



UNIVERSITE DE LILLE
FACULTE DE MEDECINE HENRI WAREMBOURG
Année : 2019

THESE POUR LE DIPLOME D'ETAT
DE DOCTEUR EN MEDECINE

**Suivi IRM des patients traités par radiochirurgie pour une malformation
artérioveineuse cérébrale : le gadolinium est-il toujours nécessaire ?**

Présentée et soutenue publiquement le 4 octobre 2019 à 14h
au Pôle Formation
Par Guillaud Ophélie

JURY

Président :

Monsieur le Professeur Jean-Pierre Pruvo

Assesseurs :

Monsieur le Professeur Nicolas Reyns

Madame le Professeur Charlotte Cordonnier

Monsieur le Docteur Fouzi Bala

Directeur de Thèse :

Monsieur le Professeur Xavier Leclerc

Avertissement

La Faculté n'entend donner aucune approbation aux opinions émises

dans les thèses : celles-ci sont propres à leurs auteurs.

TABLE DES MATIERES

RESUME	1
LISTE DES ABREVIATIONS	2
<u>INTRODUCTION GENERALE</u>	3
DEFINITION	3
EPIDEMIOLOGIE	5
MODE DE REVELATION	6
DIAGNOSTIC EN IMAGERIE	8
TRAITEMENT.....	24
OBJECTIF DE L'ETUDE.....	29
<u>ARTICLE</u>	30
ABSTRACT	31
INTRODUCTION	32
MATERIAL AND METHODS	34
POPULATION.....	34
IMAGING METHODS	35
IMAGING ANALYSIS.....	36
STATISTICAL ANALYSIS.....	37
RESULTS	38
DSA FINDINGS	38
INTEROBSERVER AGREEMENT	40
COMPARISON BETWEEN MRI AND DSA	41
CONTRAST-ENHANCED MRI FOR THE DETECTION OF RESIDUAL AVM	43
ASL/TOF FOR THE DETECTION OF RESIDUAL AVM.....	45
COMPARISON BETWEEN ASL/TOF AND CONTRAST-ENHANCED MRI.....	47
DISCUSSION	51
CONCLUSION	54
REFERENCES	55
<u>CONCLUSION GENERALE</u>	58

RESUME

OBJECTIF : Le suivi IRM des malformations artérioveineuses cérébrales (MAV) repose essentiellement sur les séquences IRM injectées. Pourtant, les séquences IRM arterial spin labeling (ASL) et time of flight (TOF) sont très sensibles pour la détection d'un nidus résiduel après traitement. L'objectif de cette étude était de comparer les séquences IRM non injectées ASL et TOF aux séquences IRM injectées ARM 4D et 3D T1 EG pour l'évaluation des MAV traitées par radiochirurgie.

METHODE : Dans cette étude rétrospective, nous avons inclus 28 patients traités par radiochirurgie pour une petite MAV (< 20 mm), ayant bénéficiés d'une IRM et d'une artériographie, avec un délai moyen de 4,2 ans entre le traitement et l'imagerie. 3 lecteurs ont interprété les images de façon indépendante sans connaissance des examens antérieurs au cours de 3 sessions séparées à 1 mois d'intervalle selon le schéma suivant : (i) séquences injectées uniquement (ARM 4D et 3D T1 EG après injection) ; (ii) séquences ASL et 3D TOF uniquement ; (iii) toutes les séquences. Le but était de déterminer la présence ou l'absence de nidus résiduel selon une échelle de probabilité de 1 à 5. L'artériographie était l'examen de référence.

RESULTATS : La session ASL/TOF avait la meilleure concordance interobservateur ($\kappa = 0.88$ IC 95% 0.72-1). La spécificité était de 100% pour l'ensemble des sessions et la sensibilité était la meilleure pour ASL/TOF (Se = 85 % IC 95% 62-97), comparée aux séquences injectées (Se = 55% IC 95% 21-73) et à toutes les séquences (Se = 75 % IC 95% 51-91) ($p = 0.008$). Parmi les patients présentant une MAV résiduelle en artériographie, 6 étaient détectées uniquement sur les séquences ASL/TOF, dont 3 visibles exclusivement en ASL.

CONCLUSION : Dans cette étude, les séquences IRM sans injection ASL/TOF étaient plus performantes que les séquences IRM avec injection de gadolinium pour la détection d'un nidus résiduel chez des patients traités par radiochirurgie pour une petite MAV cérébrale.

LISTE DES ABREVIATIONS

ARM	Angiographie par résonance magnétique
ASL	Arterial Spin Labelling
AVM	Arteriovenous malformation
AVS	Arteriovenous shunting
EG	Echo de gradient
GRE	Gradient recalled-echo
DSA	Digital subtraction angiography
IRM	Imagerie par résonance magnétique
MAV	Malformation artérioveineuse
MRA	Magnetic resonance angiography
MRI	Magnetic resonance imaging
PLD	Post label delay
SWI	Susceptibility weighted imaging
TI	Temps d'inversion
TOF	Time of flight

INTRODUCTION GENERALE

LES MALFORMATIONS ARTERIOVEINEUSES CEREBRALES

DEFINITION

Ce sont des malformations vasculaires congénitales, constituées par une communication anormale (shunt) entre sang artériel et veineux, sans réseau capillaire normal interposé. Elles comprennent trois compartiments : un compartiment artériel composé d'une ou plusieurs afférences parfois tortueuses et dilatées, un nidus représentant le cœur de la malformation, composé de shunts multiples formant un peloton vasculaire et un compartiment veineux composé d'une ou plusieurs efférences plus ou moins dilatées s'abouchant dans les sinus veineux profonds et/ou superficiels (**Figure 1**). Les shunts artério-veineux sont responsables d'une augmentation du débit sanguin, d'un hémodétournement (absence de vascularisation capillaire), d'une artérialisation veineuse. Il peut en résulter la création d'anévrismes artériels ou intranidaux et/ou un effet de « vol vasculaire » avec hypoperfusion parenchymateuse. Le risque principal est la rupture du nidus ou d'un anévrisme d'hyperdébit associé à l'origine d'une hémorragie cérébro-méningée (1,2). Ce type de malformation est généralement sporadique et unique. Lorsqu'elles sont multiples, un syndrome génétique est à suspecter (maladie de Rendu-Osler, syndrome de Sturge Weber).

-
1. Arteriovenous Malformation Study Group. Arteriovenous malformations of the brain in adults. *N Engl J Med* 1999;340:1812–8.
 2. Ajiboye N, Chalouhi N, Starke RM, Zanaty M, Bell R. Cerebral arteriovenous malformations: evaluation and management. *ScientificWorldJournal*. 2014;2014:649036.

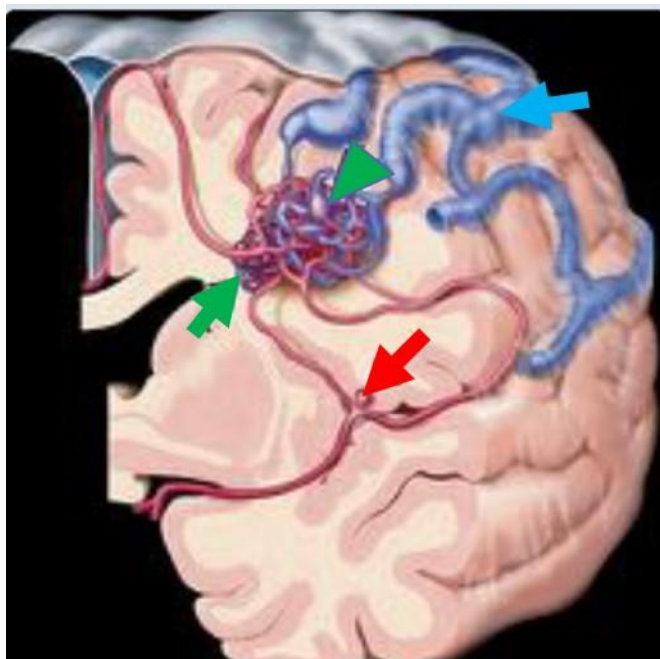


Figure 1 : Schéma d'une malformation artério-veineuse cérébrale : Artères afférentes dilatées avec anévrisme artériel (flèche rouge), nidus (flèche verte) avec anévrisme intranidal (tête de flèche), veines de drainage dilatées (flèche bleue).

(Osborn –Brain)

EPIDEMIOLOGIE

C'est une pathologie rare, la prévalence et l'incidence sont difficiles à évaluer. La prévalence est estimée à 15 cas/100 000 personnes et l'incidence estimée entre 0.9 et 1.3 nouveaux cas/100 000 personnes par an. Elles se révèlent généralement entre 20 et 40 ans, sans prédisposition liée au sexe. (3,4). Elles sont localisées dans 85 % des cas à l'étage supratentorial.

-
3. Laakso A, Hernesniemi J. Arteriovenous malformations: epidemiology and clinical presentation. *Neurosurg Clin N Am.* 2012;23:1–6.
 4. Al-Shahi R, Fang JSY, Lewis SC, Warlow CP. Prevalence of adults with brain arteriovenous malformations: a community based study in Scotland using capture-recapture analysis. *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* 2002;547–51.

MODE DE REVELATION

L'hémorragie cérébrale est le mode de révélation le plus fréquent et le plus grave (42 à 70 % selon les études) avec un risque de mortalité estimé entre 10 et 20 %. Le risque de rupture d'une MAV non traitée est estimé entre 2 et 4 % par an. Ce risque doit cependant être modulé en fonction de la présence ou non de facteurs de risque hémorragique : antécédent de rupture de la MAV, localisation profonde, drainage veineux profond unique, anévrisme artériel associé.

Le risque de saignement d'une MAV non traitée est donc très variable estimé entre 1% par an pour une MAV asymptomatique et sans facteur de risque hémorragique à 35% par an en cas de MAV profonde à drainage veineux unique et profond révélée sur un mode hémorragique (**Figure 2**) (5-7).

-
5. Yamada S, Takagi Y, Nozaki K, Kikuta K, Hashimoto N. Risk factors for subsequent hemorrhage in patients with cerebral arteriovenous malformations. *J Neurosurg.* 2007:965–72.
 6. da Costa L, Wallace MC, Ter Brugge KG, O'Kelly C, Willinsky RA, Tymianski M. The natural history and predictive features of hemorrhage from brain arteriovenous malformations. *Stroke.* 2009:100–5.
 7. Stapf C, Mast H, Sciacca RR, Choi JH, Khaw AV, Connolly ES, et al. Predictors of hemorrhage in patients with untreated brain arteriovenous malformation. *Neurology.* 2006:1350–5.

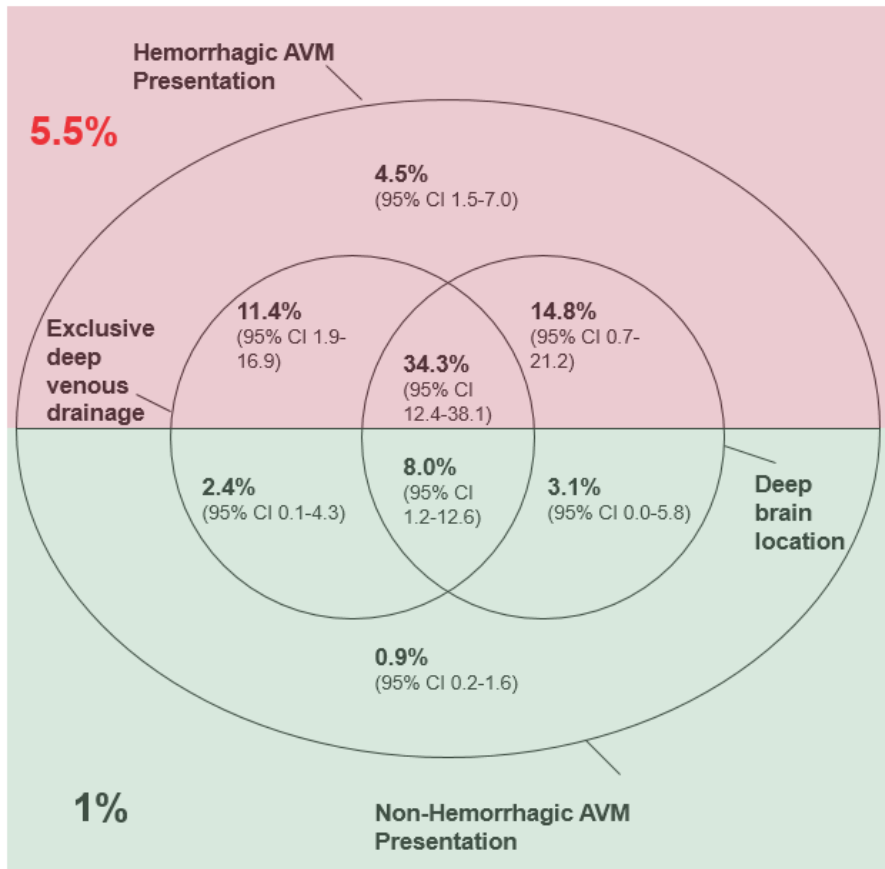


Figure 2 : Colombia AVM hemorrhage risk model
(Stapf et al., Neurology 2006)

La crise convulsive est le deuxième mode de révélation le plus fréquent (18 à 40%). Dans la plupart des cas (65%) il s'agit d'une crise convulsive généralisée. La survenue d'une crise n'est pas un facteur de risque d'hémorragie (2,3,8).

