ultérieures
- le volume extrapolé arrière ne doit pas excéder 5% de la capacité vitale forcée (CVF) ou 100 mL (la meilleure valeur) ;
- en cas d'expiration forcée $< 1\text{s}$ chez les enfants préscolaires, les courbes ont un aspect très convexe (« en cloche ») et il peut être justifié de reporter des volumes expirés maximaux à $0,5 \text{ s}$ ou $0,75 \text{ s}$ s'ils sont reproductibles ;
- si le plateau $\geq 1\text{s}$ de fin d'expiration ne peut être atteint, la reproductibilité inter-manoeuvre de la CVF sur des courbes d'aspect correct (CVF non tronquée) permet de valider la fin d'expiration ;

•la variabilité inter-manoeuvre des deux plus grandes valeurs de CVF et volume expiré maximal en 1 s (VEMS) dépend de l'âge et rentre dans la cotation de qualité de la spirométrie forcée (de A à E) (Tableau 2).

Tableau 1 Listes des principales pathologies indiquant la réalisation d'une exploration fonctionnelle respiratoire et éventuellement d'un suivi fonctionnel chez l'enfant.

Pathologies ou groupes de pathologies	Indications complémentaires
Asthme Suspicion d'asthme Mucoviscidose Dyskinésie ciliaire primitive (DCP) Bronchite chronique et dilatations bronchiques hors mucoviscidose ou DCP Bronchiolite oblitérante Pathologies dysimmunitaires Drépanocytose Déformations osseuses Pathologies neuromusculaires Pathologies infiltratives diffuses	Toux chronique, gêne respiratoire (\pm à l'effort) Post-virales, post-greffe de moelle ou d'organe Déficits immunitaires, maladies auto-immunes Scolioses, maladies osseuses constitutionnelles Pathologies du surfactant, maladies métaboliques, pneumopathies interstitielles diffuses Chimiothérapie anticancéreuse, radiothérapie, anticorps monoclonaux
Surveillance de thérapies toxiques	

Les normes actuellement recommandées comportent CVF, VEMS, VEMS/CVF, VEM0,75, VEM0,75/CVF, débits expiratoires moyen et à 25 % de la CV à partir de l'âge de 3 ans [4]. Elles tiennent compte de caractères ethniques et permettent d'effectuer une transition cohérente entre la pédiatrie et la population adulte qui montre différentes phases de croissance bronchopulmonaire. Une première phase de vitesse de croissance du volume pulmonaire supérieure à celle des voies aériennes (baisse du VEMS/CVF), une phase d'inversion de ces dynamiques de croissance (augmentation du VEMS/CVF à l'adolescence) suivie d'une phase de croissance harmonieuse chez l'adulte jeune masculin et légèrement défavorable pour les voies aériennes chez la jeune femme [4].

Comme chez l'adulte, la définition du syndrome obstructif repose sur le rapport VEMS/CVF < LIN. La sévérité de l'obstruction se juge sur le z-score du VEMS avec 2 gradations successivement proposées en 2014 (légère de la LIN à -2, modérée de -2 à -2,5, modérément sévère de -2,5 à -3, sévère de -3 à -4 et très sévère < -4) puis en 2022 (légère de la LIN à -2,5, modérée de -2,5 à -4 et sévère < -4)[15,16]. Ces échelles sont peu adaptées à l'enfant asthmatique chez lequel le VEMS est très souvent > LIN (obstruction très légère) et très rarement < -4, cela est moins vrai pour des pathologies plus sévères (mucoviscidose, bronchiolite oblitérante). Le critère récent de significativité de la réversibilité des volumes expirés forcés (> 10 % de la valeur théorique) est plus adapté à la pédiatrie que ne l'était le précédent critère [16]. Il en résulte parmi les enfants asthmatiques (ou ayant une toux chronique) sans obstruction bronchique mais avec de grands volumes expiratoires forcés, une légère augmentation de fréquence de la réponse positive au bronchodilatateur [17]. Il est décrit de nouveaux phénotypes spirométriques observés chez des enfants prématurés sous le vocable « spirométrie anormale associée à un rapport VEMS/CVF préservé », ou à l'inverse des volumes forcés normaux avec VEMS/CVF < LIN par « croissance dysanaptique ». Enfin, la diminution de CVF et VEMS doivent conduire à la réalisation d'une mesure des volumes pulmonaires statiques idéalement par pléthysmographie, pour distinguer le syndrome restrictif du syndrome obstructif périphérique (ou profil fonctionnel non spécifique).

