

IRM du poumon : où en est-on ?

H. DUCOU LE POINTE, C. SILEO

Hôpital Trousseau, Paris, France

I. Introduction

L’Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) pulmonaire a été longtemps volontairement mise en retrait en raison du faible nombre de protons pouvant générer le signal et de la décroissance rapide du signal du parenchyme pulmonaire liée à l’architecture du poumon qui se compose de multiples interfaces air-tissu. La juxtaposition de ces différents milieux magnétiques est responsable d’« artefacts de susceptibilité » et entraîne la décomposition du signal. L’autre obstacle a été pendant longtemps l’obtention d’images nettes en raison des mouvements respiratoires, vasculaires et cardiaques. Il a fallu attendre l’arrivée de séquences rapides ou utilisant des techniques « triggering » et « gating ».

Malgré les obstacles techniques, cet examen a pu être réalisé dans plusieurs pathologies pulmonaires où il existe une augmentation du nombre des protons et une diminution des interfaces air-tissu. Cette augmentation du signal est liée à l’accumulation de cellules, de matrice extracellulaire ou de liquides dans les différents compartiments (interstitiel, alvéolaire, bronchique ou pleural) et à une diminution concomitante de la composante aérienne (1–5).

L’IRM tente de devenir une technique alternative pour les enfants, les femmes enceintes et pour l’analyse des pathologies chroniques nécessitant des examens répétés, du fait de l’absence d’utilisation des rayons ionisants (5–7).

En effet, Pearce et al. dans une étude rétrospective de 2012 portant sur environ 170 000 enfants ayant subi un examen tomodensitométrique ont montré une augmentation du risque relatif de cancer et de leucémie. Cet excès de risque est estimé à une leucémie et une tumeur cérébrale pour 10 000 examens tomodensitométriques cérébraux (8). En 2013, une étude portant sur 11 millions d’Australiens âgés de 0 à 19 ans a mis en également en évidence une augmentation de l’incidence de tumeurs dans la population ayant été explorée par scanner (9).

A côté de l'évaluation morphologique, l'évaluation fonctionnelle des organes progresse. Au niveau du thorax, l'IRM du cœur en est un exemple fournissant des informations morphologiques (épaississement de parois, œdème, cicatrice du myocarde) mais également une évaluation fonctionnelle (mouvement de parois, contractilité, fraction d'éjection) et de la perfusion (6,10). En ce qui concerne la pathologie pulmonaire, l'IRM est encore aux portes de la clinique, en particulier, pour l'étude de la ventilation et de la perfusion pulmonaire (6).

II. Techniques morphologiques et fonctionnelles

II.1. Evaluations morphologiques

La plupart des anomalies morphologiques pulmonaires peuvent être explorées grâce à un protocole qui prévoit les séquences suivantes : 3D écho de gradient pondérée T1, fast spin écho pondérée T2, short tau inversion recovery (STIR), diffusion weighted imaging (DWI), steady state gradient recalled echo (GRE). En particulier, en utilisant une machine 1.5-T (Achieva, Philips Healthcare, Best, The Netherlands) les séquences suivantes peuvent être utilisées :

- T1-weighted high resolution isotropic volume examination (THRIVE) après injection intraveineuse de produit de contraste, en apnée, pour l'évaluation des nodules pulmonaires, des masses et des voies aériennes ;
- T2-weighted turbo spin echo (TSE), avec trigger respiratoire ou apnées répétées, pour l'évaluation des nodules pulmonaires et des masses ;
- STIR, avec trigger respiratoire ou en respiration libre, pour l'évaluation des adénopathies et des métastases osseuses ;
- DWI, avec trigger respiratoire ou apnées répétées, pour l'évaluation des nodules pulmonaires et des masses ;
- Balanced fast field echo (bFFE), en respiration libre ou en apnée, pour l'évaluation des structures vasculaires ou pour la mécanique respiratoire(1,6,11).

Pour l'évaluation des voies aériennes, notamment chez des enfants atteints de mucoviscidose, une séquence TSE pondérée T1 après injection, en respiration libre, et une séquence FFE pondérée T1 après injection, en apnée, peuvent être réalisées avec ou à la place de la séquence THRIVE (12).

Dans des situations spécifiques le trigger cardiaque peut être employé, mais il implique une augmentation du temps d'acquisition (6,13).