Les autres modes de révélation sont les céphalées chroniques (5 à 14%) et les déficits neurologiques focaux (5 à 10 %) pouvant être transitoires ou permanents, liés à l'effet de masse, ou à un phénomène de vol vasculaire (2,3). Dans les autres cas il s'agit d'une découverte fortuite.

8. Osipov A, Koennecke H-C, Hartmann A, Young WL, Pile-Spellman J, Hacein-Bey L, et al. Seizures in Cerebral Arteriovenous Malformations: Type, Clinical Course, and Medical Management. Interv Neuroradiol. 1997:37-41

DIAGNOSTIC EN IMAGERIE

Scanner

C'est souvent l'examen de première intention en cas de MAV rompue. L'acquisition sans injection montre un hématome le plus souvent lobaire, pouvant être associé à une hémorragie sous arachnoïdienne et/ou intra ventriculaire. Il peut être responsable d'un effet de masse sur le parenchyme adjacent avec signes d'engagement cérébral. La MAV peut être visible sans injection au contact de l'hématome sous forme d'hyperdensités spontanées d'allure vasculaire, serpigneuses, parfois calcifiées (9).

Après injection de produit de contraste iodé, le diagnostic de MAV est évoqué devant un rehaussement vasculaire serpigneux au contact de l'hématome. Les afférences artérielles sont souvent dilatées, tortueuses et doivent être différenciées du nidus et du drainage veineux pouvant être ectasique et multiple (**Figure 3**). Des anévrysmes d'hyperdébit devront également être systématiquement recherchés sur les artères afférentes ou au sein du nidus. Ces éléments sont notamment importants lorsqu'un geste chirurgical est indiqué en urgence (évacuation d'un hématome compressif).

9. Kidwell CS, Wintermark M. Imaging of intracranial haemorrhage. Lancet Neurol 2008;256-67.

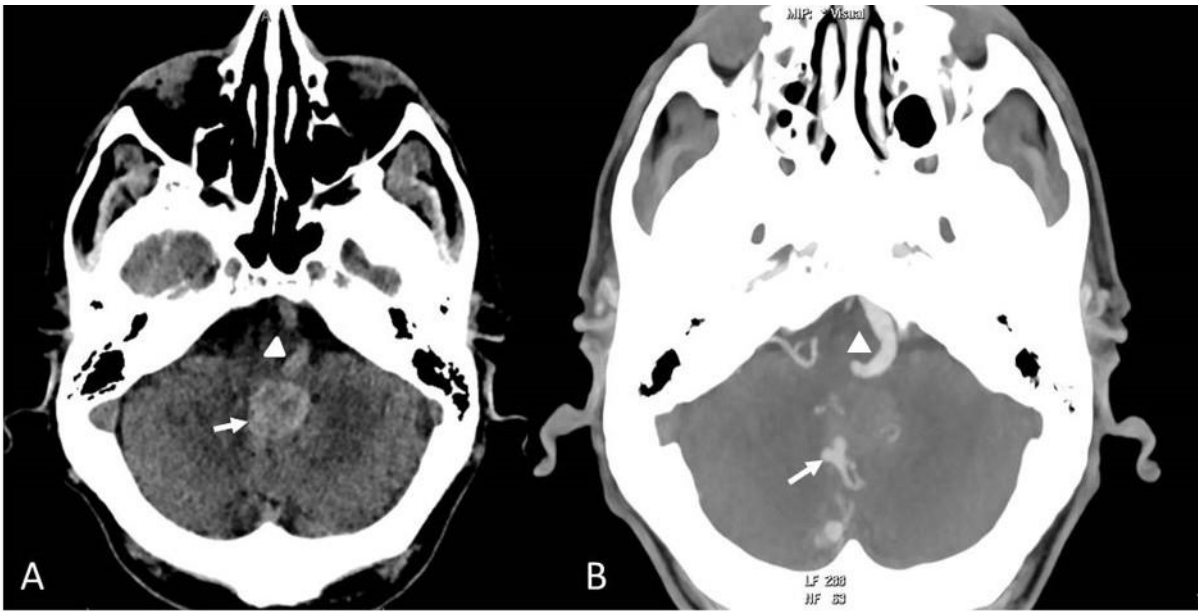


Figure 3 : Homme de 69 ans admis pour syndrome cérébelleux d'apparition brutale avec céphalées et vomissements.

A, Scanner cérébral sans injection, montrant un hématome vermien (flèche) exerçant un effet de masse sur le 4^{ème} ventricule et visualisation d'une artère vertébrale gauche spontanément hyperdense (tête de flèche)

B, Angioscanner des artères intracrâniennes montrant le nidus vermien (flèche) et une artère vertébrale gauche dilatée (tête de flèche)

IRM

Devant une hémorragie cérébrale, une IRM cérébrale est indiquée dans le cadre du diagnostic étiologique et notamment pour éliminer une MAV devant un hématome lobaire chez un sujet jeune sans facteur de risque cardio-vasculaire. En cas de MAV non rompue, l'IRM est un examen clé pour analyser l'angioarchitecture de la malformation, pour analyser le parenchyme cérébral adjacent et pour rechercher un saignement ancien pouvant passer inaperçu. Enfin, l'IRM est utilisée pour le suivi des MAV traitées par embolisation et/ou radiochirurgie afin d'éliminer une complication et évaluer l'efficacité du traitement.

Si l'IRM est réalisée trop précocement après la rupture d'une MAV, l'hématome peut parfois masquer le nidus malformatif. Il est donc important de répéter l'examen après résorption de l'hématome afin de détecter la malformation vasculaire.

Le diagnostic d'hématome en IRM

Le diagnostic d'hématome n'est pas toujours simple en IRM car son signal varie dans le temps en fonction des produits de dégradation de l'hémoglobine (**Figure 4**) (10,11). Il est donc utile de bien connaître l'évolution de son signal sur les séquences IRM classiques afin d'en préciser son ancienneté. En pratique courante, les séquences axiales T1, T2*, Flair et Diffusion sont réalisées.

10. Silvera S, Oppenheim C, Touzé E, Ducreux D, Page P, Domigo V, et al. Spontaneous intracerebral hematoma on diffusion-weighted images: influence of T2-shine-through and T2-blackout effects. *Am J Neuroradiol.* 2005;236-41.

11. Gomori JM, Grossman RI. Mechanisms responsible for the MR appearance and evolution of intracranial hemorrhage. *Radiographics* 1988; 8:427-440.

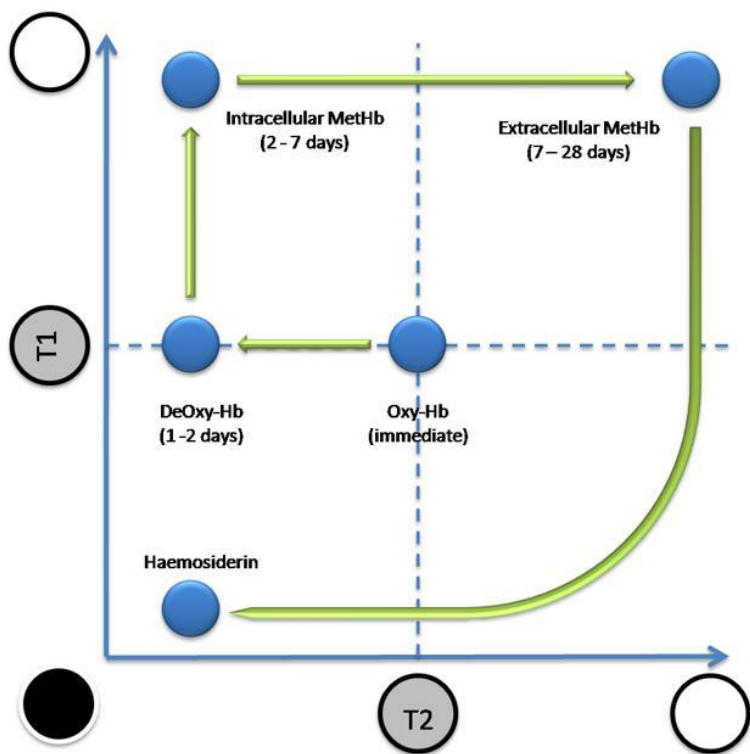


Figure 4 : Evolution du signal de l'hématome dans le temps en IRM, sur les séquences T1 et T2. (*Radiopaedia-F Gaillard*)

Séquences vasculaires avec injection de gadolinium

- ARM 3D

C'est une séquence 3D réalisée en écho de gradient avec des temps de répétition (TR) et des temps d'écho (TE) courts permettant de saturer les tissus stationnaires. L'injection de gadolinium entraîne un raccourcissement du temps de relaxation longitudinal (T1) intravasculaire, à l'origine d'un hypersignal. Le délai entre l'acquisition de la séquence et l'injection de gadolinium est important, afin d'obtenir un hypersignal artériel optimal sans être contaminé par le retour veineux. C'est pourquoi cette séquence doit être déclenchée au moment du pic de rehaussement intra-artériel grâce à des séquences dynamiques permettant de suivre la progression du bolus de gadolinium dans le système veineux puis artériel. Les techniques de lecture spiralée du plan de Fourier permettent d'autre part de lire les basses fréquences donc le contraste de l'image en début de séquence évitant ainsi une contamination veineuse (12). Cette séquence a l'avantage d'être peu artéfactée par les flux lents ou turbulents contrairement à la séquence 3D TOF. Elle permet une bonne visualisation des afférences artérielles, de la zone de shunt et du drainage veineux mais sa résolution spatiale est limitée et son temps d'acquisition (environ 40 secondes) est insuffisant pour évaluer l'hémodynamique de la MAV (13).

12. Zhang, Maki. 3D contrast-enhanced MR angiography. *J Magn Reson Imaging*. 2007 Jan;25(1):13-25.

13. Lee CC, Reardon MA, Ball BZ, Chen CJ, Yen CP1, Xu Z, et al. The predictive value of magnetic resonance imaging in evaluating intracranial arteriovenous malformation obliteration after stereotactic radiosurgery. *J Neurosurg*. 2015:136-44

- ARM 4D

Le principe de base de cette séquence est le même que pour l'ARM 3D mais son temps d'acquisition beaucoup plus court permet de répéter rapidement les acquisitions 3D avec une résolution temporelle de l'ordre de la seconde (14,15). Cette séquence réalisée sur une IRM 3T en utilisant un volume d'acquisition sur un héli-cerveau a montré son efficacité pour détecter une MAV devant la présence d'un retour veineux précoce. Elle permet d'autre part de mieux caractériser la malformation en séparant les artères afférentes du nidus et du drainage veineux grâce à sa résolution temporelle. La principale limite concerne sa faible sensibilité pour détecter les petites MAV en raison de sa faible résolution spatiale (16).

-
14. Frydrychowicz A, Francois CJ, Turski PA. Four-dimensional phase contrast magnetic resonance angiography: Potential clinical applications. *Eur J Radiol.* 2011;80(1):24–35.
 15. Hadizadeh DR, von Falkenhausen M, Gieseke J, Meyer B, Urbach H, Hoogeveen R, et al. Cerebral Arteriovenous Malformation: Spetzler-Martin Classification at Subsecond-Temporal-Resolution Four-dimensional MR Angiography Compared with That at DSA 1. *Radiology.* 2008;246(1):205–213.
 16. Soize S, Bouquigny F, Kadziolka K, Portefaix C, Pierot L. Value of 4D MR angiography at 3T compared with DSA for the follow-up of treated brain arteriovenous malformation. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2014:1903–9.

- 3D T1 EG après injection de gadolinium

Cette séquence est réalisée en pondération T1, en écho de gradient, après l'ARM. Elle permet une bonne analyse des flux vasculaires, notamment des flux lents, grâce à un bon remplissage de la lumière vasculaire par le gadolinium. Pour le diagnostic et le suivi d'un MAV elle permet la visualisation des vaisseaux anormaux mais il est souvent très difficile sur cette séquence d'isoler le nidus des compartiments artériels et veineux. D'autre part, des lésions radio-induites peuvent apparaître après traitement par radiochirurgie à l'origine d'un rehaussement de signal en regard du nidus lié à une rupture de la barrière hémato-encéphalique. Ces lésions radio-induites peuvent être à l'origine d'une erreur d'interprétation des images car elles sont parfois difficiles à différencier d'un reliquat angiomateux (17).

17. Ilyas A, Chen CJ, Ding D et al. Radiation-induced changes after stereotactic radiosurgery for brain arteriovenous malformations: a systematic review and meta-analysis. *Neurosurgery* . 2017:365-367

Séquences vasculaires sans injection de gadolinium

- 3D TOF

C'est une séquence en écho de gradient 3D utilisant des temps de répétition (TR) très courts, privilégiant le signal vasculaire par rapport aux tissus stationnaires environnants. L'utilisation de TR courts a pour effet de limiter la repousse longitudinale. Ainsi, les protons stationnaires et les flux lents (veines) situés dans le plan de coupe présentent un signal très faible, et sont dits saturés, alors que le sang artériel, à débit rapide, n'est pas saturé car les protons circulants sont renouvelés après chaque impulsion et apparaissent donc en hypersignal (effet d'entrée de coupe). La présence d'un shunt artério-veineux se caractérise par l'artérialisation des veines de drainage, donc la présence d'un hypersignal au sein du système veineux. Le nidus peut également être visualisé en hypersignal. La principale limite de cette séquence concerne la détection des petites MAV ou des MAV à faible débit en raison de la perte de signal des flux lents et/ou turbulents. D'autre part, le drainage veineux est souvent mal analysé par effet de saturation des flux lents (18).