Volumes pulmonaires

La détermination des volumes pulmonaires (mesure de la CRF et calcul de la capacité pulmonaire totale [CPT] et du volume résiduel [VR]) a le même intérêt chez l'enfant que chez l'adulte pour détecter un syndrome restrictif ($CPT < LIN$) ou mixte, une distension thoracique (VR et/ou VR/CPT et/ou $CRF > LSN$) [18]. Le degré de coopération de l'enfant, très lié à son âge, va conditionner la réalisation des mesures.

La technique la plus utilisée pour mesurer les volumes pulmonaires est la pléthysmographie. L'inconvénient de cette technique réside dans la difficulté pour le jeune enfant à être autonome dans la cabine, c'est-à-dire, à maintenir sa bouche hermétiquement fermée autour de l'embout buccal, pince-nez correctement placé, et à respirer contre la valve obstruant les voies aériennes. Ainsi, l'enfant d'âge préscolaire a tendance à ouvrir la bouche dès la fermeture de la valve, il est alors préférable de commencer par réaliser des mesures sans occlusion (selon la pathologie de l'enfant, mesure de CV lente, CVL, ou de résistance spécifique des voies aériennes, sRaw) afin que l'enfant s'habitue à être dans la cabine fermée puis d'essayer la mesure de CRF dont il est recommandé de rendre la moyenne de trois mesures reproductibles ($(\text{valeur max} - \text{valeur min}) / \text{valeur moyenne} \leq 0,05$).

Lorsque la technique de pléthysmographie n'est pas maîtrisée et qu'une mesure de volume est importante dans le cadre des pathologies restrictives, la mesure de CRF par technique de dilution de l'hélium est possible à tout âge. Cependant cette technique nécessite un matériel plus lourd à gérer et reste l'apanage des centres hospitaliers. De plus, elle est obligée à une ventilation calme et régulière prolongée (sans fuite) parfois difficile à obtenir chez l'enfant jeune ou ayant des troubles psychomoteurs. Deux mesures de CRF Hélium sont réalisées dont on retient la moyenne si elles sont reproductibles à 10 % de la moyenne ($(\text{valeur max} - \text{valeur min}) / \text{valeur moyenne} \leq 0,10$). Dans le cas contraire une troisième mesure est réalisée. En cas d'obstruction bronchique importante les gaz piégés ne sont pas mesurés par la technique de dilution.

Quelle que soit la technique de mesure de CRF utilisée, il est nécessaire que l'enfant respire de façon stable avant le début de la mesure, c'est-à-dire, qu'au moins trois volumes courants montrent une différence entre volume maximal et minimal de fin d'expiration courante ≤ 15 % du volume courant [18].

Si à tout âge la mesure d'un volume pulmonaire incluant le VR, et secondairement corrigé en CRF, est possible (au moins en technique de dilution) ce n'est pas qu'après 6 ans que les mesures de CV et de CPT sont généralement réalisables par l'enfant. La méthode utilisant les manœuvres de capacité inspiratoire effectuées immédiatement après l'acquisition de mesure de la CRF recommandée dans la dernière mise point technique de l'ERS/ATS est plus facile à réaliser chez l'enfant [18]. Le VR est égal à la moyenne des CPT à laquelle on soustrait la valeur la plus élevée de CV. Chez les plus jeunes enfants, l'inspiration maximale est mieux réalisée que l'expiration maximale rendant l'interprétation du volume de réserve expiratoire (VRE) et du VR souvent plus délicate. On ne doit rendre des valeurs que si la réalisation de la mesure a été correcte, en particulier la mesure de la CVL doit avoir été effectuée durant la même manoeuvre que celle de la CRF (mesure acceptable liée à la CRF), ou éventuellement

en dehors d'une mesure de CRF dilution dont le niveau pré-mesure de fin de volume courant était stable (mesure utilisable) (Tableau 2). De plus, la reproductibilité des mesures, gage de fiabilité des résultats, et sa gradation aide les praticiens à évaluer la cohérence des résultats des tests. La gradation de la qualité de la mesure de CRF pléthysmographique est similaire à celle recommandée chez l'adulte. En revanche, l'évaluation de la fiabilité des mesures de CVL (et par-là de VR et CPT) dépend de l'âge du sujet et nécessite soit une mesure de spirométrie forcée(CVF), soit des mesures reproductibles de CVL effectuées en dehors de la mesure de CRF dont la meilleure valeur sera utilisée à la place de la CVF (Tableau 2) [18,19].