II.2. Evaluations fonctionnelles

II.2.1. Perfusion

De nombreuses pathologies pulmonaires peuvent produire des modifications de la perfusion du poumon. Elle peut être évaluée en IRM avec ou sans l'utilisation de produit de contraste. Les anomalies de la perfusion peuvent être corrélées à des anomalies de la ventilation car la vasoconstriction hypoxique produit une hypoperfusion locorégionale. Mais cette corrélation n'est pas constante, une hypoperfusion peut être indépendante de la ventilation (par exemple dans l'embolie pulmonaire). L'imagerie de perfusion peut être réalisée toute seule ou avec l'imagerie de ventilation pour créer une imagerie de ventilation/perfusion.

L'imagerie de perfusion par injection de produit de contraste, par exemple complexe de gadolinium, permet de visualiser le passage du produit de contraste à travers le tissu pulmonaire (perfusion tissulaire) et sa diffusion dans l'espace extravasculaire extracellulaire du poumon (étude de la perméabilité). Des images de soustractions facilitent la lecture des images (11,14,15).

La perfusion par injection de produit de contraste a été décrite pour l'évaluation des enfants atteints de mucoviscidose (16).

La technique d'*arterial spin labelling* (ASL) est utilisée pour réaliser une étude de la perfusion pulmonaire sans injection d'un agent de contraste exogène. Cette technique est particulièrement utile chez les patients souffrant d'insuffisance rénale sévère chez qui l'injection d'iode et également de gadolinium est contre-indiquée. Elle consiste à «magnétiser» le sang circulant et à l'utiliser comme traceur de perfusion, cela permet d'obtenir une imagerie de perfusion IRM sans injection de gadolinium. Elle a ainsi l'avantage de pouvoir être répétée sur des petites périodes (17).

II.2.2. Ventilation

Des techniques alternatives à l'IRM classique utilisant les protons ont été développées. Elles permettent d'obtenir un signal grâce à l'Hélium hyperpolarisé (^3He) et à le Xenon hyperpolarisé (^{129}Xe) qui deviennent des contrastes positifs qui progressent dans les voies aériennes et permettent d'étudier la ventilation. Une imagerie de diffusion peut être obtenue pour évaluer la microstructure du poumon au niveau alvéolaire. La distance moyenne qu'une molécule hyperpolarisée peut parcourir

dans une certaine période dépende de la microstructure alvéolaire qui peut être modifiée par les processus pathologiques (11,15,18–27).

La technique utilisant le ^3He hyperpolarisé a été décrite pour l'évaluation des enfants atteints de mucoviscidose (28).

Une imagerie de ventilation basée sur l'inhalation d'oxygène au 100% a été également développée(18,19).

III. Applications cliniques

Plusieurs pathologies thoraciques pédiatriques, à la fois du parenchyme pulmonaire, des voies aériennes et des structures vasculaires, peuvent être évaluées grâce à l'IRM (11).

III.1. Anomalies du parenchyme pulmonaire

Les malformations congénitales pulmonaires incluent un large et hétérogène spectre de pathologies avec anomalies du parenchyme et/ou de la vascularisation artérielle et du drainage veineux. Parmi ces anomalies les plus fréquentes sont l'emphysème lobaire géant, l'atrésie bronchique, la malformation congénitale pulmonaire des voies aériennes et la séquestration broncho-pulmonaire. Fréquemment diagnostiquées ou suspectées en anténatal, ces anomalies peuvent être révélées en post-natal par une détresse respiratoire chez un nouveau-né ou d'infections à répétitions chez un enfant plus grand. Le scanner est considéré comme indispensable pour le diagnostic post-natal et pour le bilan pré-opératoire, mais le recours à l'IRM a été décrit (11,29–33). Des séquences de ventilation peuvent être associées aux séquences morphologiques pour détecter une éventuelle hyperinflation, notamment dans l'emphysème lobaire géant (11).

Les infections pulmonaires sont étudiées en premier intention par la radiographie. Une imagerie en coupe peut être nécessaire en cas de pneumopathies compliquées et chez les patients immunodéprimés. La place de l'IRM est en cours d'évaluation avec des résultats encourageants : dans l'aspergillose pulmonaire invasive chez des patients immunodéprimés, dans la tuberculose et dans les pneumopathies chez des enfants avec des pathologies chroniques (par exemple, asthme, mucoviscidose, dyskinésie ciliaire, syndrome du lobe moyen) (34–39).

