



HAL
open science

Imagerie IRM de l'endolymphe : apport de la visualisation de l'utricule et du saccule dans la prise en charge des atteintes neurosensorielles de l'oreille

A. Attyé, M. Eliezer

► To cite this version:

A. Attyé, M. Eliezer. Imagerie IRM de l'endolymphe : apport de la visualisation de l'utricule et du saccule dans la prise en charge des atteintes neurosensorielles de l'oreille. *Annales françaises d'Oto-rhino-laryngologie et de Pathologie Cervico-faciale*, 2020, 137 (1), pp.46 - 50. <10.1016/j.aforl.2019.06.007>. <hal-03490044>

HAL Id: hal-03490044

<https://hal.science/hal-03490044v1>

Submitted on 21 Jul 2022

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

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



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC 4.0 - Attribution - Non-commercial use - International License

Imagerie IRM de l'endolymphe : apport de la visualisation de l'utricule et du saccule dans la prise en charge des atteintes neurosensorielles de l'oreille

Arnaud Attyé, MD, PhD ^{1,2*} – Michael Eliezer, MD ^{1,3}

1 Department of Neuroradiology and MRI, Grenoble Alpes University Hospital – SFR RMN Neurosciences, 38000 Grenoble – France

2 Univ. Grenoble Alpes, IRMaGe, 38000 Grenoble, France

3 Department of Neuroradiology, Lariboisière University Hospital, 75010 Paris – France

*** Corresponding author**

Arnaud ATTYE

Neuroradiology and MR Unit

CS 10217- Grenoble University Hospital

F-38043 Grenoble cedex 9, France

Tel: +33 4 76 76 76 60

Fax: +33 4 76 76 52 86

E-Mail: arnaudatty@gmail.com

Financement

L'étude a bénéficié du soutien de Guerbet SA pour l'IRM chez le sujet sain.

Résumé

L'hydrops endolymphatique est caractérisé par un excès d'endolymphe dans le labyrinthe membraneux et est considéré comme un marqueur histologique de la maladie de Menière.

Entre le début des années 80 et la fin des années 2000, l'exploration en IRM des patients porteurs d'une maladie de Menière visait uniquement à éliminer une cause tumorale ou malformative comme diagnostic différentiel aux troubles pressionnels. Cependant, les progrès de l'IRM haute résolution permettent maintenant de visualiser l'excès d'endolymphe dans le labyrinthe membraneux de façon sélective dans le saccule ou l'utricule en cas de maladie de Menière mais également dans d'autres présentations cliniques comme chez les patients porteurs de schwannomes cochléo-vestibulaires. Plus récemment a été mise en évidence une absence de visibilité du saccule dans une sous-population de patients porteurs d'une maladie de Menière ou une atélectasie utriculaire en cas d'aréflexie vestibulaire unilatérale ou bilatérale.

Si la quantification de ce liquide endolymphatique fait encore l'objet de débats scientifiques intenses sur la meilleure méthode de "grading" à utiliser, une sémiologie simple basée sur l'excès ou le défaut de visibilité de liquide endolymphatique par compartiment permet au médecin ORL une meilleure compréhension des mécanismes physiopathologiques des troubles cochléo-vestibulaires, et peut-être demain un monitoring effectif des thérapeutiques médicamenteuses et chirurgicales.

Mots-clefs

IRM ; hydrops endolymphatique ; Saccule ; Utricule ; Maladie de Menière

Introduction

En 1938, Hallpike et Cairns constatent sur des coupes histologiques de patients atteints d'une maladie de Menière de leur vivant, une distension du labyrinthe membraneux [1]. Altmann et Fowler examinent 29 os temporaux et retrouvent de manière constante une distension du compartiment endolymphatique [2]. Une méta-analyse récente d'études histologiques démontre sur des os temporaux de patients atteints de la maladie de Menière une dilatation constante du canal cochléaire, du saccule dans 80% des cas, de l'utricule dans 55% des cas et des ampoules dans 13% des cas [3].

L'affection débiterait au niveau du canal cochléaire pour s'étendre progressivement vers le saccule via le ductus reuniens. Le saccule dilaté vient au contact de la platine de l'étrier dans 60% des cas.