Les volumes pulmonaires dépendent de la taille corporelle, du sexe et de l'ethnie et augmentent linéairement avec l'âge jusqu'à environ 10 ans pour les filles et 12 ans pour les garçons. Les normes pédiatriques des volumes pulmonaires ne sont pas idéales. Les normes de Zapletal et al., encore largement utilisées, établies sur un petit échantillon d'enfants caucasiens, ne prennent en compte que la taille et le sexe, et ont un écart-type faible [7]. Les normes GLI pour les volumes statiques proposent des équations valables entre 5 et 80 ans pour une population caucasienne européenne [5]. Chez l'enfant, les moyennes de ces normes sont proches de celles de Zapletal, mais les écarts-types sont plus importants pour les normes GLI que l'on privilégiera pour harmoniser l'expression des résultats en z-score.

Mesure de la résistance

En complément de la spirométrie forcée ou lorsque celle-ci n'est pas effectuée correctement, il est possible d'évaluer la résistance des voies aériennes (Raw) ou du système respiratoire grâce à des techniques nécessitant peu de coopération de l'enfant. Il s'agit de la pléthysmographie(Raw), des mesures de résistance par interruption du débit(Rint) ou par oscillométrie (mesures de l'impédance, Zrs) [20].

Du fait d'une variabilité inter-individuelle large comparée à la spirométrie forcée, ces techniques ont en commun de mesurer des indices de mécanique ventilatoire plus sensibles pour détecter la modification du calibre des voies aériennes lors d'un test de broncho réactivité que pour détecter l'obstruction de base. Leur faisabilité est proche de 100 % à partir de 4 ans (> 80 % entre 3 et 4 ans pour Rint et Zrs, et 70 % pour la sRaw). Enfin, du fait des modifications du tonus broncho moteur induites par l'inspiration profonde ou l'expiration forcée, il est recommandé d'effectuer ces mesures réalisées en volume courant avant la spirométrie forcée.

La mesure pléthysmographique implique que l'enfant puisse rester enfermé dans une cabine, avec un pince-nez et un embout buccal en bouche placés correctement et sans fuite, et maintenir le cou droit/légèrement défléchi avec les mains sur les joues pendant les mesures. La relation entre le débit ventilatoire à la bouche et le volume déplacé dans la cabine hermétiquement fermée en volume courant mesure la résistance dynamique (spécifique) des voies aériennes (sRaw), qui est déterminée par Raw et CRF ($sRaw = Raw \times CRF$). Afin de s'affranchir des variations de volume dans la cabine due au réchauffement de l'air entrant dans les voies aériennes, une compensation thermique (en ventilation courante à 35 min^{-1}) ou

une respiration en panting (halètement 60 à 120 min⁻¹) peuvent être utilisées [6,11]. La fréquence respiratoire modifie grandement la mesure et il est indispensable pour le suivi d'évaluer l'enfant toujours dans les mêmes conditions. Les deux algorithmes recommandés pour le calcul de sRaw (sans nécessité d'occlusion) chez l'enfant sont celui de la sRTOT (régression linéaire entre 2 points) et sReff (intégration de l'ensemble des points d'échantillonnage) car ils ont une meilleure sensibilité pour détecter l'obstruction bronchique. Il est recommandé d'effectuer 3 séries de mesure (5—10 boucles par série) et de rapporter la valeur médiane de l'essai médian (ou la moyenne des médianes). Après l'acquisition des boucles débit buccal/déplacement de volume dans la cabine, si l'enfant est capable de ventiler contre la valve fermée la mesure des droites de variation de pression buccale/déplacement de volume dans la cabine permet de mesurer la CRF et ainsi de calculer Raw (Raw = sRaw/CRF).