Les tumeurs primitives pulmonaires étant rares à l'âge pédiatrique, aucune étude n'a été réalisée sur l'utilisation de l'IRM pulmonaire (11). Pour les métastases, la limitation de l'IRM est représentée par l'impossibilité de détecter des nodules plus petits que 5 mm. L'utilisation de l'IRM apparaît donc impossible pour le diagnostic initial et l'évaluation préopératoire, mais envisageable dans le suivi d'une lésion cible en cours de chimiothérapie (6,33,39–41).

Dans les trois dernières décennies le scanner a pu mettre en évidence de façon assez précise les anomalies élémentaires et les *patterns* typiques des maladies interstitielles. L'IRM n'a pas jusqu'à présent démontrée sur des études cliniques son équivalence. Cependant, trois applications semblent envisageables : la visualisation et l'identification des modifications morphologiques, l'évaluation de l'activité inflammatoire de la maladie et le retentissement des modifications morphologiques sur les paramètres fonctionnels tel que la prise de contraste et la perfusion (7).

III.2. Voies aériennes proximales

Les anomalies « statiques », congénitales ou acquises, des voies aériennes proximales peuvent être bien étudiées par l'IRM ainsi que la principale anomalie « dynamique » de l'âge pédiatrique qui est la trachéobronchomalacie : des images en inspiration et expiration peuvent mettre en évidence une réduction excessive (avec des valeurs de cutoff différents selon les auteurs) du calibre trachéal lors de l'expiration (42). Une technique utilisant un spiromètre compatible avec l'IRM permet d'évaluer les voies aériennes de façon dynamique a été proposée par Ciet et al. (43).

III.3 Voies aériennes moyennes et distales

Les deux principales pathologies des moyennes et petites voies aériennes, asthme et mucoviscidose, peuvent être explorées sur le plan morphologique et/ou fonctionnel par l'IRM. Globalement la plus part des anomalies chez les patients asthmatiques ne sont pas détectables à l'IRM morphologique, mais l'imagerie utilisant ^{129}Xe et ^3He hyperpolarisés et les techniques utilisant O_2 ont démontré des résultats intéressants (11).

L'idée de pouvoir réaliser des IRM pulmonaires chez des enfants et des adultes atteints d'une maladie chronique, telle que la mucoviscidose, est particulièrement attractive, du fait de l'augmentation de la durée de vie de ces patients. L'IRM peut mettre en évidence, de façon concordante avec le scanner

haute résolution, les principales anomalies morphologiques spécifiques de cette maladie (bronchectasies, épaissements des parois bronchiques, impactions mucoïdes) et, grâce à la technique de perfusion, permettre au même temps, une évaluation fonctionnelle (5–7,12,16,44–53).

IV. Conclusion

L'IRM est en train de devenir une précieuse modalité d'imagerie du poumon. Elle offre une combinaison unique d'information morphologique et fonctionnelle dans un seul examen sans aucune exposition aux rayonnements ionisants.

Pour ce qui concerne les anomalies morphologiques, les condensations alvéolaires, les troubles de la ventilation, les tumeurs, les nodules, les anomalies de calibre des bronches, les épaissements des parois bronchiques, les impactions mucoïdes et les épanchements peuvent être visualisés. Les pathologies caractérisées par une hyperinflation ou une destruction parenchymateuse de type emphysémateux constituent actuellement un défi pour une exploration morphologique par IRM (1–5). Cependant, bien que les protocoles morphologiques facilitent son application clinique, l'IRM du poumon peut être encore difficile, étant la plus complète, mais aussi coûteuse, peu robuste, longue et de réalisation difficile à l'âge pédiatrique.

Les techniques de ventilation et de perfusion pulmonaire sont encore non utilisables de façon routinière et les développements récents et futurs contribueront à son utilisation dans la pratique courante.