Il a cependant fallu attendre 1999 pour que Counter et ses collègues [4] étudient en IRM 4,7 T le compartiment endolymphatique cochléaire chez le cochon d'inde, après une injection intraveineuse de gadolinium [5]. Ils démontraient que l'injection de gadolinium diffusait préférentiellement vers la périlymphe à travers la barrière hémato-périlymphatique. En effet, la barrière hémato-périlymphatique est similaire à la barrière hémato-encéphalique et permet le passage de molécules de bas poids moléculaire tel que la taurine, le mannitol, les hormones stéroïdiennes et le gadolinium [6,7]. A l'inverse les barrières hémato-endolymphatique et périlymphatique-endolymphatique sont imperméables au gadolinium. Ce passage préférentiel du gadolinium offre une image contrastée entre la périlymphe imprégnée de gadolinium, et donc en hypersignal sur des séquences IRM présentant un pulse d'inversion, et l'endolymphe en hyposignal. En 2006, Naganawa et al. réalisent la première étude chez l'homme et mettent en évidence un rehaussement optimal des structures périlymphatiques sur une séquence

d'inversion-récupération réalisée 4 heures après l'injection intraveineuse dose de gadolinium [6]. Cependant, la distinction entre les compartiments périlymphatiques et endolymphatiques n'était pas réalisable. Par la suite, cette même équipe parviendra à discriminer les deux compartiments grâce à une injection intratympanique de gadolinium dilué [8,9]. Le gadolinium diffuse progressivement à travers les fenêtres ronde et ovale dans la périlymphe avec un pic de concentration à 24 heures. Cette technique a l'avantage de fournir un contraste entre les différentes structures mais a l'inconvénient de nécessiter 24 heures entre l'administration de gadolinium et la réalisation de l'IRM. De plus, des réactions inflammatoires labyrinthiques ont été décrites chez l'animal à forte dose intratympanique [10].

Du fait de l'amélioration des techniques d'imagerie, la visualisation des structures endolymphatiques est devenue possible sur une séquence 3D-FLAIR (habituellement utilisée pour étudier l'encéphale avec un contraste T2 mais en annulant le signal du liquide céphalo-rachidien) après une injection intraveineuse d'une double dose puis récemment après une administration d'une simple dose de gadolinium [11,12]. Concernant la méthode de "grading" de l'endolymphe, l'équipe Japonaise de référence a initialement proposé une évaluation semi-quantitative distinguant l'endolymphe dans la cochlée (pas d'hydrops en cas d'absence de déplacement de la membrane de Reissner, hydrops modéré en cas de déplacement de la membrane aboutissant à un canal cochléaire n'excédant pas la surface de la rampe vestibulaire, hydrops sévère quand le canal endolymphatique cochléaire présentait une surface plus importante que la rampe vestibulaire de la cochlée) et l'endolymphe dans le vestibule (pas d'hydrops si moins de 33% d'endolymphe dans le vestibule, hydrops modéré entre 33% et 50%, hydrops sévère au-delà) [13]. Cette classification a été modifiée dans une publication dans *l'American Journal of Neuroradiology*, qui a remplacé la notion de déplacement de la membrane de Reissner pour l'endolymphe cochléaire par la notion d'obstruction partielle de

la rampe vestibulaire, et a défini l'hydrops vestibulaire de grade 1 comme impliquant la présence de plus de 50% d'endolymphe dans le vestibule, et de grade 2 comme impliquant la présence d'une disparition totale de la visibilité de la périlymphe périphérique [14].

Plus récemment, a été évoquée la possibilité de réaliser de l'imagerie de l'endolymphe sans injection de produit de contraste, à l'aide de séquences haute-résolution en hyperpondération T2 [15,16]. Le principe est l'étude directe des parois du saccule, en hyposignal T2, pour en mesurer le déplacement.

Dans cette revue nous étudierons les articles traitant du défaut ou de l'excès du liquide endolympatique tel qu'étudiés en IRM et leurs corrélations cliniques. Nous avons utilisé les critères PRISMA pour les revues systématiques et les méta-analyses suivant les items suivants : définition des participants, type d'intervention, critères de jugement principal et type d'étude.