Si l'occlusion des voies aériennes n'est pas tolérée par l'enfant, seule la mesure de sRaw sera disponible grâce à une approximation sur la CRF (non mesurée) [21]. Cependant, sRaw est très informative chez l'enfant car elle augmente en cas d'obstruction bronchique, que celle-ci se traduise par distension pulmonaire (augmentation de la CRF) ou diminution du calibre bronchique (augmentation de Raw). sRaw diminue très légèrement avec l'âge. Des normes avec compensation thermique (3—10 ans) et sans compensation thermique (115—180 cm) sont disponibles donnant des LSN très différentes (pour sRaw effet sRawTOT~1,5 kPa.s avec compensation thermique, pour sRawTOT0,92 kPa.s sans compensation thermique) [6,11]. Les réponses significatives au bronchodilatateur publiées sont de -25 % prédit sRaw TOT pour distinguer enfants d'âge préscolaire asthmatiques e sains, et -42 % base sRaw0,5 pour distinguer les asthmatiques avec une variation du VEMS > + 12 % base [21,22]. Aucun seuil d'augmentation de sRaw au cours d'un test de provocation bronchique n'a été validé chez l'enfant, mais la relation physique débit-résistance étant indépendante de l'âge, le seuil adulte (+100 %) peut être retenu [23].

La technique des oscillations est également largement utilisée en pédiatrie en raison de sa grande facilité d'utilisation [24]. Cette mesure de l'impédance du système respiratoire (Zrs) est décomposée en résistance (Rrs) et réactance (Xrs) qui elle-même dépend de l'élastance (inverse de la compliance) et de l'inertance (lors de l'accélération/décélération du débit aérien). Les mesures de Rrs à basses fréquences d'oscillations reflètent plutôt la résistance au débit aérien des voies aériennes intra-thoraciques et des tissus thoraco-pulmonaires. L'élastance (rigidité du poumon) est minimale et négative aux basses fréquences, et l'inertance est maximale et positive aux fréquences plus hautes. C'est la somme de ces deux effets qui détermine l'évolution de Xrs en fonction de la fréquence (AX) [25]. Selon le type d'ondes que l'on surimpose à la ventilation courante plusieurs techniques sont disponibles : l'impulsométrie (ondes carrées), et l'oscillométrie utilisant des ondes sinusoïdales mono-fréquence ou multifréquence (oscillométrie spectrale). Toutes ces techniques nécessitent une respiration calme et régulière, sans mouvement du corps, joues maintenues pendant la durée de l'acquisition des mesures qui est généralement de 16 s avant 12 ans et 30 s après 12 ans. Les cycles montrant une respiration perturbée ou une fuite doivent être éliminés a posteriori.

Le coefficient de variation d'une série de 3 mesures doit être $\leq 15\%$ chez l'enfant ($\leq 10\%$ chez l'adulte). La moyenne de 3 mesures reproductibles est reportée.

Les valeurs de référence dépendent de la technologie utilisée. Des normes pédiatriques permettant le calcul du z-score ont été publiées pour les trois machines les plus

utilisées [8,9]. Les seuils de positivité de la réponse au bronchodilatateur utilisés pour l'adulte sont recommandés chez l'enfant (-40% Rrs5, $+50\%$ Xrs5 et -80% AX) [24]. Plusieurs études ont évalué l'intérêt de l'impulsométrie au cours d'un test à la méthacholine chez des jeunes enfants en comparant les résultats de Rrs et Xrs mesuré à 5 Hz avec la réduction du VEMS [26,27]. Une augmentation d'environ 50% de Rrs5 ou une diminution de 50% de Xrs5 détectait environ 80% des enfants diminuant de 20% de leur VEMS. Aucune étude n'a évalué l'intérêt de l'oscillométrie au cours d'un test à la méthacholine dans une large population d'enfants.

La technique de mesure de la résistance par interruption du débit aérien (Rint) présente les mêmes faibles contraintes de réalisation pratique que celles . La Rint se mesure préférentiellement à l'expiration lorsque l'on veut détecter une obstruction bronchique ou une réponse au bronchodilatateur, et à l'inspiration lors d'un test de bronchoconstriction. Elle repose sur l'hypothèse d'une équilibration entre pression buccale et pression alvéolaire lors de l'interruption brutale et brève du débit aérien. La régression linéaire arrière du plateau de pression permet de calculer la différence de pression (atmosphérique/alvéolaire) qui, rapportée au débit aérien mesuré avant l'interruption, permet le calcul classique de Rint. Certaines machines utilisent d'autres parties de la courbe de pression buccale au cours de l'interruption(exemple, pression de fin d'interruption) et/ou le débit mesuré à la réouverture du clapet (résistance à la réouverture) ou ne permettent pas de choisir le temps de la mesure, entre inspiration ou expiration (Rintinspou Rintexp). Ces notions sont importantes à prendre en considération pour l'utilisation des normes qui varient en fonction des techniques/méthodes utilisées. La réalisation d'au moins 7 interruptions de survenue aléatoire permet en général la sélection d'au moins 5 interruptions correctes (pas de mouvement ou fuite, aspect de la courbe de pression correct) dont la médiane est rapportée. Sur le graph pression/débit une mesure correctement réalisée mais aberrante peut être éliminée, mais en général le coefficient de variation de la série est $< 15\%$.