18. Buis DR, Bot JCJ, Barkhof F, Knol DL, Lagerwaard FJ, Slotman BJ, et al. The Predictive Value of 3D Time-of-Flight MR Angiography in Assessment of Brain Arteriovenous Malformation Obliteration after Radiosurgery. *Am J Neuroradiol.* 2012;33:232-8

- Arterial Spin Labeling (ASL)

C'est une séquence d'IRM sans injection de produit de contraste utilisée initialement pour l'étude de la perfusion cérébrale (calcul du débit sanguin cérébral). Elle utilise un marqueur endogène : les protons artériels. Des séquences répétées sont réalisées à l'étage cervical sans et avec marquage des protons artériels par une onde de radiofréquence. Après un délai appelé « TI » (temps d'inversion) ou « PLD » (Post Label Delay), des acquisitions cérébrales sont réalisées au moment de l'arrivée des protons dans le compartiment capillaire. Après soustraction des images, le rephasage des spins marqués dans le lit capillaire est à l'origine d'un signal qui est proportionnel au débit sanguin cérébral (**Figure 5**). Le marquage cervical des protons artériels peut se faire de plusieurs façons, la technique la plus communément utilisée aujourd'hui est l'acquisition pseudo-continue permettant des impulsions brèves de radiofréquence sur une période donnée (19-21). Une séquence 2D Echo Planar (EPI) est classiquement utilisée mais celle-ci est sensible aux artéfacts de susceptibilité magnétique. Il est ainsi préférable d'utiliser des séquences 3D Echo de spin rapide afin de s'affranchir des artéfacts de susceptibilité magnétique et pour obtenir un meilleur rapport signal sur bruit (22).

-
19. Grade M, Hernandez Tamames JA, Pizzini FB, Achten E, Golay X, Smits M. A neuroradiologist's guide to arterial spin labeling MRI in clinical practice. *Neuroradiology*. 2015;57:1181–202.
 20. Haller S, Zaharchuk G, Thomas DL, Lovblad K-O, Barkhof F, Golay X. Arterial Spin Labeling Perfusion of the Brain: Emerging Clinical Applications. *Radiology*. 2016:337–56.
 21. Telischak NA, Detre JA, Zaharchuk G. Arterial spin labeling MRI: clinical applications in the brain. *J Magn Reson Imaging JMRI*. 2015:1165–80.
 22. Wolf RL, Detre JA. Clinical Neuroimaging Using Arterial Spin-Labeled Perfusion MRI. *Neurother J Am Soc Exp Neurother*. 2007:346–59.

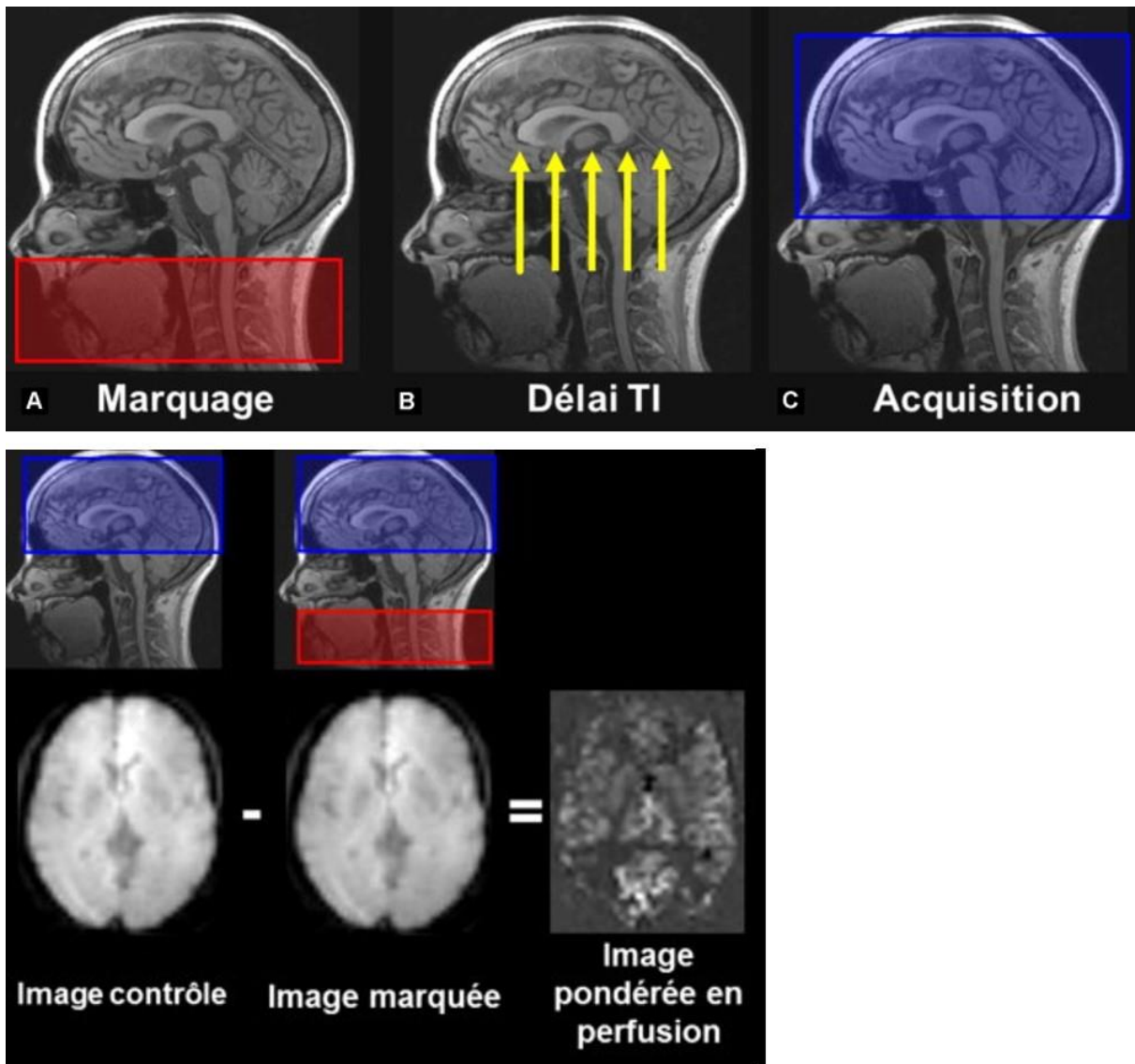


Figure 5 : Principes d'acquisition de l'ASL

(JC Ferré, Perfusion par arterial spin labeling (ASL) : technique et mise en œuvre clinique)

L'ASL est par ailleurs une technique intéressante pour la détection d'une MAV car la présence de shunts artério-veineux entraînent un défaut d'extraction des protons dans le lit capillaire normal et le passage de protons marqués dans le nidus et/ou les veines de drainage à l'origine d'un hypersignal intense. Plusieurs études ont ainsi montré l'intérêt de cette séquence pour le diagnostic de MAV et de fistule artério-veineuse durale intracrânienne (23-25) et plus récemment pour le diagnostic et le suivi des MAV après traitement (26-28).

La principale limite de cette séquence est son faible rapport signal sur bruit et son temps d'acquisition qui peut être long. Il est donc conseillé d'utiliser l'ASL sur une IRM 3 T avec une antenne 32 canaux afin d'augmenter le signal.

-
23. Wolf RL, Wang J, Detre JA, Zager EL, Hurst RW. Arteriovenous Shunt Visualization in Arteriovenous Malformations with Arterial Spin-Labeling MR Imaging. *Am J Neuroradiol.* 2008;681-7.
 24. Le TT, Fischbein NJ, André JB, Wijman C, Rosenberg J, Zaharchuk G. Identification of venous signal on arterial spin labeling improves diagnosis of dural arteriovenous fistulas and small arteriovenous malformations. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2012;61-8.
 25. Hodel J, Leclerc X, Kalsoum E, Zuber M, Tamazyan R, Benadjaoud MA, et al. Intracranial Arteriovenous Shunting: Detection with Arterial Spin-Labeling and Susceptibility-Weighted Imaging Combined. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2016 Oct 27;
 26. Shimizu K, Kosaka N, Yamamoto T, Shioura H, Kodera T, Kikuta K -i., et al. Arterial spin labeling perfusion-weighted MRI for long-term follow-up of a cerebral arteriovenous malformation after stereotactic radiosurgery. *Acta Radiol Short Rep* 2014 Jan 3;3(1).
 27. Heit JJ, Thakur NH, Iv M, Fischbein NJ, Wintermark M, Dodd RL, et al. Arterial-spin labeling MRI identifies residual cerebral arteriovenous malformation following stereotactic radiosurgery treatment. *J Neuroradiol.* 2019;30377-8
 28. Kodera T, Arai Y, Arishima H, Higashino Y, Isozaki M, Tsunetoshi K, et al. Evaluation of obliteration of arteriovenous malformations after stereotactic radiosurgery with arterial spin labeling MR imaging. *Br J Neurosurg.* 2017;641-7.

Le choix du TI (entre 1500 et 2000 ms) est une autre limite importante de la séquence car celui-ci doit être choisi en fonction des conditions hémodynamiques du patient (âge, antécédents cardio-vasculaires). Si le TI est trop court, les spins artériels marqués seront encore dans les artères au moment de l'acquisition avec un aspect de pseudo-hypoperfusion dans les régions postérieures et si le TI est trop long, le temps d'acquisition augmente, il y aura une perte de signal et la présence de protons marqués dans le système veineux. Des séquences multi-TI sont maintenant disponibles sur les machines les plus récentes permettant de sélectionner le TI le plus approprié après acquisition des images, sans augmentation significative du temps d'acquisition (29).

29. Johnston ME, Lu K, Maldjian JA, Jung Y. Multi-TI Arterial Spin Labeling MRI with Variable TR and Bolus Duration for Cerebral Blood Flow and Arterial Transit Time Mapping. *IEEE Trans Med Imaging*. 2015:1392–402.

- Susceptibilité magnétique (SWI, SWAN, SWIp)

C'est une séquence 3D T2 écho de gradient, exploitant les différences de susceptibilité magnétique entre les tissus. Les éléments paramagnétiques (la désoxyhémoglobine, méthémoglobine, hémosidérine, ferritine, chélates de gadolinium) et diamagnétiques (oxyhémoglobine, calcifications) sont responsables de phénomènes de susceptibilité magnétique. Cette technique d'imagerie est basée sur la différence de susceptibilité magnétique entre le sang artériel riche en oxyhémoglobine et le sang veineux riche en désoxyhémoglobine. Elle est considérée comme une imagerie veinographique utilisant la désoxyhémoglobine comme produit de contraste endogène, à l'origine d'un hyposignal intense dans les veines par effet BOLD (Blood Oxygen Level Dependant).

Elle se caractérise également par une approche multi-échos, avec des échos courts générant un effet « TOF » permettant de visualiser les artères en hypersignal et des échos longs favorisant le phénomène de susceptibilité magnétique permettant de mieux visualiser les veines en hyposignal (30).

Cette séquence a déjà montré sa plus grande sensibilité à détecter les lésions hémorragiques intracrâniennes comparée au T2* (31).

Concernant les MAV, la présence d'un shunt artério-veineux sur cette séquence est caractérisée sur les images reconstruites en MIP par la présence d'hypersignaux dans le segment veineux de la malformation vasculaire en raison de la présence de sang riche en oxyhémoglobine et l'augmentation du débit sanguin au sein d'une veine (32).

30. Haacke EM, Mittal S, Wu Z, Neelavalli J, Cheng Y-CN. Susceptibility-Weighted Imaging: Technical Aspects and Clinical Applications, Part 1. *Am J Neuroradiol.* 2009;19–30.

31. Cheng A-L, Batool S, McCreary CR, Lauzon ML, Frayne R, Goyal M, et al. Susceptibility-weighted imaging is more reliable than T2*-weighted gradient-recalled echo MRI for detecting microbleeds. *Stroke.* 2013;2782–6.

32. Jagadeesan BD, Delgado Almandoz JE, Moran CJ, Benzinger TLS. Accuracy of susceptibility-weighted imaging for the detection of arteriovenous shunting in vascular malformations of the brain. *Stroke.* 2011;87–92.

- Résumé des différentes séquences utilisées pour le suivi des MAV

Au CHRU de Lille, le protocole IRM réalisé pour le suivi des MAV comporte donc des séquences anatomiques : axiales T1, FLAIR, SWI, Diffusion et des séquences vasculaires 3D TOF, ASL, ARM 4 D et 3 D T1 EG après injection de gadolinium. La **figure 6** montre un exemple typique de petite MAV en IRM, confirmée par l'artériographie. Le **tableau 1** montre les avantages et les inconvénients des différentes séquences vasculaires.