Références bibliographiques

1. Puderbach M, Hintze C, Ley S, Eichinger M, Kauczor H-U, Biederer J. MR imaging of the chest: a practical approach at 1.5T. *Eur J Radiol.* déc 2007;64(3):345-355.
2. Biederer J, Hintze C, Fabel M. MRI of pulmonary nodules: technique and diagnostic value. *Cancer Imaging Off Publ Int Cancer Imaging Soc.* 2008;8:125-130.
3. Ley-Zaporozhan J, Puderbach M, Kauczor H-U. MR for the evaluation of obstructive pulmonary disease. *Magn Reson Imaging Clin N Am.* mai 2008;16(2):291-308, ix.
4. Wielpütz M, Kauczor H-U. MRI of the lung: state of the art. *Diagn Interv Radiol Ank Turk.* août 2012;18(4):344-353.
5. Wild JM, Marshall H, Bock M, Schad LR, Jakob PM, Puderbach M, et al. MRI of the lung (1/3): methods. *Insights Imaging.* août 2012;3(4):345-353.

6. Biederer J, Beer M, Hirsch W, Wild J, Fabel M, Puderbach M, et al. MRI of the lung (2/3). Why ... when ... how? *Insights Imaging*. août 2012;3(4):355-371.
7. Biederer J, Mirsadraee S, Beer M, Molinari F, Hintze C, Bauman G, et al. MRI of the lung (3/3)-current applications and future perspectives. *Insights Imaging*. août 2012;3(4):373-386.
8. Pearce MS, Salotti JA, Little MP, McHugh K, Lee C, Kim KP, et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet*. 4 août 2012;380(9840):499-505.
9. Mathews JD, Forsythe AV, Brady Z, Butler MW, Goergen SK, Byrnes GB, et al. Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *BMJ*. 2013;346:f2360.
10. Lotz J, Kivelitz D, Fischbach R, Beer M, Miller S. [Recommendations for utilizing computerized tomography and magnetic resonance tomography in heart diagnosis. 2--Magnetic resonance tomography]. *RöFo Fortschritte Auf Dem Geb Röntgenstrahlen Nukl*. août 2009;181(8):800-814.
11. Liszewski MC, Hersman FW, Altes TA, Ohno Y, Ciet P, Warfield SK, et al. Magnetic resonance imaging of pediatric lung parenchyma, airways, vasculature, ventilation, and perfusion: state of the art. *Radiol Clin North Am*. juill 2013;51(4):555-582.
12. Sileo C, Corvol H, Boelle P-Y, Blondiaux E, Clement A, Ducou Le Pointe H. HRCT and MRI of the lung in children with cystic fibrosis: Comparison of different scoring systems. *J Cyst Fibros Off J Eur Cyst Fibros Soc*. 3 oct 2013;
13. Schaefer JF, Kramer U. [Whole-body MRI in children and juveniles]. *RöFo Fortschritte Auf Dem Geb Röntgenstrahlen Nukl*. janv 2011;183(1):24-36.
14. Hopkins SR, Levin DL, Emami K, Kadlecsek S, Yu J, Ishii M, et al. Advances in magnetic resonance imaging of lung physiology. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. mars 2007;102(3):1244-1254.
15. Bauman G, Eichinger M. Ventilation and perfusion magnetic resonance imaging of the lung. *Pol J Radiol Pol Med Soc Radiol*. janv 2012;77(1):37-46.
16. Eichinger M, Puderbach M, Fink C, Gahr J, Ley S, Plathow C, et al. Contrast-enhanced 3D MRI of lung perfusion in children with cystic fibrosis--initial results. *Eur Radiol*. oct 2006;16(10):2147-2152.
17. Ley S, Ley-Zaporozhan J. Pulmonary perfusion imaging using MRI: clinical application. *Insights Imaging*. févr 2012;3(1):61-71.
18. Ohno Y, Koyama H, Yoshikawa T, Nishio M, Matsumoto S, Iwasawa T, et al. Pulmonary magnetic resonance imaging for airway diseases. *J Thorac Imaging*. nov 2011;26(4):301-316.
19. Mosbah K, Ruiz-Cabello J, Berthezène Y, Crémillieux Y. Aerosols and gaseous contrast agents for magnetic resonance imaging of the lung. *Contrast Media Mol Imaging*. oct 2008;3(5):173-190.
20. Mugler JP 3rd, Altes TA, Ruset IC, Dregely IM, Mata JF, Miller GW, et al. Simultaneous magnetic resonance imaging of ventilation distribution and gas uptake in the human lung using hyperpolarized xenon-129. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 14 déc 2010;107(50):21707-21712.
21. Patz S, Hersman FW, Muradian I, Hrovat MI, Ruset IC, Ketel S, et al. Hyperpolarized (129)Xe MRI: a viable functional lung imaging modality? *Eur J Radiol*. déc 2007;64(3):335-344.