Des normes de Rintinsp et Rintexp sont disponibles pour des garçons et des filles de 3 à 13 ans (90—130 cm) permettant le calcul du z-score [10]. La broncho réactivité au bronchodilatateur, significative pour une chute d'au moins 35% de la valeur prédite de Rintexp(ou $-0,25$ kPa.s.L-1 ou $-1,25$ z-score si < 130 cm), est prédictive d'une hyperréactivité bronchique ou d'une efficacité des corticoïdes inhalés chez les enfants suspects d'asthme ou siffleurs d'âge préscolaire, respectivement. La bronchoconstriction est considérée significative pour une augmentation d'au moins 35% de Rintinsp ou 40% de Rintexp accompagné d'une chute d'au moins 3 points de la SpO2 [24].

Points forts à retenir

- Pour toutes les techniques d'EFR utilisées chez l'enfant, il faut connaître les valeurs de référence avec leurs limites de la normale (en z-scores si possible) et la significativité d'une modification.
- Pour la mesure des volumes pulmonaires, les techniques de dilution peuvent être utilisées quand la pléthysmographie n'est pas maîtrisée par l'enfant. Les manoeuvres de capacité inspiratoires ont été effectuées immédiatement après la mesure de la CRF.
- Pour la spirométrie forcée, elle peut être obtenue à un jeune âge avec de la patience et des résultats parfois partiels (volume expiré < 1s, une seule mesure de base mais plus après bronchodilatateur).
- Pour la mesure de la résistance, il faut s'approprier une des trois techniques disponibles (sRaw/Raw, Rrs, Rint) et garder à l'esprit que ces mesures dépistent mieux la broncho réactivité excessive que le trouble ventilatoire obstructif de base. Il faut les mesurer avant toute manoeuvre forcée et tester systématiquement un bronchodilatateur.

Spécificités pédiatriques par situation clinique

Obésité

Chez l'enfant, les modifications fonctionnelles respiratoires liées à l'obésité sont différentes de celles de l'adulte [28]. Chez l'enfant obèse la croissance bronchopulmonaire est plus dysanaptique que chez l'enfant non obèse : la croissance en volume est accélérée (surtout en volume mobilisable : CVF), aboutissant à une augmentation du VEMS (part volume du VEMS) par rapport à la croissance en calibre des voies aériennes (part débit du VEMS). Ainsi, le rapport VEMS/CVF diminue avec des valeurs élevées de VEMS et surtout de CVF par un mécanisme qui n'est pas de l'obstruction (même si $VEMS/CV < LIN$). Ce profil n'est pas réversible et il ne faut pas conclure à un trouble ventilatoire obstructif fixé. La preuve de l'absence de trouble fixé est apportée par l'évolution de la fonction respiratoire à l'âge adulte lorsque VEMS et CVF vont se normaliser, ainsi que le rapport VEMS/CVF. Les volumes statiques sont aussi modifiés chez l'enfant : absence de diminution de CPT (et même discrète augmentation), diminution fréquente de CRF et diminution de VR du fait de la grande CVL. L'apparition d'un éventuel trouble restrictif se fera vers l'âge de 35 ans.