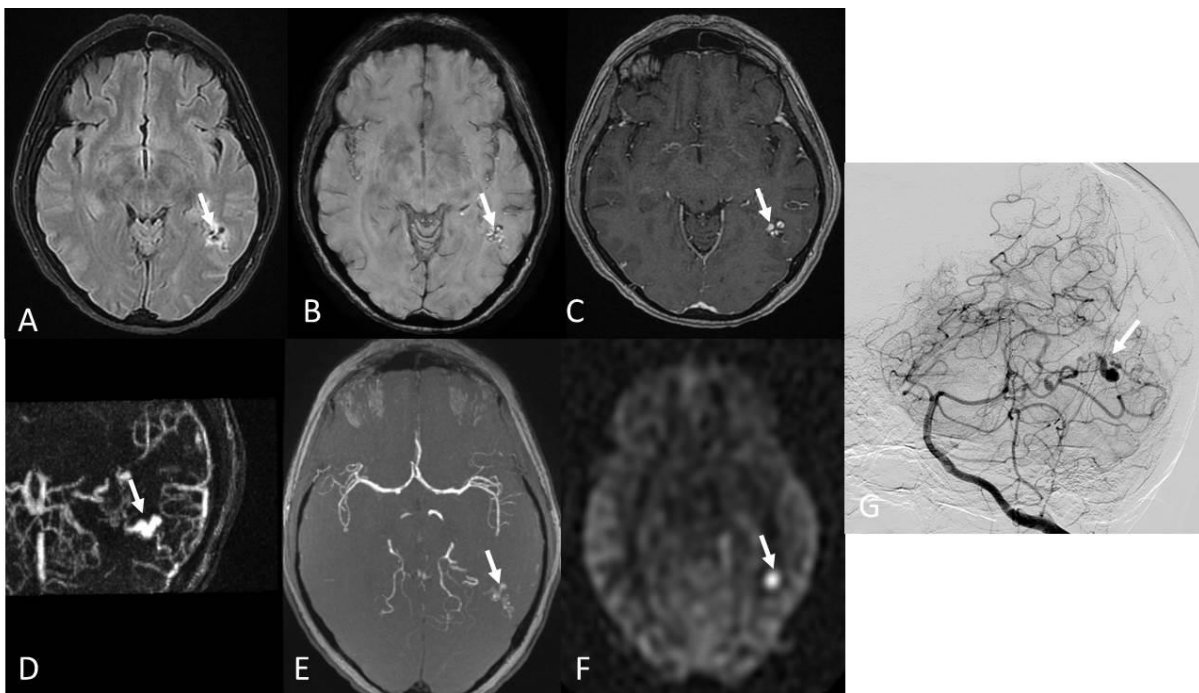


Figure 6 : Patiente de 54 ans suivie pour une MAV pariétale gauche de révélation hémorragique. A, la séquence axiale FLAIR montre un hypersignal pariétal gauche centré par des structures tubulées en hyposignal (flèche). B, la séquence SWI montre un hypersignal au sein du nidus (flèche). C, la séquences 3D T1 EG après injection montre une prise de contraste tubulée correspondant au nidus (flèche). D, La séquence d'ARM 3D montre le rehaussement des vaisseaux anormaux du nidus (flèche). E, la séquence 3DTOF reconstruite en MIP fin montre la présence de vaisseaux anormaux en hypersignal pariétal gauche. F, la séquence ASL montre un hypersignal pariétal gauche. G, l'artériographie confirme la présence d'une petite MAV cérébrale postérieure gauche avec drainage veineux profond.

Séquence	Avantages	Limites
ARM 3D	Non artéfactée par les flux lents ou turbulents Large volume d'acquisition	Retour veineux Pas d'étude de l'hémodynamique
ARM 4D	Etude de l'hémodynamique	Faible résolution spatiale Faible volume d'acquisition
3D T1 EG	Bonne résolution spatiale	Retour veineux Rehaussement parenchymateux
3D TOF	Haute résolution spatiale	Artéfactée par flux lent et turbulents Durée
ASL	Très sensible	Faible rapport signal sur bruit Durée

Tableau 1 : Comparaison des avantages et limites des différentes séquences explorant les vaisseaux intracrâniens.

Angiographie cérébrale

L'angiographie conventionnelle reste l'examen de référence pour le diagnostic et le suivi des MAV grâce à sa très haute résolution spatiale et temporelle (33). C'est la technique qui permet au mieux d'analyser l'angioarchitecture de la MAV, de préciser le nombre de vaisseaux afférents et le drainage veineux. Cependant, il s'agit d'une technique invasive nécessitant l'injection de doses parfois importantes de produit de contraste iodé et un cathétérisme artériel qui peut être à l'origine d'une complication neurologique par migration thrombo-embolique même si cet accident est devenu rare aujourd'hui (34).

-
33. Chowdhury AH, Ghose SK, Mohammad QD, Habib M, Khan SU, Rahman KM. Digital Subtraction Angiography is Superior to Magnetic Resonance Angiography in Diagnosis of Cerebral Arteriovenous Malformation. *Mymensingh Med J MMJ*. 2015;356–65.
 34. Willinsky RA, Taylor SM, terBrugge K, Farb RI, Tomlinson G, Montanera W. Neurologic Complications of Cerebral Angiography: Prospective Analysis of 2,899 Procedures and Review of the Literature. *Radiology*. 2003;522–8.

TRAITEMENT

Indications

Il n'existe pas de prise en charge standardisée d'une MAV. Le traitement se décide au cas par cas de façon pluridisciplinaire en fonction du caractère hémorragique ou non de la MAV, de l'âge et des antécédents du patient, du siège et de l'étendue du nidus et de la présence d'anévrismes associés. L'objectif étant d'évaluer la balance entre le bénéfice et le risque du traitement par rapport à l'histoire naturelle de la maladie. En raison du risque élevé de resaignement, les MAV rompues nécessitent dans la plupart des cas un traitement de la malformation alors qu'un traitement conservateur est aujourd'hui indiqué dans les MAV non rompues. En effet, l'étude ARUBA publiée dans la revue « Lancet » en 2014 (35) a montré que le risque de morbi-mortalité était significativement plus élevé en cas de traitement interventionnel d'une MAV non rompue par rapport au suivi médical simple.

35. Mohr JP, Parides MK, Stapf C, Moquete E, Moy CS, Overbey JR, et al. Medical management with or without interventional therapy for unruptured brain arteriovenous malformations (ARUBA): a multicentre, non-blinded, randomised trial. Lancet. 2014;614–21

Techniques

La chirurgie

La classification de Spetzler-Martin est la classification la plus souvent utilisée pour orienter la décision du traitement chirurgical (36). Trois critères sont pris en compte : la taille, la localisation et le système de drainage.

	Paramètres	Points
Taille du nidus	Inférieure à 3 cm	1
	Entre 3 et 6 cm	2
	Supérieure à 6 cm	3
Localisation	Zone non éloquente	0
	Zone éloquente	1
Drainage veineux	Superficiel	0
	Profond	1

Tableau 2 : Classification de Spetzler-Martin : La somme des points donne le grade (1 à 5). Les grades sont regroupés en groupes : Groupe A (grade 1 et 2) ; Groupe B (grade 3) ; Groupe C (grade 4 et 5).

Zones éloquentes : cortex sensitivo-moteur, aire du langage, cortex visuel, thalamus, hypothalamus, capsule interne, tronc cérébral, pédoncules cérébelleux, noyaux cérébelleux.

36. Spetzler RF, Martin NA. A proposed grading system for arteriovenous malformations. J Neurosurg 1986;65:476-83.

La chirurgie ne doit être envisagée que si l'exérèse complète est possible, elle est envisageable pour les MAV de petite taille, dans une zone non éloquent (Grades 1 et 2 de la classification de Spetzler-Martin). Plus le grade de la MAV est élevé, plus le risque de complication est important. Lorsqu'une MAV est rompue, une chirurgie en urgence est le traitement le plus souvent réalisé et le taux de complication est également plus élevé. Le taux de morbidité global est estimé à 7 %, pour le traitement des MAV de bas grade. Le taux d'exclusion complète de la MAV après chirurgie est de 96 % (37-39).

-
37. Van Beijnum J, van der Worp HB, Buis DR, Al-Shahi Salman R, Kappelle LJ, Rinkel GJE, et al. Treatment of brain arteriovenous malformations: a systematic review and meta-analysis. *JAMA*. 2011;2011-9.
 38. Davidson AS, Morgan MK. How safe is arteriovenous malformation surgery? A prospective, observational study of surgery as first-line treatment for brain arteriovenous malformations. *Neurosurgery*. 2010;498-504; 30.
 39. Hartmann A, Stapf C, Hofmeister C, Mohr JP, Sciacca RR, Stein BM, et al. Determinants of neurological outcome after surgery for brain arteriovenous malformation. *Stroke*. 2000;2361-4.

La radiochirurgie stéréotaxique (Gamma-Knife)

Elle consiste en une irradiation de la MAV en condition stéréotaxique réalisée par la convergence de plusieurs faisceaux de rayonnement Gamma par désintégration d'une source radioactive (Cobalt 60). Un repérage multimodal par Scanner, IRM et artériographie est réalisé avec la pose d'un cadre stéréotaxique. La cible est localisée de manière très précise sur les données de l'imagerie cérébrale. La convergence des multiples faisceaux sur le volume lésionnel prédéfini permet ensuite une irradiation focale en limitant la toxicité du rayonnement sur les tissus sains adjacents. Son mécanisme d'action provoque une vascularite radio-induite des vaisseaux pathologiques ciblés, avec pour objectif à terme une oblitération progressive de la lumière vasculaire (40-41).

Elle est envisageable pour les lésions de localisation inaccessible à la chirurgie, dans l'idéal de petite taille afin d'avoir une oblitération complète. Elle est aussi indiquée en complément d'un autre traitement, chirurgical ou embolisation.

La principale limite de la radiochirurgie concerne l'effet retardé dans le temps qui peut être estimé entre 2 à 4 ans après le traitement. Le taux de morbidité est estimé à environ 5 %. Le taux de réussite après radiochirurgie dépend du volume de la MAV, estimé à 70-75 % dans les petites MAV (37). D'autres séances peuvent parfois être nécessaires notamment pour les MAV plus volumineuses, mais celles-ci sont limitées par la dose de rayonnement reçu par le patient (42).

40. Friedman WA, Bova FJ. Radiosurgery for arteriovenous malformations. *Neurol. Res.* 2011 Oct;33(8):803–19.

41. Vlaskou Badra E, Ermiş E, Mordasini P, Herrmann E. Radiosurgery and radiotherapy for arteriovenous malformations: outcome predictors and review of the literature. *J Neurosurg Sci.* 2018:490–504.

42. Kano H, Kondziolka D, Flickinger JC, Park K-J, Parry PV, Yang H, et al. Multistaged volumetric management of large arteriovenous malformations. *Prog Neurol Surg.* 2013;27:73–80.

L'embolisation

Le traitement endovasculaire par embolisation peut être utilisé dans différentes situations, le plus souvent en préparation d'une chirurgie ou d'une radiochirurgie mais assez rarement comme traitement curatif seul. Il permet de diminuer le débit et la taille de la MAV afin de la rendre accessible au traitement radiochirurgical. L'embolisation est également utile pour le traitement ciblé des anévrysmes artériels associés et des anévrysmes intranidaux qui sont parfois à l'origine d'un saignement. Le principal agent utilisé est la colle biologique (Onyx®) pour traiter le nidus et les coils pour traiter les anévrysmes associés (43,44).

Le taux de morbidité est estimé à environ 6 %. Le taux d'exclusion complète de la MAV est très variable en fonction de la taille et de la localisation de la MAV. Plusieurs séances sont souvent nécessaires (37).

43. Diaz O, Scranton R. Endovascular treatment of arteriovenous malformations. *Handb Clin Neurol.* 2016;136:1311–7.

44. Strozyk D, Nogueira RG, Lavine SD. Endovascular treatment of intracranial arteriovenous malformation. *Neurosurg Clin N Am.* 2009 Oct;20(4):399–418.

OBJECTIF DE L'ETUDE

Nous nous sommes intéressés au suivi des patients traités par radiochirurgie pour une MAV cérébrale. L'artériographie cérébrale est l'examen de référence pour juger l'efficacité du traitement en raison de sa très bonne résolution spatiale et temporelle, mais c'est une technique invasive (33,34). L'IRM cérébrale injectée avec des séquences d'ARM 4D et 3DT1EG est couramment utilisée en routine clinique pour évaluer l'occlusion progressive du nidus mais la sensibilité et la spécificité des séquences injectées pour détecter un nidus résiduel de petite taille en fin traitement ne sont pas très élevées en raison d'une résolution spatiale insuffisante (14-16). Il est d'autre part nécessaire de répéter l'injection de produit de contraste gadolinés à chaque examen pouvant être à l'origine d'une accumulation des produits gadolinés au sein des noyaux gris centraux (45,46). Les séquences ASL et 3DTOF ne nécessitant pas d'injection de gadolinium ont montrées leur sensibilité pour détecter un nidus résiduel (26-28) mais aucune étude n'a encore comparé les séquences injectées avec les séquences non injectées pour la détection d'un nidus résiduel en fin de traitement.

L'objectif était de comparer les séquences IRM non injectées ASL et 3D TOF aux séquences IRM injectées ARM 4D et 3D T1 EG pour la détection des reliquats de petites MAV cérébrales après traitement par radiochirurgie.