Nous avons donc uniquement sélectionné les études incluant une IRM du labyrinthe chez les témoins et des patients présentant une symptomatologie cochléo-vestibulaire. Le critère d'inclusion était la différenciation des compartiments utriculaire et/ou sacculaire dans la méthodologie de l'étude IRM pour l'estimation de l'excès ou de défaut de l'endolymphe.

Une recherche structurée sur PubMed a été réalisée le 3 mars 2019 avec les mots « MRI » et « Endolymphatic Hydrops » (n= 415). Les 2 auteurs ont sélectionné les articles publiés après 2013 (n= 171). Après relecture du titre et du résumé, nous avons trouvé 56 articles intéressants desquels nous avons exclu les études qui ne différencient pas le saccule de l'utricule pour la visualisation de l'endolymphe. Nous avons sélectionné 11 articles résumés dans la discussion de cette mise au point (Tableau 1). Les autres articles référencés le sont à titre explicatif.

Discussion

L'imagerie de l'excès d'endolymphe : hydrops « primaire » et « secondaire »

Le "grading" semi-quantitatif initialement publié par l'équipe de Nagoya puis repris par l'équipe de Baráth et al. n'évalue pas séparément le saccule de l'utricule pour définir la présence d'un hydrops [13,14]. Deux classifications ont ensuite distingué le saccule de l'utricule, d'abord le « SURI score » (Saccule to Utricle Ratio Inversion) [17]. Dans cette classification, l'hydrops sacculaire est défini en fonction de l'utricule pour 2 raisons : une biomécanique différente avec un saccule plus compliant que l'utricule au niveau de sa paroi; et en raison de la variabilité inter-machine IRM avec des surfaces d'utricule et de saccule qui peuvent varier de façon concomitante lorsque les paramètres biophysiques de la séquence 3D-FLAIR sont modifiés [18]. L'hydrops sacculaire a donc été défini par une taille supérieure ou égale à l'utricule sur 2 coupes de références. Néanmoins, un hydrops sacculaire n'est retrouvé que chez 50% des patients présentant une maladie de Menière, et il dépend du seuil auditif [19]. Il était en effet systématiquement présent chez tous les patients présentant une surdité de perception sur les basses fréquences de plus de 40 dB.

Le principal avantage de cette classification était la parfaite spécificité puisqu'aucun SURI n'a été retrouvé chez les sujets sains. Comme dans les modèles animaux expérimentaux, il a été supposé que lorsque la compliance du saccule était dépassée, des lésions cochléaires apparaissaient. On notera cependant que la sécrétion d'endolymphe peut aussi se faire au niveau des cellules sombres du saccule, et que des lésions cellulaires du ligament spiral de la cochlée semblent préexister dans les modèles animaux de Menière avant l'apparition de l'hydrops [20]. Néanmoins, le SURI score avait l'inconvénient d'une faible sensibilité chez les patients porteurs d'une maladie de Menière définie. La classification de Bernaerts et al. [21] utilise le "grading" cochléaire semi-quantitatif de l'équipe de Baráth et al. et ajoute à la

classification japonaise un grade supplémentaire basé sur le SURI permettant d'augmenter à la fois la sensibilité et la spécificité chez les patients porteurs d'une maladie de Menière. Ils proposent également d'évaluer la perméabilité de la barrière hémato-labyrinthique comme critère associé (les patients porteurs d'une maladie de Menière unilatérale présentant une prise de contraste du tour basal de la cochlée associée à l'hydrops en lui-même) [21–23]. De façon intéressante, une équipe italienne a étudié les variations anatomiques de la position de l'utricule et du saccule chez des sujets sains, retrouvant dans une minorité d'oreilles témoins un aspect ovoïde du saccule [24].

Dernièrement, il a été proposé d'utiliser des séquences 3D haute-résolution T2 plutôt que des séquences 3D-FLAIR, qui ont l'avantage d'être sans injection [15,16]. Venkatasamy et al. rapportent que le diagnostic d'hydrops endolymphatique repose à l'aide de ces séquences sur la mesure de la hauteur et largeur du saccule dans un plan coronal avec une sensibilité de 84% et une spécificité de 100% [16]. Néanmoins, cette méthode a l'inconvénient d'étudier uniquement le saccule et de ne pas permettre d'étudier la prise de contraste associée. De plus, plusieurs études ont rapporté que l'utricule, même s'il ne se dilate que faiblement, peut-être protrusif dans le canal semi-circulaire latéral chez des patients porteurs d'une maladie de Menière, ce qui ne peut pas être évalué avec une séquence en pondération T2 [25].