Drépanocytose

Chez l'enfant drépanocytaire, il existe volontiers (un tiers environ) un trouble ventilatoire obstructif dont la réversibilité significative est possible, ainsi qu'une hyperréactivité bronchique à la méthacholine. Le diagnostic d'asthme est donc souvent évoqué dans ce cadre, mais sa physiopathologie est différente de l'asthme classique allergique car la prévalence des autres composantes de la maladie asthmatique allergique (terrain atypique, manifestations allergiques extra-respiratoires, antécédents familiaux) n'est pas augmentée dans la

drépanocytose. Par ailleurs, ce trouble obstructif est transitoire et régresse avec la croissance pour faire place dans l'adolescence à un profil fonctionnel plus proche de celui de l'adulte drépanocytaire (fréquent léger trouble ventilatoire restrictif). En conclusion, l'association asthme-drépanocytose est possible du fait de la fréquence de l'asthme, mais les anomalies fonctionnelles respiratoires souvent constatées ne doivent pas conduire au diagnostic d'asthme sans symptomatologie évocatrice. Enfin, l'augmentation du risque de crises vaso-occlusives drépanocytaire en cas d'asthme pourrait être liée au terrain obstructif ou à l'utilisation des traitements de l'asthme.

Comme chez l'adulte drépanocytaire, une mesure de la diffusion du monoxyde carbone (DLCO) en apnée est réalisée, généralement à partir de 8 ans. On observe une valeur souvent franchement augmentée du coefficient de transfert du CO (kCO) liée à une augmentation du volume capillaire pulmonaire, cette augmentation de kCO diminue pendant l'adolescence [29].

Asthme

L'EFR peut être réalisée dans un but diagnostique d'asthme, pour étayer une clinique compatible (mise en évidence d'un trouble ventilatoire obstructif significativement réversible) à l'aide des mêmes tests que ceux utilisés chez l'adulte, ou si l'enfant ne peut pas les réaliser, par une mesure de base et après bronchodilatation de résistance et éventuellement de CRFHe (obstruction ± distension significativement réversible) [30]. L'EFR peut aussi être utile pour avoir des arguments en faveur ou en défaveur du diagnostic d'asthme devant des symptômes non typiques (toux chronique, gêne respiratoires récidivantes, foyers pulmonaires répétés ± atélectasie) mais évocateurs surtout si le contexte l'est aussi (antécédents atypiques, ≥ 3 bronchiolites avant l'âge de 2 ans, efficacité des traitements anti-asthmiques sur les symptômes). En l'absence de trouble ventilatoire obstructif réversible, un test de provocation bronchique est réalisable comme chez le patient adulte pour le grand enfant et l'adolescent, ou en milieu hospitalier dès l'âge de 3 ans pour les tests à la méthacholine [31]. La mesure de la fraction de monoxyde d'azote dans le gaz expiré (FeNO) ne doit pas être utilisée seule pour le diagnostic d'asthme [30]. Une valeur ≥ 20 particules par milliard (ppb pour les anglo-saxons) si < 12 ans ou ≥ 25 ppM si ≥ 12 ans est considérée élevée de façon intermédiaire (très élevée > 35 ppM et > 50 ppM, respectivement). L'augmentation de la FeNO en cas d'inflammation bronchique à éosinophiles ou chez un patient atopique (surtout s'il présente une hyperréactivité bronchique) n'est pas spécifique de l'asthme.

Concernant le suivi, de façon plus fréquente que chez les patients adultes asthmatiques, les enfants peuvent avoir une rémission clinique de la maladie asthmatique (surtout le garçon adolescent) se traduisant par l'absence prolongée (> 1 an) de symptôme d'asthme permettant la diminution voire l'arrêt du traitement de fond. Dans ce cas, il est impératif de s'assurer de l'absence de récurrence du trouble ventilatoire obstructif réversible au cours de la décroissance thérapeutique et plusieurs mois après l'éventuel arrêt du traitement, si possible en saison d'exposition maximale (virus, pollens. . .). En fonction de la sévérité d'une éventuelle aggravation fonctionnelle et du terrain (sévérité initiale de l'asthme, comorbidités), il sera

évalué la nécessité d'une augmentation de la pression thérapeutique malgré l'absence de récurrence des symptômes cliniques.

Points forts à retenir

- Les enfants obèses sont facilement étiquetés « asthmatiques » à tort du fait d'un profil fonctionnel particulier (croissance dysanaptique avec CVF et VEMS élevés et VEMS/CVF bas non réversible) associé à des symptômes non spécifiques (essoufflement d'effort, voir sifflements expiratoires en cas de diminution non exceptionnelle de la CRF)

- La drépanocytose à l'âge pédiatrique s'accompagne volontiers d'un trouble ventilatoire obstructif réversible et/ou d'une hyperréactivité bronchique ne correspondant pas toujours à un asthme clinique mais pouvant aggraver la symptomatologie pulmonaire de la maladie.