22. Fain SB, Gonzalez-Fernandez G, Peterson ET, Evans MD, Sorkness RL, Jarjour NN, et al. Evaluation of structure-function relationships in asthma using multidetector CT and hyperpolarized He-3 MRI. *Acad Radiol.* juin 2008;15(6):753-762.
23. Mugler JP 3rd, Altes TA. Hyperpolarized 129Xe MRI of the human lung. *J Magn Reson Imaging JMRI.* févr 2013;37(2):313-331.
24. Saam BT, Yablonskiy DA, Kodibagkar VD, Leawoods JC, Gierada DS, Cooper JD, et al. MR imaging of diffusion of (3)He gas in healthy and diseased lungs. *Magn Reson Med Off J Soc Magn Reson Med Soc Magn Reson Med.* août 2000;44(2):174-179.
25. Yablonskiy DA, Sukstanskii AL, Woods JC, Gierada DS, Quirk JD, Hogg JC, et al. Quantification of lung microstructure with hyperpolarized 3He diffusion MRI. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. oct 2009;107(4):1258-1265.
26. Sukstanskii AL, Conradi MS, Yablonskiy DA. ³He lung morphometry technique: accuracy analysis and pulse sequence optimization. *J Magn Reson San Diego Calif* 1997. déc 2010;207(2):234-241.
27. Sukstanskii AL, Yablonskiy DA. Lung morphometry with hyperpolarized 129Xe: theoretical background. *Magn Reson Med Off J Soc Magn Reson Med Soc Magn Reson Med.* mars 2012;67(3):856-866.
28. Bannier E, Cieslar K, Mosbah K, Aubert F, Duboeuf F, Salhi Z, et al. Hyperpolarized 3He MR for sensitive imaging of ventilation function and treatment efficiency in young cystic fibrosis patients with normal lung function. *Radiology.* avr 2010;255(1):225-232.
29. Lee EY, Tracy DA, Mahmood SA, Weldon CB, Zurakowski D, Boiselle PM. Preoperative MDCT evaluation of congenital lung anomalies in children: comparison of axial, multiplanar, and 3D images. *AJR Am J Roentgenol.* mai 2011;196(5):1040-1046.
30. Yikilmaz A, Lee EY. CT imaging of mass-like nonvascular pulmonary lesions in children. *Pediatr Radiol.* déc 2007;37(12):1253-1263.
31. Ko SF, Lee TY, Kao CL, Ng SH, Wan YL, Lin JW, et al. Bronchial atresia associated with epibronchial right pulmonary artery and aberrant right middle lobe artery. *Br J Radiol.* févr 1998;71(842):217-220.
32. Naidich DP, Rumancik WM, Ettenger NA, Feiner HD, Harnanz-Schulman M, Spatz EM, et al. Congenital anomalies of the lungs in adults: MR diagnosis. *AJR Am J Roentgenol.* juill 1988;151(1):13-19.
33. Hirsch W, Sorge I, Krohmer S, Weber D, Meier K, Till H. MRI of the lungs in children. *Eur J Radiol.* nov 2008;68(2):278-288.
34. Eibel R, Herzog P, Dietrich O, Rieger CT, Ostermann H, Reiser MF, et al. Pulmonary abnormalities in immunocompromised patients: comparative detection with parallel acquisition MR imaging and thin-section helical CT. *Radiology.* déc 2006;241(3):880-891.
35. Serra G, Milito C, Mitrevski M, Granata G, Martini H, Pesce AM, et al. Lung MRI as a possible alternative to CT scan for patients with primary immune deficiencies and increased radiosensitivity. *Chest.* déc 2011;140(6):1581-1589.
36. Rizzi EB, Schinina V, Cristofaro M, Goletti D, Palmieri F, Bevilacqua N, et al. Detection of Pulmonary tuberculosis: comparing MR imaging with HRCT. *BMC Infect Dis.* 2011;11:243.
37. Yikilmaz A, Koc A, Coskun A, Ozturk MK, Mulkern RV, Lee EY. Evaluation of pneumonia in children: comparison of MRI with fast imaging sequences at 1.5T with chest radiographs. *Acta Radiol Stockh Swed* 1987. 1 oct 2011;52(8):914-919.
38. Peltola V, Ruuskanen O, Svedström E. Magnetic resonance imaging of lung infections in children. *Pediatr Radiol.* nov 2008;38(11):1225-1231.