Chez les patients présentant un schwannome vestibulaire du fait de l'augmentation du taux protéique périlymphatique, il existe une chute du signal du compartiment périlymphatique contrastant spontanément avec l'endolymphe qui garde un signal normal hyperintense [26] sur les séquences pondérées T2. Cette chute de signal périlymphatique est visible uniquement lorsque le schwannome vestibulaire est responsable d'une obstruction complète du conduit auditif interne. Dans une étude utilisant des séquence pondérée T2 en haute résolution, une corrélation entre la perte auditive et la présence d'un hydrops utriculaire est retrouvée [27]. A

noter que les séquences 3D-FLAIR sans injection permettent également de poser le diagnostic d'hydrops utriculaire en cas de schwannome obstructif [28].

L'imagerie du défaut d'endolymphe : Fistule intralabyrinthique et atélectasie utriculaire

Une étude cas-contrôle a rapporté chez les patients présentant une maladie de Menière définie selon les critères AAO-HNS 2015, une absence de visibilité du saccule du côté homolatéral et controlatéral à l'oreille malade [17]. Cette anomalie n'avait jamais été mise en évidence chez les témoins. Les auteurs avaient émis l'hypothèse d'une fistule endolymphatique permettant le passage de gadolinium entre la périlymphe et le saccule comme l'avaient déjà suggéré Kimura et Schuknecht en 1975 [29]. Contrairement à l'hydrops sacculaire, l'absence de visibilité du saccule ne semble pas corrélée au degré de perte auditive puisque deux patients présentaient cette anomalie du côté controlatéral à l'oreille malade.

Il est également possible que l'absence de visibilité du saccule corresponde à un collapsus du pars inferior comme cela a pu être observé en histologie dans divers syndromes malformatifs ou dans des phénomènes dégénératifs secondaires [4].

Des études prospectives sont nécessaires afin de clarifier le lien entre l'absence de visibilité du saccule et les symptômes cochléo-vestibulaires.

Récemment, il a été démontré chez les patients présentant une aréflexie vestibulaire, une atélectasie du pars superior (utricule et ampoules) isolée en IRM [30]. Les explorations fonctionnelles sont concordantes avec les données de l'imagerie puisqu'aucune réponse, de l'utricule et des ampoules, n'est retrouvée. En 1988, Merchant et Schuknecht ont retrouvé sur des pièces histologiques que 8 sujets sur 213 présentaient une atélectasie de l'utricule et des ampoules avec deux formes cliniques de présentation initiale [31]. Dans la forme

paroxystique, les patients présentent une crise vertigineuse similaire à la « névrite » vestibulaire sans signes auditif ou neurologique. Dans la forme insidieuse, le début des symptômes est difficile à dater. Dans les deux cas, les patients décrivent des troubles de l'équilibre chronique avec une instabilité ou des épisodes transitoires de crises vertigineuses.

Apport de l'IRM à la compréhension physiopathologie des troubles pressionnels

Comme les études radiologiques le montrent, l'hydrops endolymphatique concerne essentiellement le pars inferior (sacculle et canal cochléaire) qui possède une voie de drainage différente du pars superior (utricule et ampoules) [32]. En effet, le pars superior semblerait moins concerné du fait de la présence d'une valve utriculo-endolymphatique (valve de Bast) [33]. Le sac endolymphatique permet le drainage de l'endolymphe via l'aqueduc du vestibule comme le montre le modèle expérimental d'hydrops endolymphatique développé par Kimura et Schuknecht consistant en une occlusion de l'aqueduc du vestibule [34]. De plus, chez les patients présentant une maladie de Menière, il existe une nette diminution de la visibilité des parois de l'aqueduc du vestibule sur les séquences 3D-FLAIR, renforçant cette théorie d'anomalie du flux longitudinal [35]. Cette étude est particulièrement intéressante puisque l'atteinte de la paroi de l'aqueduc, présumée calcique avec une minéralisation des chondroblastes déjà démontrées en histologie [36] et en Cone Beam CT [37], est bilatérale chez des patients présentant une maladie à expression clinique unilatérale.