45. Choi JW, Moon W-J. Gadolinium Deposition in the Brain: Current Updates. Korean J Radiol. 2019:134–47.

46. Adin ME, Kleinberg L, Vaidya D, Zan E, Mirbagheri S, Yousem DM. Hyperintense Dentate Nuclei on T1-Weighted MRI: Relation to Repeat Gadolinium Administration. AJNR Am J Neuroradiol. 2015:1859–65.

ARTICLE

**FOLLOW-UP MRI FOR SMALL BRAIN ARTERIO-VEINUS MALFORMATIONS
TREATED BY RADIOSURGERY: IS GADOLINIUM STILL NECESSARY?**

ABSTRACT

Background and purpose

Follow-up MRI of brain arterio-venous malformation (AVM) is mainly based on contrast-enhanced MRI. However arterial spin labeling (ASL) and time of flight (TOF) MRI can be valuable to detect residual nidus after radiosurgical treatment. The aim of this study was to compare non-contrast MRI including ASL and TOF with contrast-enhanced MRI in radiosurgically treated patients for a brain AVM.

Materials and methods

Twenty-eight patients with a small brain AVM (< 20 mm) underwent digital subtraction angiography (DSA) and MRI after radiosurgery. Three readers blindly and independently reviewed: (i) contrast-enhanced images alone (4D contrast-MRA and post-contrast 3D T1 GRE), (ii) ASL and TOF images alone and (iii) all MR sequences together. The primary endpoint was to compare performances for the detection of residual AVM according a 5-point scale. DSA was used as the reference.

Results

The highest interobserver agreement was observed for ASL/TOF ($k = 0.88$; 95% confidence interval [CI]: 0.72, 1). Regarding AVM detection, ASL/TOF had a higher sensitivity (Se = 85%, Sp = 100%; 95% CI: 62-97) than contrast-enhanced MRI (Se = 55%, Sp = 100%; 95% CI 27-73) and all MR sequences together (Se = 75%, Sp = 100%; 95% CI: 51-91) ($p = 0.008$). All nidus obliterations on DSA were detected on MRI. In 6 patients, a residual AVM on DSA was only detected on ASL/TOF including 3 only on ASL.

Conclusion

In this study, ASL/TOF was more relevant than gadolinium-enhanced MRI to demonstrate residual AVM in the follow-up of radiosurgically treated patients for a small brain AVM.

INTRODUCTION

Cerebral arteriovenous malformations (AVMs) are characterized by abnormal communications between arterial and venous circulation without normal capillary bed in between resulting in multiple feeding arteries, abnormal capillary network (nidus) and enlarged draining veins. The main risk of brain AVM is rupture which occurs in 2 to 4% per year and may lead to disability or even death (1-3). The treatment of AVMs depends on clinical presentation (previous rupture), size and location of the nidus (4). It may combine different modalities including surgery, embolization, and/or radiosurgery. Radiosurgery allows progressive vascular obliteration spreading over 5 years by radiation induced vasculitis and is most often used for small AVMs located in eloquent regions and/or deep structures (5,6).

In patient follow-up after treatment, digital subtracted angiography (DSA) is the technique of reference to evaluate the treatment efficacy due to its high spatial resolution and the capacity to discriminate the arterial- and the venous phases from serial angiograms (7). However, DSA remains invasive and may potentially lead to neurological complications (8). Brain MRI is a non-invasive approach which is increasingly used to evaluate treatment effectiveness after radiosurgery. Time-resolved (4D) contrast-MRA and post-contrast 3D T1 gradient-recalled echo (GRE) sequences are routinely used to assess the progressive obliteration of the nidus after radiosurgery. However, sensitivity and specificity of contrast-enhanced MR sequences to detect a small nidus remain low due to the limited spatial resolution inherent to the technique (9,10). Furthermore, serial injections of gadolinium-based contrast agent are needed which recently became controversial because of its deposition in the deep grey nuclei (11,12).

Studies showed the usefulness of 3D time of flight (3D TOF) and arterial spin labeling (ASL) for the detection of brain AVM. 3D TOF is sensitive to detect AVMs because the accelerated blood flow in the nidus is responsible for a hypersignal by in-flow effect. However, detection of small AVM can be challenging (13). ASL measures the cerebral blood flow. It is based on proton

labeling of the arterial flow at the neck level. After a post-labeled delay (PLD), usually between 1500 and 2000 ms, brain images are acquired when the magnetically labeled protons flow into the capillary bed (14,15). These labeled protons do not reach the venous structures which appear hypointense due to the T1 decay during the capillary transit. However, in case of brain AVM, the labeled protons from the arterial blood flow directly flow into the draining veins, resulting in a venous hypersignal (16). We hypothesized that TOF/ASL is as sensitive as contrast-enhanced MR sequences to detect nidus obliteration or residual AVM in patients treated by radiosurgery.

In this study, we compared non-contrast MRI including ASL and 3D TOF to contrast MRI including 4D contrast-MRA and post-contrast 3D T1 GRE to detect nidus obliteration or residual AVM in the follow-up of patients treated by Gamma Knife radiosurgery for a small brain AVM.

MATERIALS ET METHODS

Patient population

This study was approved by our institutional review board. In this retrospective study, the inclusion criteria were as follows:

1. Patients explored on a 3T MR scanner
2. Nidus size (maximum diameter) \leq 20 mm after radiosurgery
3. Last treatment procedure by radiosurgery alone or by embolization and radiosurgery at least 2 years before DSA
4. Time interval between DSA and MRI \leq 2 months
5. No treatment of the AVM between DSA and MRI

From February 2017 to March 2019, 47 consecutive patients underwent DSA and MRI at 3T including TOF and ASL in the follow-up of treatment by Gamma knife radiosurgery for a small brain AVM. Of these 47 patients, 19 have been excluded from the present study for the following reasons: large brain AVM ($>$ 20 mm): 9 patients, early DSA control after radiosurgery (6 months): 6 patients, too long a delay between DSA and MRI: 4 patients.

The present study consisted of 28 consecutive patients (10 females and 18 males; mean age, 41 years; range, 17-65 years). In this patient group, brain AVM was revealed by intracranial hemorrhage in 20 patients, seizure in 5 patients and fortuitously in 3 patients. Patients were treated by radiosurgery alone in 13 cases and by embolization before radiosurgery in 15 cases. All these patients had DSA after brain MRI to confirm AVM obliteration or to evaluate the size of the residual nidus. The mean time interval between radiosurgery and MRI was 4.2 years (range: 2-10 years) and the mean time interval between MRI and DSA was 10 days (range: 1-45 days).

Imaging methods

DSA was performed on a flat panel biplane system (Allura Clarity, Philips Healthcare, Best, the Netherlands) with selective angiograms of bilateral common carotid and vertebral arteries with at least 2 perpendicular views (frontal and sagittal) and 3D rotational angiography acquired at 3 frames per second with a 1024 x 1024 matrix size and a 20-cm field of view (FOV). When the presence of a residual nidus remained uncertain on angiograms, a supra selective catheterization of the feeding arteries was performed with focused intracranial views.

All patients underwent MR examinations on a 3T MR scanner (Achieva, Philips Healthcare, Best, the Netherlands) with a 32-channel head coil. The imaging protocol included the following sequences: axial diffusion-weighted imaging (DWI) ($b1000s/mm^2$, TR/TE 2827/67 ms, scan duration 1:30), axial fluid-attenuated inversion recovery (FLAIR) (TR/TE/TI 11000/125/2800, scan duration 2:56), axial T2* (TR/TE 890/16 ms, scan duration 2:26), axial spin-echo (SE) T1 weighted (TR/TE 531/10 ms, scan duration 1:40), 3D TOF (TR/TE 25/3.5 ms, FOV 19 cm, matrix 472x270, slice thickness 1.2 mm, scan duration 5:39), 2D pseudocontinuous ASL (TR/TE 4297/14 ms, FOV 24 cm, labeling duration 1650 and PLD 2000 ms, slice thickness 5 mm, scan duration 4:55), 4D contrast MR angiography (MRA) (TR/TE 3/1.1 ms, FOV 24 cm, matrix 240x240, scan duration 1:04) covered half-brain based on the side of the AVM, and post-contrast 3D T1 gradient-echo (GRE) (TR/TE 7.7/3.7 ms, FOV 24 cm, matrix 240x240, scan duration 3:43). Intravenous gadoterate meglumine (Dotarem) was administered at a concentration of 0.1 mmol/kg at a flow rate of 1.5 mL/s.

Imaging analysis

DSA examinations were interpreted by 2 interventional neuroradiologists together (NB, XL) with more than 8 years of experience. The presence of a residual nidus or an early venous drainage was recorded. Regarding the nidus, maximum diameter, location and drainage type were recorded. Detection of a draining vein at the arterial phase of angiograms without measurable nidus was considered as a sign of a residual arterio-venous shunting (AVS).

MR images were anonymized and randomly interspersed. One senior diagnostic neuroradiologist with 10 years of experience (GK), one senior interventional neuroradiologist (FB) with 6 years of experience and one junior neuroradiologist (OO) with 3 years of experience, independently reviewed the MR examinations in a random order, blinded to the clinical data and MRI/DSA findings. Image interpretation was performed in three different sittings at one month apart. For each sitting, the presence of hemorrhage, edema, abnormal vessels, and embolization material were evaluated on FLAIR, T2* and/or SWI.

During the first sitting, only contrast enhanced MR images (4D contrast MRA and post-contrast 3D T1 GRE) were added to FLAIR and T2*/SWI. The presence of a nidus, abnormal serpiginous vessels, early venous drainage and radiation induced contrast enhancement were recorded. For the second sitting, only non-contrast enhanced MR images (3D TOF, ASL FLAIR and T2*/SWI) were assessed. The presence of hypersignal at the site of the nidus and/or in the venous structures was noted. Finally, in the third sitting, all MR sequences were available for image interpretation.

After each sitting, the reader stated the overall likelihood of residual AVM without distinction between nidus and AVS according to a 5-point scale: 1) very unlikely, 2) unlikely, 3) uncertain, 4) likely and 5) very likely (17). Cases leading to disagreement between readers were reviewed by the three readers together to reach consensus. For the statistical analysis the 5-point scale was combined in a 3-point scale with negative (1 and 2), uncertain (3) and positive (4 and 5).

Statistical analysis

Data were analyzed using SAS software package, release 9.4 (SAS Institute, Cary, NC, USA). Results were presented as number and percentages for categorical variables. Sensitivity, specificity, and predictive values were calculated for the three readers, the consensus and the three sittings using DSA as gold standard. The comparisons of sensitivities and specificities of consensus data were compared with the Mc Nemar test. Interobserver agreement for diagnosis of each sequence was assessed using weighted kappa coefficient or Cohen's kappa coefficient (18). These were interpreted as follows (19): poor agreement for values <0.45 , fair to good agreement for values between 0.45 and 0.75, and excellent agreement for values >0.75 . The Kappa coefficients with its 95% confidence intervals were calculated too. Statistical testing was conducted as the two-tailed α –level of 0.05.

RESULTS

DSA findings

Patient characteristics and imaging findings after radiosurgery are presented in **Table 1**. Of the 28 brain AVMs radiosurgically treated, 8 were occluded on follow-up catheter angiograms, 12 had a residual nidus (mean size, 12.5 mm; range, 5-20) and 8 had a residual AVS (non-measurable nidus). Venous drainage was superficial in 13 patients (47%), deep in 11 patients (39 %) and mixed in 4 patients (14%).