- Il peut y avoir une rémission des symptômes d'asthme chez l'enfant à l'âge scolaire après un asthme à début précoce, ou à l'adolescence pour un asthme (allergique) plus classique. Dans tous les cas il faut surveiller la fonction respiratoire après la décroissance ou l'arrêt du traitement de fond.

Conclusion

L'EFR est possible à partir de l'âge de 3 ans avec des techniques adaptées (résistance, spirométrie, tests de bronchomotricité). Avec la croissance/maturité et partir de 6 ans, le panel de techniques rejoint celui utilisé chez l'adulte. Il est nécessaire d'utiliser des normes adaptées et de connaître les spécificités des pathologies respiratoires pédiatriques afin d'intégrer correctement les résultats d'EFR dans la prise en charge des enfants.

Points forts généraux

- L'asthme est la pathologie la plus fréquemment explorée en fonction respiratoire chez l'enfant car l'EFR est nécessaire au diagnostic, au phénotypage et au suivi de la maladie.

- Des expositions délétères ou des antécédents médico-chirurgicaux précoces peuvent avoir des conséquences respiratoires jusqu'à l'âge adulte. Il faut savoir les rechercher chez les patients adultes se plaignant de troubles respiratoires

- L'EFR de l'enfant nécessite l'utilisation d'un matériel adapté par du personnel formé à l'exploration pédiatrique.

- Les techniques utilisées dépendent de la coopération de l'enfant et il faut prévoir de pouvoir explorer un enfant incapable de mobiliser sa capacité vitale par des techniques de mesure en volume courant (technique de dilution, mesure de résistance).

•Les normes utilisées doivent permettre le calcul du z-score et si possible être issues d'équations établies à partir d'une population d'âge pédiatrique et adulte, couvrant la période de l'adolescence.

Déclaration de liens d'intérêts

N. Beydon, C. Du Boisbaudry, R. Gauthier, I. Ioan, M. Le Bourgeois, M.-A. Giroux-Metges, et S. Matecki déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts. Au cours des 5 dernières années, R. Abou Taam aperçu des honoraires ou financements pour participation à des congrès, communications,/actions de formation/conseil/participation à des groupes d'experts/travaux de recherche, de la part des laboratoires Sanofi, GSK et AstraZeneca, St allergènes. Au cours des 5 dernières années, Rola Abou Taam a été investigateur principal d'études cliniques promues par les laboratoires Sanofi, GSK et Astra Zeneca. Au cours des 5 dernières années, Christophe Delclaux aperçu des honoraires ou financements pour une participation à un groupe d'experts sur la description de l'évolution physiologique de la fonction respiratoire, de la part des laboratoires Chiesi.

Références

- [1] Sadeghi HA, Miri SR, Bakhshandeh H, et al. Does early tetralogy of Fallot total correction give better final lung volumes? *Asian Cardiovasc Thorac Ann* 2013;21:270—4.
- [2] Gauld LM, Kappers J, Carlin JB, et al. Height prediction from ulna length. *Dev Med Child Neurol* 2004;46:475—80.
- [3] Beydon N, Leye F, Bokov P, et al. Prediction of height using ulna length in African-Caribbean children. *Pediatr Pulmonol* 2022;57:2032—9.
- [4] Quanjer PH, Stanojevic S, Cole TJ, et al. Multi-ethnic reference values for spirometry for the 3—95-yr age range: the global lung function 2012 equations. *Eur Respir J* 2012;40:1324—43.
- [5] Hall GL, Filipow N, Ruppel G, et al. Official ERS technical standard: Global Lung Function Initiative reference values for static lung volumes in individuals of European ancestry. *Eur Respir J* 2021;57 [cited 2021 Jul 18]; available from: <https://erj.ersjournals.com/content/57/3/2000289>.
- [6] Zapletal A, Samanek M, Paul T. Plethysmographic measurements of specific airway resistance in young children. In: Herzog H, editor. *Respir Res*. 1987. p. 52—63.
- [7] Zapletal A, Samanek M, Paul T. Lung function in children and adolescents — methods, reference values. Basel, Switzerland: Karger AG; 1987.
- [8] Gochicoa-Rangel L, Martínez-Briseño D, Guerrero-Zúniga S, et al. Reference equations using segmented regressions for impulse oscillometry in healthy subjects aged 2.7—90 years. *ERJ Open Res* 2023;9:00503—2023.