La sécrétion de périlymphe peut provenir de deux sources différentes : 1) le plasma par l'intermédiaire de la barrière hémato-périlymphatique, 2) le LCR par l'intermédiaire de l'aqueduc cochléaire lorsque ce dernier est perméable. L'aqueduc cochléaire permet l'adaptation rapide de la pression périlymphatique aux changements rapides de pression de LCR. Lorsque l'aqueduc cochléaire est obstrué (70% des cas), l'équilibre des pressions est

limité et retardé car le changement de pression du LCR est d'abord transmis au sac endolymphatique puis à l'endolymphe et enfin au liquide périlymphatique [32].

En cas d'hypotension intracrânienne, une hypopression périlymphatique (et donc un hydrops endolymphatique a vacuo) est possible [38]. Néanmoins, cette association n'a pas été mise en évidence [39]. Il en est de même en cas d'hypertension intracrânienne « transitoire » (mouchage, éternuement...) responsable d'une rupture de la fenêtre ronde qui est à l'origine d'une fuite périlymphatique au sein de l'oreille moyenne et donc d'un hydrops endolymphatique par hypopression périlymphatique [40]. Cependant à ce jour, aucune étude radiologique ne retrouve une telle association.

Conclusion :

Les études radiologiques en IRM permettent d'apporter des informations anatomiques précises différenciant l'atteinte lésionnelle sacculaire et utriculaire dans plusieurs présentations cliniques (Figure 1). La connaissance fine de la radioanatomie par le médecin otologiste et l'amélioration de la fiabilité des séquences IRM devrait permettre dans le futur une meilleure prise en charge globale des patients porteurs d'atteinte labyrinthique.

Conflits d'intérêts

Nous déclarons avoir reçu des fonds des industriels suivants : Guerbet et Bayer ; uniquement utilisés à payer les examens IRM des sujets sains. Pas d'autre conflit d'intérêt.

Tableau 1 : Etudes IRM décrivant séparément l’utricule et le saccule dans les critères d’analyse

1er auteur	Année de publication	ref.	Presentation clinique
Simon	2017	[13]	Maladie de Menière
Venkatasamy	2017	[14]	Maladie de Menière
Attyé	2016	[16]	Maladie de Menière
Eliezer	2018	[17]	Maladie de Menière
Attyé	2018	[18]	Maladie de Menière
Bernaerts	2019	[20]	Maladie de Menière
Eliezer	2018	[22]	Maladie de Menière
Conte	2018	[23]	Asymptomatique
Eliezer	2019	[26]	Schwannome vestibulaire
Eliezer	2018	[29]	Areflexie vestibulaire
Attyé	2018	[34]	Maladie de Menière

Figure 1 : Guide d'interprétation pour l'otologiste des variations de volume compartimental de l'utricule et du saccule.

La ligne du haut (A,B,C) est une représentation schématique du labyrinthe en 3D. Les images E à J représentent des coupes 3D-FLAIR extraites de sujets sains (D et G), de patients avec un hydrops endolymphatique (E et H) et de patients présentant respectivement une atélectasie utriculaire (F) et une fistule du saccule (I).

L'utricule est représenté par une flèche blanche, en position normale sur l'image D et protrusive dans la portion non-ampullaire du canal semi-circulaire latéral sur l'image E, réalisant un hydrops canalaire. Sur l'image F il est en limite de visibilité en raison du tableau atélectasique. Le saccule est représenté par une flèche blanche pointillé de volume normal (G), avec un SURI positif réalisant l'hydrops sacculaire (H) et non visible (I). Pour information les ampoules du canal semi-circulaire postérieur sont représentées par une flèche pointillée grise.