Table 1: Patient characteristics and imaging findings after radiosurgery

Patients				DSA			MRI	
Nb	Age	Sex	Presentation	Location	Drainage	Findings	Contrast MRI	ASL/TOF
1	65	M	Hemorrhage	L Temporal	Superficial	AVS	O	RAVM
2	23	F	Hemorrhage	L Thalamus	Deep	AVS	O	RAVM
3	17	M	Hemorrhage	L Frontal	Mixed	Nidus 13 mm	RAVM	RAVM
4	36	M	Hemorrhage	R Frontal	Superficial	AVS	O	O
5	64	M	Hemorrhage	L Cerebellar	Deep	O	O	O
6	47	M	Hemorrhage	R Frontal	Superficial	AVS	O	RAVM
7	45	F	Hemorrhage	L Parietal	Mixed	Nidus 9 mm	RAVM	RAVM
8	35	M	Hemorrhage	R Frontal	Deep	Nidus 14 mm	RAVM	RAVM
9	22	F	Fortuitous	L Temporal	Superficial	AVS	O	O
10	47	M	Hemorrhage	R Occipital	Deep	O	O	O
11	27	M	Hemorrhage	L Occipital	Superficial	AVS	O	RAVM
12	41	M	Seizure	L Frontal	Deep	O	O	O
13	52	F	Hemorrhage	L Temporal	Deep	Nidus 10 mm	RAVM	RAVM
14	37	F	Fortuitous	L Frontal	Superficial	O	O	O
15	65	F	Hemorrhage	L Temporal	Superficial	AVS	O	O
16	30	F	Hemorrhage	R Parietal	Superficial	Nidus 18 mm	RAVM	RAVM
17	40	M	Seizure	R Frontal	Superficial	Nidus 20 mm	RAVM	RAVM
18	31	M	Seizure	L Parietal	Superficial	Nidus 17 mm	RAVM	RAVM
19	33	F	Hemorrhage	L Parietal	Deep	Nidus 12 mm	RAVM	RAVM
20	26	F	Hemorrhage	L Temporal	Deep	Nidus 8 mm	RAVM	RAVM
21	60	H	Hemorrhage	L Parietal	Mixed	Nidus 5 mm	O	RAVM
22	37	M	Hemorrhage	R Parietal	Superficial	O	O	O
23	42	F	Hemorrhage	R Parietal	Deep	O	O	O
24	50	H	Fortuitous	R Frontal	Superficial	O	O	O
25	23	H	Seizure	L Temporal	Superficial	Nidus 11 mm	RAVM	RAVM
26	56	H	Hemorrhage	R Frontal	Deep	O	O	O
27	53	H	Hemorrhage	R Cerebellar	Mixed	AVS	O	RAVM
28	54	H	Seizure	D Frontal	Mixed	Nidus 15 mm	RAVM	RAVM

Note.— DSA = Digital Subtraction Angiography, AVM = arterio-venous malformation, AVS = arterio-venous shunting, O = obliteration, RAVM = residual AVM

Interobserver agreement

Interobserver agreements (κ value, 95 % CI) are described in **Table 2**. Agreement was highest in the second sitting (ASL-TOF) with $\kappa = 0.88$ (95% CI 0.72-1) for reader 1 and 2. There were 3 disagreements with ASL: in 2 cases, there were a hypersignal at the site of the nidus judged as too faint to be related to a residual AVM by the reader 2 in one case and by readers 1 and 3 in another case. The third disagreement concerned a faint hypersignal judged as a residual AVM by the readers 2 and 3 but judged as artifactual by the reader 1. In one case, there was a contrast-enhancement on 3D T1 GRE at the site of the nidus judged as a residual AVM by the readers 2 and 3 and as a radiation-induced contrast enhancement by the reader 1.

Table 2: Agreement between the 3 readers: kappa (95% CI).

READERS	First sitting	Second sitting	Third sitting
1 and 2	0.72 (0.54-0.9)	0.88 (0.72-1)	0.72 (0.53-0.9)
1 and 3	0.67 (0.46-0.88)	0.81 (0.6-1)	0.61 (0.37-0.84)
2 and 3	0.64 (0.42-0.85)	0.84 (0.67-1)	0.80 (0.65-0.96)

Comparison between “all MR sequences” and DSA

Sensitivity, specificity, positive predictive value, and negative predictive value of MRI including all sequences for the detection of residual AVM were 75% (95% CI 51-91), 100% (95% CI 63-100), 100% (95% CI 78-100) and 61.5% (95% CI 32-86) respectively. Individual results are presented in **Table 3**. In 2 patients, the 3 readers stated AVM obliteration on MRI whereas a residual AVS was angiographically proven. Of the 6 patients with MR images interpreted as “uncertain”, DSA revealed residual AVS in 3 patients and nidus obliteration in 3 patients. **Figure 1** shows a typical residual AVM demonstrated on both contrast-enhanced MR sequences and ASL/TOF.

Table 3: Sensitivity, Specificity, Positive Predictive Value (PPV) and Negative Predictive Value (NPV) of the third sitting (all sequences available).

READERS	Sensitivity (95% CI)	Specificity (95% CI)	PPV (95% CI)	NPV (95% CI)
1	70% (46-88)	100% (63-100)	100% (77-100)	57.1% (29-82)
2	75% (51-91)	93.7% (47-100)	87.5% (70-100)	58.3% (28-84)
3	75% (51-91)	93.7% (47-100)	87.5% (70-100)	58.3% (28-84)

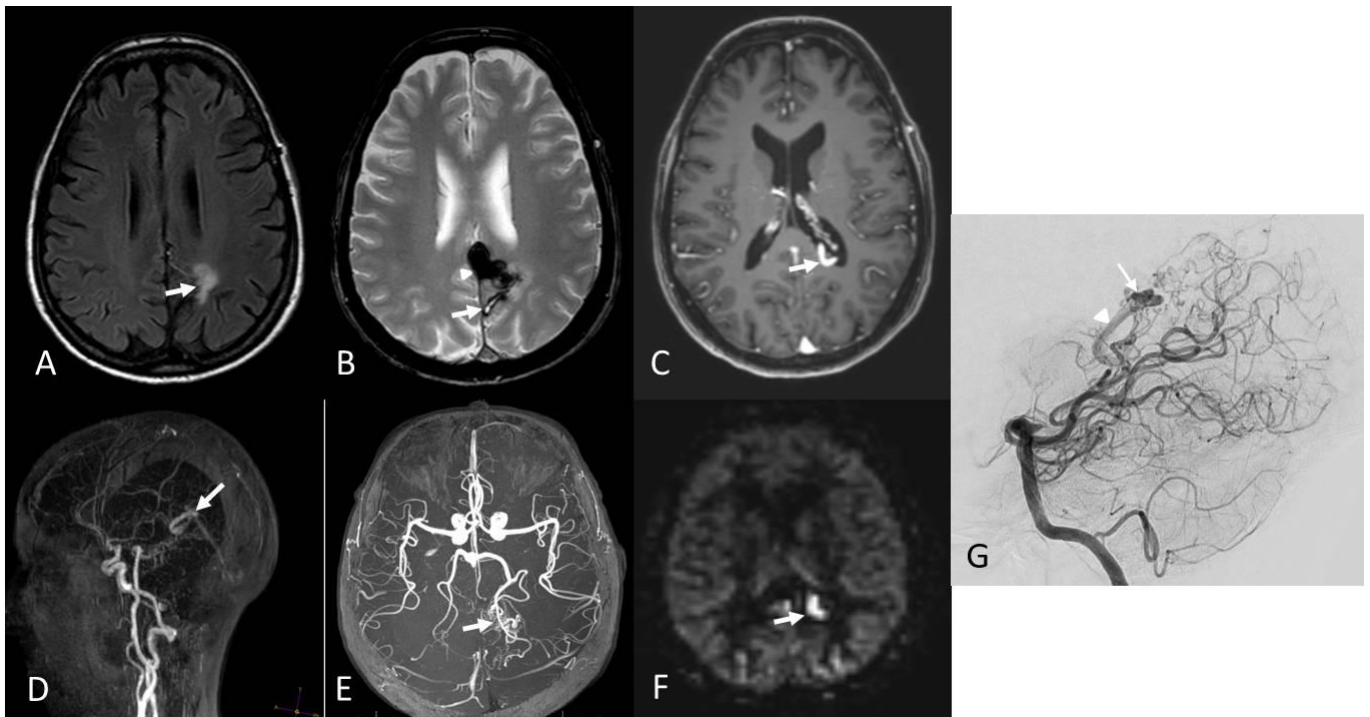


Figure 1 (patient 19): Follow-up MRI 2 years after embolization and radiosurgery for a ruptured left parietal AVM. A. Axial FLAIR shows hyperintense signal in the left parietal region (arrow) due to radio-induced lesions. B. Axial T2* shows mixed signal intensity related to hemorrhagic sequelae (arrow) posterior to hypointense embolization material (arrowhead). C. Post-contrast 3D T1 GRE image shows the enhanced tubular draining vein of the residual AVM. D. Sagittal view from 4D contrast-MRA with MIP reconstruction shows the early enhanced draining vein at the arterial phase of angiogram (arrow). E. 3DTOF with MIP reconstructions shows the residual AVM (arrow). F. ASL image shows a focal hyperintense signal in left lateral part of the cingular gyrus (arrow). G. DSA with lateral intracranial view from vertebral angiogram confirms the residual nidus (arrow) with the deep venous drainage (arrowhead).

Contrast-enhanced MR sequences for the detection of residual AVM

Sensitivity, specificity, positive predictive value, and negative predictive value of contrast MRI for the detection of residual AVM were 55% (95% CI 27-73), 100% (95% CI 63-100), 100% (95% CI 69-100) and 47% (95% CI 21-69) respectively. Individual results are described in **Table 4**. There were 9 false-negatives due to a residual nidus or AVS on catheter angiograms judged as AVM obliteration on contrast-enhanced MR images. A contrast enhancement was seen at the site of the radiosurgically treated AVM in 5 patients related to radio-induced lesions (**figure 2**).

Table 4: Sensitivity, Specificity, Positive Predictive Value and Negative Predictive Value of first sitting (FLAIR, T2* and contrast-enhanced images).

READERS	Sensitivity (95% CI)	Specificity (95% CI)	PPV (95% CI)	NPV (95% CI)
1	55% (31-77)	100% (63-100)	100% (71-100)	47% (23-72)
2	55% (31-77)	100% (63-100)	100% (71-100)	47% (23-72)
3	45% (23-68)	100% (63-100)	100% (66-100)	42% (20-66)

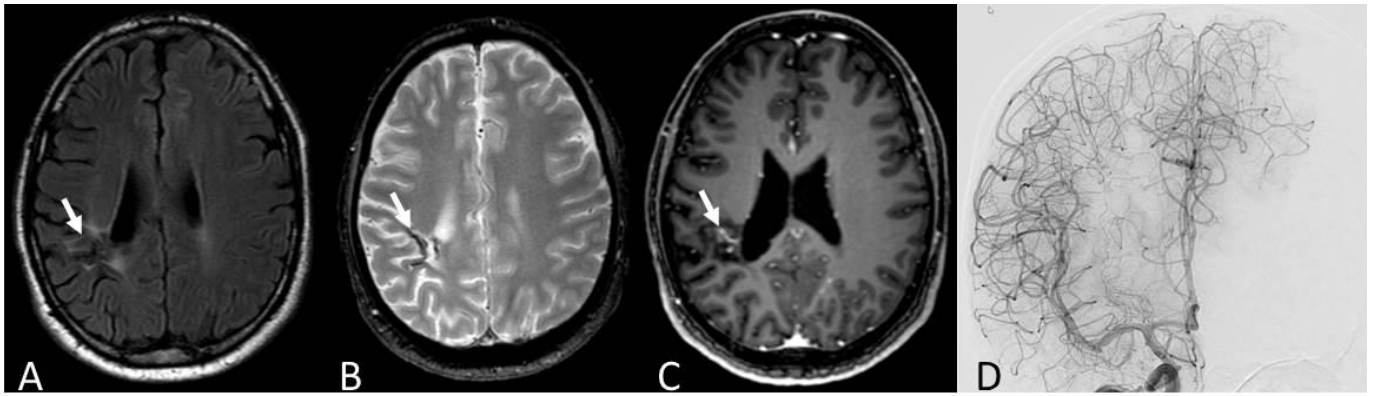


Figure 2 (patient 22): Follow-up MRI 4 years after radiosurgery for a ruptured right parietal AVM. A. Axial FLAIR shows a mixed signal at the site of the radiosurgically treated AVM (arrow). B. Axial T2* show a subcortical right parietal hypointense signal related to hemorrhagic sequelae (arrow). C. Post-contrast 3D T1 GRE shows a linear contrast enhancement at the site of the nidus (arrow) due to radio-induced lesions and misinterpreted as a residual AVM by 2 readers. D. DSA with frontal intracranial view from right carotid angiogram confirms the absence of residual AVM.

ASL/TOF for the detection of residual AVM

Sensitivity, specificity, positive predictive value, and negative predictive value of ASL/TOF for the detection of residual AVM were 85% (95% CI 62-97), 100% (95% CI 63-100), 100% (95% CI 80-100) and 73% (95% CI 39-94) respectively. Individual results are described in **Table 5**. All residual AVMs detected on ASL/TOF were confirmed on DSA. However, in 3 patients, ASL/TOF images were interpreted as normal whereas residual AVS was demonstrated on DSA. Among these 3 patients, a faint hypersignal on ASL images at the site of the nidus in 1 patient was judged suggestive of residual AVM by the 3 readers. In this case, there was no signal anomaly on anatomical MR sequences so that the readers, blinded from AVM location, were unable to locate the nidus site (**figure 3**).

Table 5: Sensitivity, Specificity, Positive Predictive Value and Negative Predictive Value of second sitting (FLAIR, T2*, and ASL-TOF images).

READERS	Sensitivity (95% CI)	Specificity (95% CI)	PPV (95% CI)	NPV (95% CI)
1	85% (62-97)	100% (63-100)	100% (80-100)	72.7% (39-94)
2	85% (62-97)	94.4% (47-100)	87.5% (72-100)	70% (35-93)
3	80% (56-94)	94.1% (47-100)	87.5% (71-100)	63.6% (31-89)

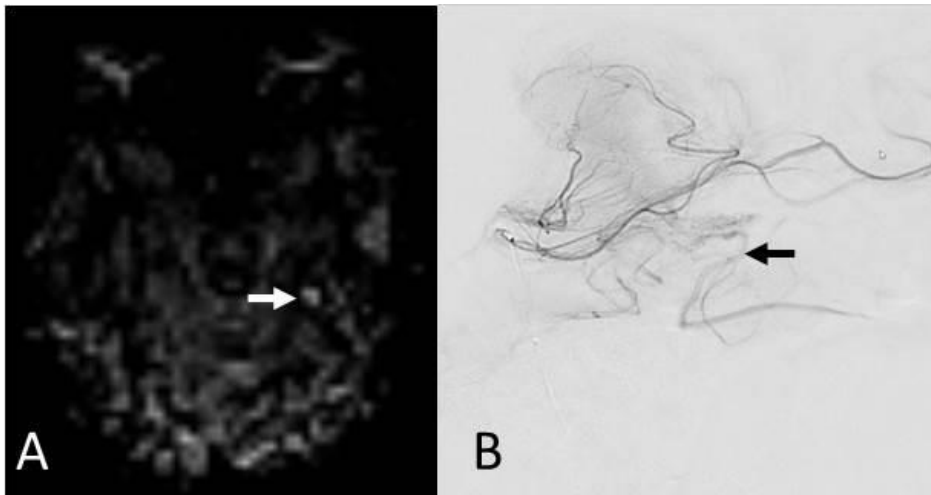


Figure 3 (patient 9): Follow-up MRI 6 years after radiosurgery for an unruptured left posterior temporal AVM. A. ASL showed a faint hyperintense signal (arrow) not interpreted as a residual AVM by the 3 readers who were blinded from AVM location. B. DSA with sagittal intracranial view from supra selective left temporal artery angiogram shows an early contrast filling of the superficial draining vein (arrow).