- [9] Ducharme FM, Smyrnova A, Lawson CC, et al. Reference values for respiratory sinusoidal oscillometry in children aged 3 to 17 years. *Pediatr Pulmonol* 2022;57:2092—102.
- [10] Merkus PJ, Stocks J, Beydon N, et al. Reference ranges for interrupter resistance technique: the Asthma UK Initiative. *Eur Respir J* 2010;36:157—63.
- [11] Kirkby J, Stanojevic S, Welsh L, et al. Reference equations for specific airway resistance in children: the Asthma UK initiative. *Eur Respir J* 2010;36:622—9.
- [12] Beydon N, Kouis P, Marthin JK, et al. Nasal nitric oxide measurement in children for the diagnosis of primary ciliary dyskinesia: European Respiratory Society technical standard. *Eur Respir J* 2023;61:2202031
- [13] Müller-Brandes C, Krämer U, Gappa M, et al. LUNOKID: can numerical American Thoracic Society/European Respiratory Society quality criteria replace visual inspection of spirometry? *Eur Respir J* 2014;43:1347—56.
- [14] Graham BL, Steenbruggen I, Miller MR, et al. Standardization of spirometry 2019 update. An official American Thoracic Society and European Respiratory Society technical statement. *Am J Respir Crit Care Med* 2019;200:e70—88.
- [15] Quanjer PH, Pretto JJ, Brazzale DJ, et al. Grading the severity of airways obstruction: new wine in new bottles. *Eur Respir J* 2014;43:505—12.
- [16] Stanojevic S, Kaminsky DA, Miller MR, et al. ERS/ATS technical standard on interpretive strategies for routine lung function tests. *Eur Respir J* 2022;60:2101499.
- [17] Beydon N, Rosenfeld M. Comparison of bronchodilator responsiveness in asthmatic children using 2021 or 2005 ATS/ERS guidelines. *Pediatr Pulmonol* 2024;59:233—5.
- [18] Bhakta NR, McGowan A, Ramsey KA, et al. European Respiratory Society/American Thoracic Society technical statement: standardisation of the measurement of lung volumes, 2023 update. *Eur Respir J* 2023;62:2201519.
- [19] Bhakta NR, McGowan A, Ramsey KA, et al. “European Respiratory Society/American Thoracic Society technical statement: standardisation of the measurement of lung volumes, 2023 update”. *Eur Respir J* 2023;62:2201519.
- [20] Beydon N, Davis SD, Lombardi E, et al. An official American Thoracic Society/European Respiratory Society statement: pulmonary function testing in preschool children. *Am J Respir Crit Care Med* 2007;175:1304—45.
- [21] Bisgaard H, Nielsen KG. Plethysmographic measurements of specific airway resistance in young children. *Chest* 2005;128:355—62.
- [22] Mahut B, Peiffer C, Bokov P, et al. Use of specific airway resistance to assess bronchodilator response in children. *Respirol Carlton Vic* 2011;16:666—71.

- [23] Khalid I, Morris ZQ, Digiovine B. Specific conductance criteria for a positive methacholine challenge test: are the American Thoracic Society guidelines rather generous? *Respir Care* 2009;54:1168—74.
- [24] King GG, Bates J, Berger KI, et al. Technical standards for respiratory oscillometry. *Eur Respir J* 2020;55:1900753.
- [25] Kaminsky DA, Simpson SJ, Berger KI, et al. Clinical significance and applications of oscillometry. *Eur Respir Rev* 2022;31:210208.
- [26] Schulze J, Smith H-J, Fuchs J, et al. Methacholine challenge in young children as evaluated by spirometry and impulse oscillometry. *Respir Med* 2012;106:627—34.
- [27] Bailly C, Crenesse D, Albertini M. Evaluation of impulse oscillometry during bronchial challenge testing in children. *Pediatr Pulmonol* 2011;46:1209—14.
- [28] Bokov P, Delclaux C. [The impact of obesity on respiratory function]. *Rev Mal Respir* 2019;36:1057—63.
- [29] Bokov P, Zakaria A, Koehl B, et al. Deterioration of lung diffusion capacity during childhood in sickle cell disease. *Pediatr Pulmonol* 2024, <http://dx.doi.org/10.1002/ppul.26995>. Online ahead of print.