Références

- [1] C.S. Hallpike, H. Cairns, Observations on the Pathology of Menière's Syndrome: (Section of Otology), *Proc. R. Soc. Med.* 31 (1938) 1317–1336.
- [2] F. Altmann, Surgical treatment of Menière's disease, *Laryngoscope.* 59 (1949) 1045–1067.
- [3] D.J. Pender, Membrane Stress in the Human Labyrinth and Meniere Disease: A Model Analysis, *Int Arch Otorhinolaryngol.* 19 (2015) 336–342. doi:10.1055/s-0035-1549157.
- [4] S.A. Counter, B. Bjelke, T. Klason, Z. Chen, E. Borg, Magnetic resonance imaging of the cochlea, spiral ganglia and eighth nerve of the guinea pig, *Neuroreport.* 10 (1999) 473–479.
- [5] D.M. Niyazov, J.C. Andrews, D. Strelhoff, S. Sinha, R. Lufkin, Diagnosis of endolymphatic hydrops in vivo with magnetic resonance imaging, *Otol. Neurotol.* 22 (2001) 813–817.
- [6] S. Naganawa, T. Komada, H. Fukatsu, T. Ishigaki, O. Takizawa, Observation of contrast enhancement in the cochlear fluid space of healthy subjects using a 3D-FLAIR sequence at 3 Tesla, *Eur Radiol.* 16 (2006) 733–737. doi:10.1007/s00330-005-0046-8.
- [7] K. Jahnke, The blood-perilymph barrier, *Arch Otorhinolaryngol.* 228 (1980) 29–34.
- [8] T. Nakashima, S. Naganawa, M. Sugiura, M. Teranishi, M. Sone, H. Hayashi, S. Nakata, N. Katayama, I.M. Ishida, Visualization of endolymphatic hydrops in patients with Meniere's disease, *Laryngoscope.* 117 (2007) 415–420. doi:10.1097/MLG.0b013e31802c300c.
- [9] S. Naganawa, H. Satake, M. Kawamura, H. Fukatsu, M. Sone, T. Nakashima, Separate visualization of endolymphatic space, perilymphatic space and bone by a single pulse sequence; 3D-inversion recovery imaging utilizing real reconstruction after intratympanic Gd-DTPA administration at 3 Tesla, *Eur Radiol.* 18 (2008) 920–924. doi:10.1007/s00330-008-0854-8.
- [10] M. Park, H.S. Lee, H. Kim, S.H. Oh, J.H. Lee, M.-W. Suh, Differences in perilymphatic space enhancement and adverse inflammatory reaction after intratympanic injection of two different gadolinium agents: A 9.4-T magnetic resonance imaging study, *Hear. Res.* 333 (2016) 118–126. doi:10.1016/j.heares.2015.10.022.