Comparison between contrast-enhanced MR sequences and ASL/TOF

ASL/TOF significantly improved residual AVM detection compared to contrast-enhanced MRI ($p=0.008$). In 5 patients with AVS on DSA and in 1 patient with a 5-mm nidus on DSA, the residual AVM was only detected on ASL/TOF whereas the readers considered the nidus as obliterated on contrast-enhanced MR images (**figure 4**). Among the 5 patients with AVS on DSA judged as occluded on contrast-enhanced MRI, the residual shunting was only detected on ASL in 3 patients (**figure 5**). On contrast-enhanced sequences, the “uncertain” score (3/5) was noted in 9 patients for the first sitting (contrast-enhanced MRI) and in 6 patients for the third sitting (all MR sequences). With ASL/TOF alone, there was no “uncertain” score (**figure 6**).

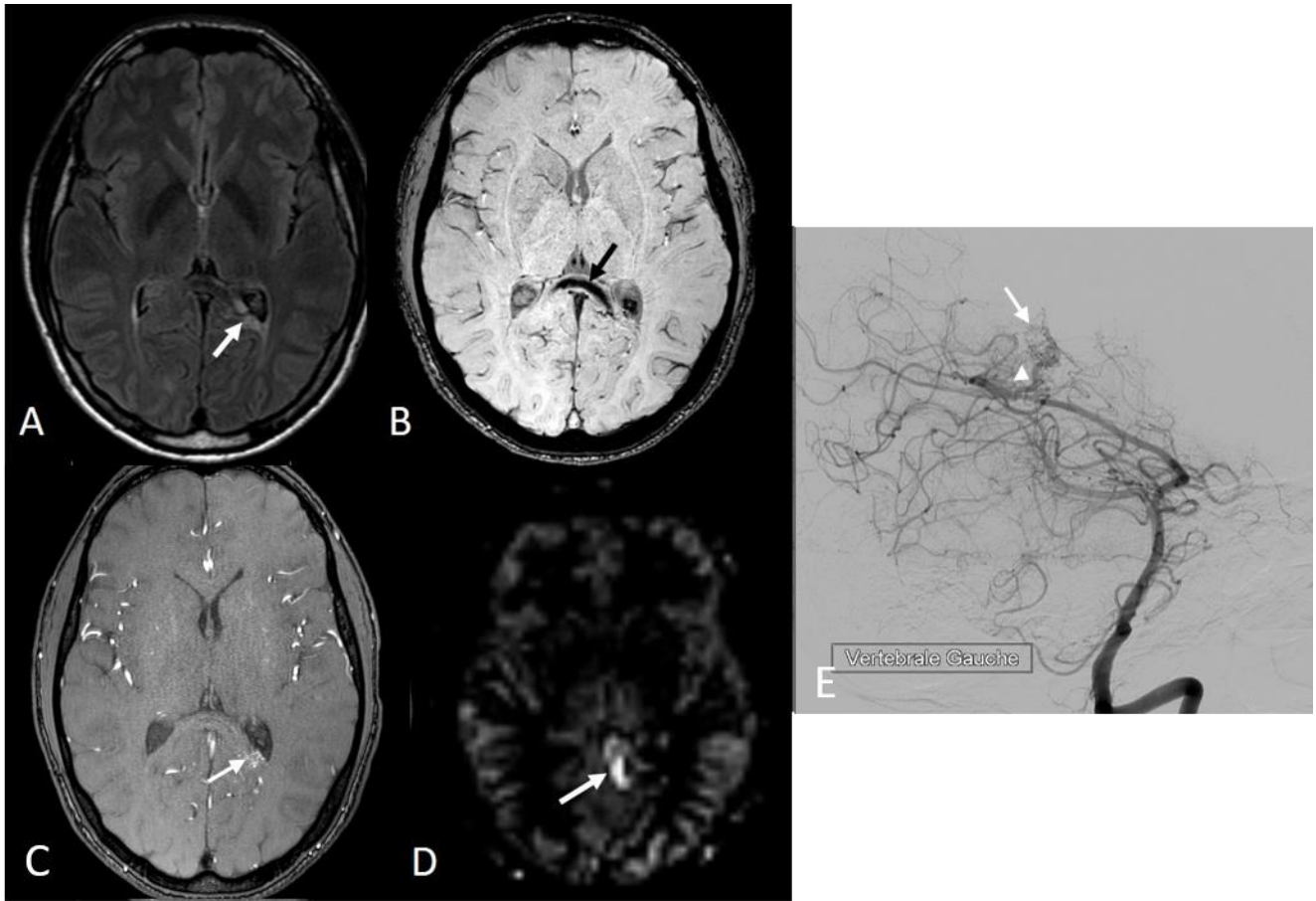


Figure 4 (patient 21): Follow-up MRI 2 years after radiosurgery for a ruptured parietal AVM close to the corpus callosum. A. Axial FLAIR shows a slight hypersignal at the site of the nidus (arrow). B. T2* image shows a hypointense hemorrhagic sequela in the corpus callosum (arrow). C. Native image from 3D TOF shows a residual 5-mm nidus (arrow). D. ASL image shows a focal hyperintense signal of the deep draining vein (arrow). E. DSA with sagittal intracranial view from left vertebral angiogram confirms the presence of a residual nidus (arrow) with an early deep draining vein (arrowhead).

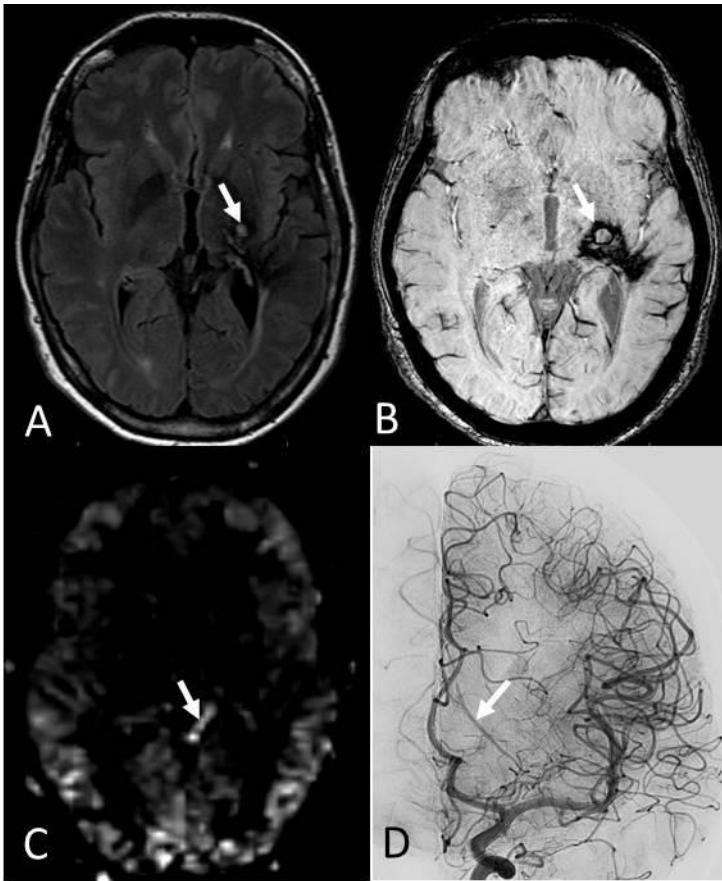


Figure 5 (patient 2): Follow-up MRI 7 years after radiosurgery for a ruptured AVM of left thalamus. A. Axial FLAIR shows a slight hypersignal at the site of the radiologically treated nidus. B. T2* image shows hypointense hemorrhagic sequelae in the left deep nuclei. C. ASL image shows a focal tubular hyperintense signal of the deep draining vein. D. DSA with frontal intracranial view from left carotid angiogram confirms the presence of a residual arterio-venous shunting without measurable nidus. Only an early contrast filling of the draining vein is detected on angiogram (arrow).

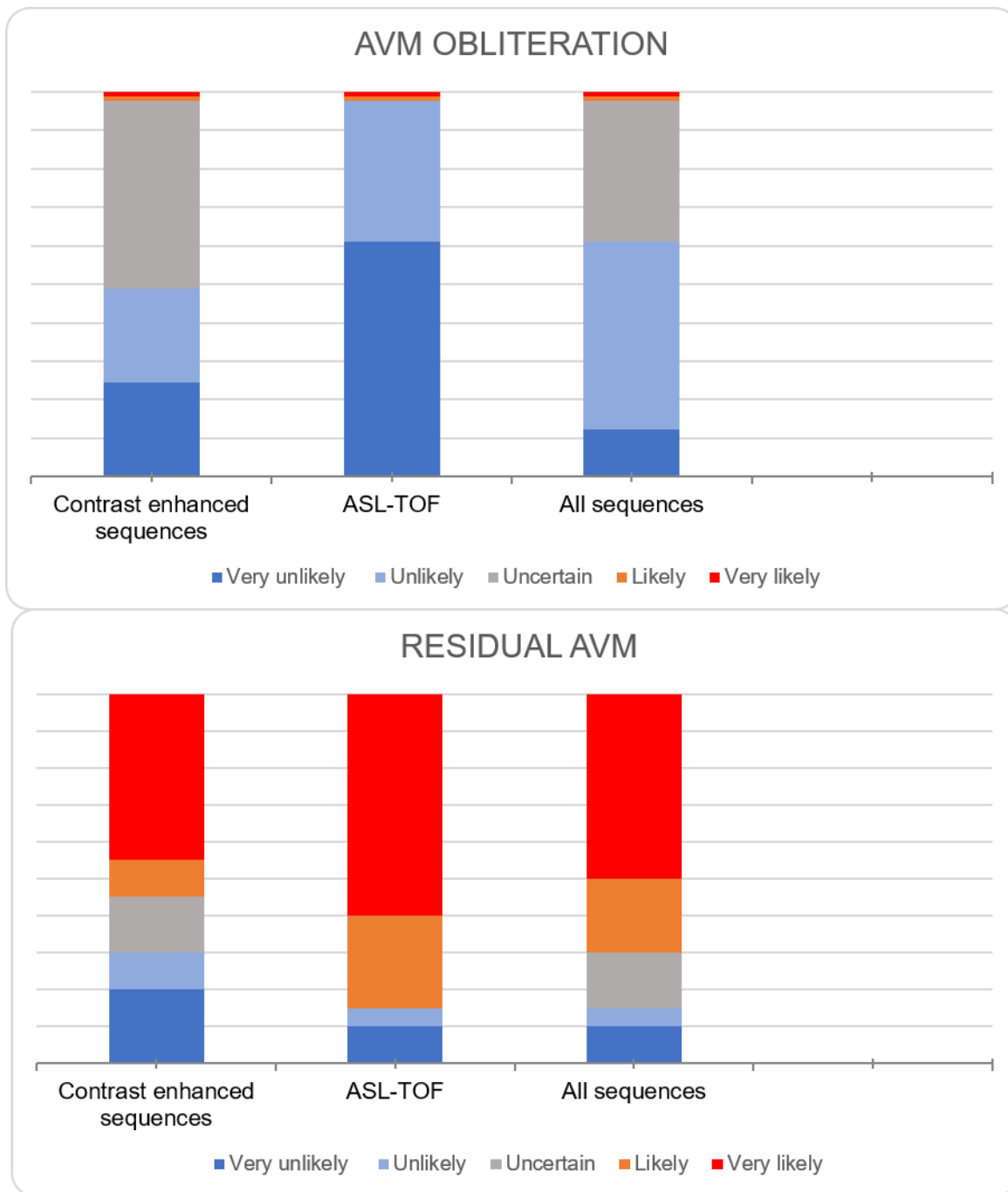


Figure 6: Distribution of 5-point scale of the 3 settings in the 28 patients with and without residual AVM on DSA. In the “AVM obliteration” group, reader accuracy and confidence increase with ASL/TOF with no “uncertain” score and more “very unlikely” scores. In the “residual AVM” group, reader accuracy and confidence increased with ASL/TOF with no “uncertain” score and more “very likely” scores.