39. Gorkem SB, Coskun A, Yikilmaz A, Zurakowski D, Mulkern RV, Lee EY. Evaluation of pediatric thoracic disorders: comparison of unenhanced fast-imaging-sequence 1.5-T MRI and contrast-enhanced MDCT. *AJR Am J Roentgenol.* juin 2013;200(6):1352-1357.
40. Vogt FM, Herborn CU, Hunold P, Lauenstein TC, Schröder T, Debatin JF, et al. HASTE MRI versus chest radiography in the detection of pulmonary nodules: comparison with MDCT. *AJR Am J Roentgenol.* juill 2004;183(1):71-78.
41. Santos MK, Elias J Jr, Mauad FM, Muglia VF, Trad CS. Magnetic resonance imaging of the chest: current and new applications, with an emphasis on pulmonology. *J Bras Pneumol Publicação Of Soc Bras Pneumol E Tisiologia.* avr 2011;37(2):242-258.
42. Carden KA, Boiselle PM, Waltz DA, Ernst A. Tracheomalacia and tracheobronchomalacia in children and adults: an in-depth review. *Chest.* mars 2005;127(3):984-1005.
43. Ciet P, Wielopolski P, Manniesing R, Lever S, de Bruijne M, Morana G, et al. Spirometer controlled cine-magnetic resonance imaging to diagnose tracheobronchomalacia in pediatric patients. *Eur Respir J.* 18 avr 2013;
44. Fiel SB, Friedman AC, Caroline DF, Radecki PD, Faerber E, Grumbach K. Magnetic resonance imaging in young adults with cystic fibrosis. *Chest.* févr 1987;91(2):181-184.
45. Hebestreit A, Schultz G, Trusen A, Hebestreit H. Follow-up of acute pulmonary complications in cystic fibrosis by magnetic resonance imaging: a pilot study. *Acta Paediatr Oslo Nor* 1992. mars 2004;93(3):414-416.
46. Hochegger B, Irion KL, Marchiori E. Chest MRI in patients with cystic fibrosis: a radiation-free method. *Thorax.* janv 2013;68(1):105-106.
47. Kinsella D, Hamilton A, Goddard P, Duncan A, Carswell F. The role of magnetic resonance imaging in cystic fibrosis. *Clin Radiol.* juill 1991;44(1):23-26.
48. Eichinger M, Heussel C-P, Kauczor H-U, Tiddens H, Puderbach M. Computed tomography and magnetic resonance imaging in cystic fibrosis lung disease. *J Magn Reson Imaging JMRI.* déc 2010;32(6):1370-1378.
49. Eichinger M, Optazait D-E, Kopp-Schneider A, Hintze C, Biederer J, Niemann A, et al. Morphologic and functional scoring of cystic fibrosis lung disease using MRI. *Eur J Radiol.* juin 2012;81(6):1321-1329.
50. Puderbach M, Eichinger M, Haeselbarth J, Ley S, Kopp-Schneider A, Tuengerthal S, et al. Assessment of morphological MRI for pulmonary changes in cystic fibrosis (CF) patients: comparison to thin-section CT and chest x-ray. *Invest Radiol.* oct 2007;42(10):715-725.
51. Failo R, Wielopolski PA, Tiddens HAWM, Hop WCJ, Mucelli RP, Lequin MH. Lung morphology assessment using MRI: a robust ultra-short TR/TE 2D steady state free precession sequence used in cystic fibrosis patients. *Magn Reson Med Off J Soc Magn Reson Med Soc Magn Reson Med.* févr 2009;61(2):299-306.
52. Puderbach M, Eichinger M. The role of advanced imaging techniques in cystic fibrosis follow-up: is there a place for MRI? *Pediatr Radiol.* juin 2010;40(6):844-849.
53. Puderbach M, Eichinger M, Gahr J, Ley S, Tuengerthal S, Schmähl A, et al. Proton MRI appearance of cystic fibrosis: comparison to CT. *Eur Radiol.* mars 2007;17(3):716-724.