- [11] S. Naganawa, M. Yamazaki, H. Kawai, K. Bokura, M. Sone, T. Nakashima, Visualization of endolymphatic hydrops in Menière's disease with single-dose intravenous gadolinium-based contrast media using heavily T(2)-weighted 3D-FLAIR, *Magn Reson Med Sci.* 9 (2010) 237–242.
- [12] S. Naganawa, M. Yamazaki, H. Kawai, K. Bokura, M. Sone, T. Nakashima, Imaging of Menière's disease after intravenous administration of single-dose gadodiamide: utility of subtraction images with different inversion time, *Magn Reson Med Sci.* 11 (2012) 213–219.
- [13] T. Nakashima, S. Naganawa, I. Pyykko, W.P.R. Gibson, M. Sone, S. Nakata, M. Teranishi, Grading of endolymphatic hydrops using magnetic resonance imaging, *Acta Otolaryngol Suppl.* (2009) 5–8. doi:10.1080/00016480902729827.
- [14] K. Baráth, B. Schuknecht, A.M. Naldi, T. Schrepfer, C.J. Bockisch, S.C.A. Hegemann, Detection and grading of endolymphatic hydrops in Menière disease using MR imaging, *AJNR Am J Neuroradiol.* 35 (2014) 1387–1392. doi:10.3174/ajnr.A3856.
- [15] F. Simon, J.-P. Guichard, R. Kania, J. Franc, P. Herman, C. Hautefort, Saccular measurements in routine MRI can predict hydrops in Menière's disease, *Eur Arch Otorhinolaryngol.* 274 (2017) 4113–4120. doi:10.1007/s00405-017-4756-8.
- [16] A. Venkatasamy, F. Veillon, A. Fleury, M. Eliezer, M. Abu Eid, B. Romain, H. Vuong, D. Rohmer, A. Charpiot, H. Sick, S. Riehm, Imaging of the saccule for the diagnosis of endolymphatic hydrops in Meniere disease, using a three-dimensional T2-weighted steady state free precession sequence: accurate, fast, and without contrast material intravenous injection, *Eur Radiol Exp.* 1 (2017) 14. doi:10.1186/s41747-017-0020-7.
- [17] A. Attyé, M. Eliezer, N. Boudiaf, I. Tropres, D. Chechin, S. Schmerber, G. Dumas, A. Krainik, MRI of endolymphatic hydrops in patients with Meniere's disease: a case-controlled study with a simplified classification based on saccular morphology, *Eur Radiol.* (2016). doi:10.1007/s00330-016-4701-z.
- [18] M. Eliezer, A. Gillibert, I. Tropres, A. Krainik, A. Attyé, Influence of inversion time on endolymphatic hydrops evaluation in 3D-FLAIR imaging, *Journal of Neuroradiology.* (n.d.). doi:10.1016/j.neurad.2017.06.002.
- [19] A. Attyé, M. Eliezer, M. Medici, I. Tropres, G. Dumas, A. Krainik, S. Schmerber, In vivo imaging of saccular hydrops in humans reflects sensorineural hearing loss rather than Meniere's disease symptoms, *Eur Radiol.* (2018). doi:10.1007/s00330-017-5260-7.
- [20] S.N. Merchant, J.C. Adams, J.B. Nadol, Pathophysiology of Meniere's syndrome: are symptoms caused by endolymphatic hydrops?, *Otol. Neurotol.* 26 (2005) 74–81.
- [21] A. Bernaerts, R. Vanspauwen, C. Blaiwie, J. van Dinther, A. Zarowski, F.L. Wuyts, S.

- Vanden Bossche, E. Offeciers, J.W. Casselman, B. De Foer, The value of four stage vestibular hydrops grading and asymmetric perilymphatic enhancement in the diagnosis of Menière's disease on MRI, *Neuroradiology*. (2019). doi:10.1007/s00234-019-02155-7.
- [22] M. Tagaya, M. Yamazaki, M. Teranishi, S. Naganawa, T. Yoshida, H. Otake, S. Nakata, M. Sone, T. Nakashima, Endolymphatic hydrops and blood-labyrinth barrier in Menière's disease, *Acta Otolaryngol.* 131 (2011) 474–479.
doi:10.3109/00016489.2010.534114.
- [23] M. Eliezer, G. Poillon, A. Gillibert, J. Horion, Y. Cruypheninck, E. Gerardin, N. Magne, A. Attyé, Comparison of enhancement of the vestibular perilymph between gadoterate meglumine and gadobutrol at 3-Tesla in Meniere's disease, *Diagn Interv Imaging.* 99 (2018) 271–277. doi:10.1016/j.diii.2018.01.002.
- [24] G. Conte, L. Caschera, B. Tuscano, L. Piergallini, S. Barozzi, F. Di Bernardino, D. Zanetti, C. Scuffi, E. Scola, C. Sina, F. Triulzi, Three-Tesla magnetic resonance imaging of the vestibular endolymphatic space: A systematic qualitative description in healthy ears, *Eur J Radiol.* 109 (2018) 77–82. doi:10.1016/j.ejrad.2018.10.023.
- [25] S. Sugimoto, T. Yoshida, M. Teranishi, M. Kobayashi, M. Shimono, S. Naganawa, M. Sone, Significance of Endolymphatic Hydrops Herniation Into the Semicircular Canals Detected on MRI, *Otol. Neurotol.* 39 (2018) 1229–1234.
doi:10.1097/MAO.0000000000002022.
- [26] A. Venkatasamy, D. Le Foll, A. Karol, B. Lhermitte, A. Charpiot, C. Debry, F. Proust, N. Meyer, F. Veillon, Differentiation of vestibular schwannomas from meningiomas of the internal auditory canal using perilymphatic signal evaluation on T2-weighted gradient-echo fast imaging employing steady state acquisition at 3T, *Eur Radiol Exp.* 1 (2017) 8.
doi:10.1186/s41747-017-0012-7.
- [27] M. Eliezer, G. Poillon, C. Maquet, A. Gillibert, J. Horion, J.-P. Marie, J.-P. Guichard, N. Magne, A. Attyé, Sensorineural hearing loss in patients with vestibular schwannoma correlates with the presence of utricular hydrops as diagnosed on heavily T2-weighted MRI, *Diagn Interv Imaging.* (2019). doi:10.1016/j.diii.2019.01.006.
- [28] I.H. Lee, H.-J. Kim, W.H. Chung, E. Kim, J.W. Moon, S.T. Kim, K.H. Kim, P. Jeon, H.S. Byun, Signal intensity change of the labyrinth in patients with surgically confirmed or radiologically diagnosed vestibular schwannoma on isotropic 3D fluid-attenuated inversion recovery MR imaging at 3 T, *Eur Radiol.* 20 (2010) 949–957. doi:10.1007/s00330-009-1626-9.
- [29] R.S. Kimura, H.F. Schuknecht, Effect of fistulae on endolymphatic hydrops, *Ann.*