DISCUSSION

Our study showed that non-contrast 3T MRI using ASL and 3D TOF was more sensitive than contrast-enhanced MRI to detect residual brain AVM in patients treated by radiosurgery for a small AVM. Clinical value of non-contrast MR sequences was even better when they were analyzed without post-contrast 3D T1 GRE images due to the confusion between radio-induced enhancement and residual AVM.

To our knowledge, no previous study compared non-contrast MRI with contrast-enhanced MRI in the follow-up of radiosurgically treated patients for a small brain AVM. Only a few studies assessed the interest of ASL for the evaluation of intracranial arterio-venous dural fistulas and/or brain AVMs (17, 21-23) including two conducted in radiosurgically treated patients for a brain AVM (21, 23). In our study, only patients treated by radiosurgery for a small brain AVMs have been included which could explain why most of the patients in had nidus obliteration or residual AVS on DSA. Despite this selected population with small residual AVMs, ASL/TOF had an excellent interobserver agreement and a better sensitivity than contrast-enhanced MRI. This was explained by a better confidence with no “uncertain” score to detect a residual flow on TOF/ASL images.

When the PLD is appropriate, ASL images of a healthy brain do not show any hypersignal in the venous structures because the transit time of the labeled arterial protons in the capillary bed is longer than the PLD. However, in case of AVS, rapid transportation of the labeled protons into the venous compartment is responsible for a hypersignal in the nidus and/or in the draining veins.

In 2017, *Kodera et al.* (23), in 7 patients with brain AVMs treated by radiosurgery, showed AVM obliteration on DSA in all patients when AVM disappeared on ASL images. More recently, *Heit et al.* (21) in a retrospective study including 15 patients with larger nidus size compared to our cohort, showed 100% sensitivity and 98% specificity of ASL for the detection of residual AVM after radiosurgery. These data suggest that 3T MRI protocol should include ASL to decide the

most adequate time of DSA to confirm nidus obliteration.

Previous studies showed the usefulness of 3D TOF to demonstrate intracranial AVS or to characterize brain AVM (13) but no study evaluated the interest of this technique combined with ASL in the follow-up of radiosurgically treated patients. Findings showed a higher confidence of the combined sequences compared to contrast-enhanced MR sequences to state the presence or the absence of residual AVM even though ASL seemed to be the most sensitive sequence to detect a residual flow in the nidus. However, we have to take into account that spatial resolution of TOF and ASL sequences have been optimized in this study by the use of 3T magnet and 32-channel coil.

We found that contrast-enhanced MR sequences were sometimes confusing. Indeed, contrast uptake at the site of the nidus on led to a doubt between residual AVM and radio-induced lesions translated in our study in more ‘uncertain” scores. These preliminary data suggest that, in the long-term follow-up of patients treated by radiosurgery for a brain AVM, contrast-enhanced MR sequences would not be systematically required to state the presence or the absence of residual AVM after treatment.

Furthermore, patients with brain AVM are exposed to repeated gadolinium chelate injection during their follow-up and recent data suggested avoiding the use of contrast agent whenever possible due to the gadolinium retention in the deep brain nuclei (11).

Limits

Several limitations may be highlighted in our study. First, the small sample size does not allow to conclude on the futility of contrast-enhanced MR sequences in clinical routine to determine the time of DSA. Second, we did not have the opportunity to add a control group with both DSA and MRI including ASL/TOF in patients without brain AVM that would have improved the statistical power. Third, this is a retrospective and single center design which may induce a selection bias. Prospective randomized studies including control groups would be useful to

confirm our preliminary data. Finally, we used 2D ASL with a single PLD value whereas technical advances have been recently made with commercially available 3D ASL sequences including multi-PLD that may potentially improve the image quality and the robustness of image interpretation (24).

CONCLUSION

In this study, contrast-enhanced MR sequences were less relevant than non-contrast MRI including TOF and ASL at 3T to demonstrate residual AVM in the follow-up of patients with brain AVM treated by radiosurgery. These data suggest that ASL/TOF should be used to decide the precise time of DSA which remains the gold standard to confirm AVM obliteration. Furthermore, repeated injections of gadolinium could be spared regarding the potential risk of accumulation in the deep brain nuclei. Further studies including larger groups of patients are needed to confirm this hypothesis.

REFERENCES

1. Arteriovenous Malformation Study Group. Arteriovenous malformations of the brain in adults. *N Engl J Med* 1999;340:1812–8.
2. Laakso A, Hernesniemi J. Arteriovenous malformations: epidemiology and clinical presentation. *Neurosurg Clin N Am.* 2012;23:1–6.
3. Yamada S, Takagi Y, Nozaki K, Kikuta K, Hashimoto N. Risk factors for subsequent hemorrhage in patients with cerebral arteriovenous malformations. *J Neurosurg.* 2007:965–72.
4. Van Beijnum J, van der Worp HB, Buis DR, Al-Shahi Salman R, Kappelle LJ, Rinkel GJE, et al. Treatment of brain arteriovenous malformations: a systematic review and meta-analysis. *JAMA.* 2011:2011–9.
5. Vlaskou Badra E, Ermiş E, Mordasini P, Herrmann E. Radiosurgery and radiotherapy for arteriovenous malformations: outcome predictors and review of the literature. *J Neurosurg Sci.* 2018:490–504.
6. Friedman WA, Bova FJ. Radiosurgery for arteriovenous malformations. *Neurol. Res.* 2011:803–19.
7. Chowdhury AH, Ghose SK, Mohammad QD, Habib M, Khan SU, Rahman KM. Digital Subtraction Angiography is Superior to Magnetic Resonance Angiography in Diagnosis of Cerebral Arteriovenous Malformation. *Mymensingh Med J MMJ.* 2015:356–65.
8. Willinsky RA, Taylor SM, terBrugge K, Farb RI, Tomlinson G, Montanera W. Neurologic Complications of Cerebral Angiography: Prospective Analysis of 2,899 Procedures and Review of the Literature. *Radiology.* 2003:522–8.
9. Hadizadeh DR, von Falkenhausen M, Gieseke J, Meyer B, Urbach H, Hoogeveen R, et al. Cerebral Arteriovenous Malformation: Spetzler-Martin Classification at Subsecond-Temporal-

Resolution Four-dimensional MR Angiography Compared with That at DSA 1. *Radiology*. 2008;205–213.

10. Soize S, Bouquigny F, Kadziolka K, Portefaix C, Pierot L. Value of 4D MR angiography at 3T compared with DSA for the follow-up of treated brain arteriovenous malformation. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2014;1903–9.

11. Choi JW, Moon W-J. Gadolinium Deposition in the Brain: Current Updates. *Korean J Radiol*. 2019;134–47.

12. Adin ME, Kleinberg L, Vaidya D, Zan E, Mirbagheri S, Yousem DM. Hyperintense Dentate Nuclei on T1-Weighted MRI: Relation to Repeat Gadolinium Administration. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2015;1859–65.

13. Buis DR, Bot JCJ, Barkhof F, Knol DL, Lagerwaard FJ, Slotman BJ, et al. The Predictive Value of 3D Time-of-Flight MR Angiography in Assessment of Brain Arteriovenous Malformation Obliteration after Radiosurgery. *Am J Neuroradiol*. 2012;33:232–8.

14. Grade M, Hernandez Tamames JA, Pizzini FB, Achten E, Golay X, Smits M. A neuroradiologist's guide to arterial spin labeling MRI in clinical practice. *Neuroradiology*. 2015;57:1181–202.

15. Haller S, Zaharchuk G, Thomas DL, Lovblad K-O, Barkhof F, Golay X. Arterial Spin Labeling Perfusion of the Brain: Emerging Clinical Applications. *Radiology*. 2016;337–56.

16. Wolf RL, Wang J, Detre JA, Zager EL, Hurst RW. Arteriovenous Shunt Visualization in Arteriovenous Malformations with Arterial Spin-Labeling MR Imaging. *Am J Neuroradiol*. 2008;681–7.

17. Le TT, Fischbein NJ, André JB, Wijman C, Rosenberg J, Zaharchuk G. Identification of venous signal on arterial spin labeling improves diagnosis of dural arteriovenous fistulas and small arteriovenous malformations. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2012;61–8.

18. Cohen J. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educ Psychol Meas* 1960 ; 20 :37-46
19. Fleiss JL. Reliability of measurement. In: *The design and analysis of clinical experiments*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc; 1986. P. 1-32
20. Amukotuwa SA, Marks MP, Zaharchuk G, Calamante F, Bammer R, Fischbein N. Arterial Spin-Labeling Improves Detection of Intracranial Dural Arteriovenous Fistulas with MRI. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2018:669–77.
21. Heit JJ, Thakur NH, Iv M, Fischbein NJ, Wintermark M, Dodd RL, et al. Arterial-spin labeling MRI identifies residual cerebral arteriovenous malformation following stereotactic radiosurgery treatment. *J Neuroradiol*. 2019:30377-8
22. Hodel J, Leclerc X, Kalsoum E, Zuber M, Tamazyan R, Benadjaoud MA, et al. Intracranial Arteriovenous Shunting: Detection with Arterial Spin-Labeling and Susceptibility-Weighted Imaging Combined. *American Journal of Neuroradiology*. 2017:71–6.
23. Koderá T, Arai Y, Arishima H, Higashino Y, Isozaki M, Tsunetoshi K, et al. Evaluation of obliteration of arteriovenous malformations after stereotactic radiosurgery with arterial spin labeling MR imaging. *Br J Neurosurg*. 2017:641–7.
24. Johnston ME, Lu K, Maldjian JA, Jung Y. Multi-TI Arterial Spin Labeling MRI with Variable TR and Bolus Duration for Cerebral Blood Flow and Arterial Transit Time Mapping. *IEEE Trans Med Imaging*. 2015:1392–402.

CONCLUSION GENERALE

Les patients traités par radiochirurgie pour une malformation artérioveineuse cérébrale nécessitent un suivi au long cours en raison du délai d'action de la radiochirurgie. Notre étude a montré que les séquences IRM non injectées ASL/TOF étaient plus performantes que les séquences d'ARM 4D et 3DT1 EG après injection de gadolinium pour la détection d'un nidus de petite taille ou d'un shunt artério-veineux en fin de traitement. D'autre part, la détection d'un nidus résiduel sur la séquence 3D T1 EG était parfois difficile en présence d'une prise de contraste radio-induite. L'utilisation des séquences ASL et 3D TOF permettraient ainsi d'éviter les injections répétées de gadolinium et le risque potentiel de rétention au sein des noyaux gris centraux.

AUTEUR : Nom : GUILLAUD

Prénom : OPHELIE

Date de Soutenance : Vendredi 4 octobre 2019

Titre de la Thèse : Suivi IRM des patients traités par radiochirurgie pour une malformation artérioveineuse cérébrale : le gadolinium est-il toujours nécessaire ?

Thèse - Médecine - Lille 2019

Cadre de classement : Radiologie

DES + spécialité : DES Radiodiagnostic et imagerie médicale

Mots-clés : MAV, Radiochirurgie, IRM, ASL, 3D TOF, Gadolinium

Résumé

Objectif : Le suivi IRM des malformations artérioveineuses cérébrales (MAV) repose essentiellement sur les séquences IRM injectées. Pourtant, les séquences IRM arterial spin labeling (ASL) et time of flight (TOF) sont très sensibles pour la détection d'un nidus résiduel après traitement. L'objectif de cette étude était de comparer les séquences IRM non injectées ASL et TOF aux séquences IRM injectées ARM 4D et 3D T1 EG pour l'évaluation des MAV traitées par radiochirurgie.

Méthode : Dans cette étude rétrospective, nous avons inclus 28 patients traités par radiochirurgie pour une petite MAV (< 20 mm), ayant bénéficiés d'une IRM et d'une artériographie, avec un délai moyen de 4,2 ans entre le traitement et l'imagerie. 3 lecteurs ont interprété les images de façon indépendante sans connaissance des examens antérieurs au cours de 3 sessions séparées à 1 mois d'intervalle selon le schéma suivant : (i) séquences injectées uniquement (ARM 4D et 3D T1 EG après injection) ; (ii) séquences ASL et 3D TOF uniquement ; (iii) toutes les séquences. Le but était de déterminer la présence ou l'absence de nidus résiduel selon une échelle de probabilité de 1 à 5. L'artériographie était l'examen de référence.

Résultats : La session ASL/TOF avait la meilleure concordance interobservateur ($\kappa = 0.88$ IC 95% 0.72-1). La spécificité était de 100% pour l'ensemble des sessions et la sensibilité était la meilleure pour ASL/TOF (Se = 85 % IC 95% 62-97), comparée aux séquences injectées (Se = 55% IC 95% 21-73) et à toutes les séquences (Se = 75 % IC 95% 51-91) ($p = 0.008$). Parmi les patients présentant une MAV résiduelle en artériographie, 6 étaient détectées uniquement sur les séquences ASL/TOF, dont 3 visibles exclusivement en ASL.

Conclusion : Dans cette étude, les séquences IRM sans injection ASL/TOF étaient plus performantes que les séquences IRM avec injection de gadolinium pour la détection d'un nidus résiduel chez des patients traités par radiochirurgie pour une petite MAV cérébrale.

Composition du Jury :

Président : Pr Jean-Pierre Pruvo

Asseseurs : Pr Nicolas Reyns, Pr Charlotte Cordonnier, Dr Fouzi Bala

Directeur : Pr Xavier Leclerc