Otol. Rhinol. Laryngol. 84 (1975) 271–286.

[30] M. Eliezer, A. Attyé, J.-P. Guichard, H. Vitaux, A. Guillonnet, M. Toupet, P. Herman, R. Kania, E. Houdart, C. Hautefort, Vestibular atelectasis: Myth or reality?, *Laryngoscope*. (2019). doi:10.1002/lary.27793.

[31] S.N. Merchant, H.F. Schuknecht, Vestibular atelectasis, *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* 97 (1988) 565–576. doi:10.1177/000348948809700601.

[32] R.R. Ciuman, Communication routes between intracranial spaces and inner ear: function, pathophysiologic importance and relations with inner ear diseases, *Am J Otolaryngol.* 30 (2009) 193–202. doi:10.1016/j.amjoto.2008.04.005.

[33] R. Hofman, J.M. Segenhout, J. a. N. Buytaert, J.J.J. Dirckx, H.P. Wit, Morphology and function of Bast's valve: additional insight in its functioning using 3D-reconstruction, *Eur Arch Otorhinolaryngol.* 265 (2008) 153–157. doi:10.1007/s00405-007-0424-8.

[34] R.S. Kimura, Animal models of endolymphatic hydrops, *Am J Otolaryngol.* 3 (1982) 447–451.

[35] A. Attyé, M. Barma, S. Schmerber, G. Dumas, M. Eliezer, A. Krainik, The vestibular aqueduct sign: Magnetic resonance imaging can detect abnormalities in both ears of patients with unilateral Meniere's disease, *J Neuroradiol.* (2018). doi:10.1016/j.neurad.2018.10.003.

[36] L. Michaels, S. Soucek, F. Linthicum, The intravestibular source of the vestibular aqueduct: Its structure and pathology in Menière's disease, *Acta Otolaryngol.* 129 (2009) 592–601. doi:10.1080/00016480802342416.

[37] H. Yamane, K. Konishi, H. Sakamaoto, H. Yamamoto, N. Matsushita, M. Oishi, H. Iguchi, Y. Inoue, Practical 3DCT imaging of the vestibular aqueduct for Meniere's disease, *Acta Otolaryngol.* 135 (2015) 799–806. doi:10.3109/00016489.2015.1034879.

[38] F. Portier, C. de Minteguiaga, E. Racy, P.T.B. Huy, P. Herman, Spontaneous intracranial hypotension: a rare cause of labyrinthine hydrops, *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* 111 (2002) 817–820. doi:10.1177/000348940211100910.

[39] A. Attyé, M. Eliezer, A. Galloux, J. Pietras, I. Tropres, S. Schmerber, G. Dumas, A. Krainik, Endolymphatic hydrops imaging: Differential diagnosis in patients with Meniere disease symptoms, *Diagn Interv Imaging.* (2017). doi:10.1016/j.diii.2017.06.002.

[40] Y. Nomura, M. Hara, H. Funai, T. Okuno, Endolymphatic hydrops in perilymphatic fistula, *Acta Otolaryngol.* 103 (1987) 469–476.

