



UNIVERSITÉ DE LILLE
FACULTÉ DE MÉDECINE HENRI WAREMBOURG
Année : 2022

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN MÉDECINE

**Etude de la performance diagnostique d'un protocole IRM
ultrarapide dans les accidents vasculaires cérébraux ischémiques
en phase aiguë**

Présentée et soutenue publiquement le 22 septembre 2022 à 16h
au Pôle Recherche

par Robin GNANIH

JURY

Président :

Monsieur le Professeur Jean-Pierre PRUVO

Assesseurs :

Madame le Docteur Marta PASQUINI

Madame le Docteur Juliette DING

Directeur de thèse :

Monsieur le Professeur Sébastien VERCLYTTE

AVERTISSEMENT

La Faculté n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses :
celles-ci sont propres à leurs auteurs.

LISTE DES ABREVIATIONS

| | |
|--------------|---|
| ADC | Apparent Coefficient Diffusion |
| AHA | American Heart Association |
| ASA | American Stroke Association |
| AVC | Accident Vasculaire Cérébral |
| DWI | Diffusion-Weighted Imaging |
| EPI | Echo Planar Imaging |
| FLAIR | FLuid Attenuated Inversion Recovery |
| GHICL | Groupement des Hôpitaux de l'Institut Catholique de Lille |
| IA | Intelligence Artificielle |
| IRM | Imagerie par Résonance Magnétique |
| IV | Intraveineux |
| msEPI | multi shot Echo Planar Imaging |
| NIHSS | National Institutes of Health Stroke Scale |
| OMS | Organisation Mondiale de la Santé |
| RSB | Rapport Signal sur Bruit |
| rt-PA | recombinant tissue-Plasminogen Activator |
| SWI | Susceptibility Weighted Imaging |
| TOF | Time Of Flight |
| UNV | Unité Neuro-Vasculaire |
| UR | Ultrarapide |

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|----|
| AVERTISSEMENT | 2 |
| TABLE DES MATIERES..... | 4 |
| INTRODUCTION | 6 |
| 1. Accident vasculaire cérébral ischémique : généralités | 6 |
| 2. Prise en charge en imagerie..... | 7 |
| 3. Traitements..... | 10 |
| 4. Problématique du temps d'acquisition en IRM et techniques d'optimisation... | 11 |
| 5. Objectifs..... | 14 |
| MATERIEL ET METHODES..... | 16 |
| 1. Considérations éthiques | 16 |
| 2. Population..... | 16 |
| 3. Protocole IRM | 17 |
| 4. Analyse radiologique | 21 |
| 5. Analyse statistique..... | 23 |
| RESULTATS | 24 |
| 1. Population..... | 24 |
| 2. Reproductibilité inter-observateur | 26 |
| 3. Analyse qualitative..... | 28 |
| DISCUSSION | 34 |

| | |
|--------------------|----|
| CONCLUSION..... | 38 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | 39 |

INTRODUCTION

1. Accident vasculaire cérébral ischémique : généralités

L'accident vasculaire cérébral (AVC) ischémique est caractérisé par la survenue brutale d'un déficit neurologique focal, dû à une réduction aiguë du flux artériel cérébral en aval d'une occlusion artérielle. Les 3 principales causes sont : les macroangiopathies (environ 30 %), les microangiopathies (environ 20 %) et les cardiopathies emboligènes (environ 20 %). La cause n'est pas retrouvée dans environ 25 % des cas ¹.

L'AVC est la seconde cause mondiale de mortalité et la première cause de handicap moteur acquis de l'adulte selon l'OMS ^{1,2}. Il représente donc un enjeu de santé publique majeur. Sa prise en charge urgente est primordiale afin d'assurer aux patients le taux de survie le plus élevé et avec le moins de morbidité possible. En effet, on estime que chaque minute suivant un AVC ischémique passée sans traitement adéquat provoque la perte irrémédiable de 1,9 million de neurones et que chaque heure correspond à une perte neuronale équivalente à 3,6 années de vieillissement normal ³.

2. Prise en charge en imagerie

Dans le but d'obtenir un diagnostic précoce et d'entamer un traitement avec le délai le plus court possible, l'imagerie tient un rôle primordial dans la prise en charge d'un patient suspect d'AVC. Plusieurs techniques d'imagerie sont disponibles.

a. Le scanner cérébral sans injection

- En cas d'infarctus cérébral précoce, il apparaît souvent normal mais peut montrer certains signes tels que : l'hyperdensité spontanée artérielle (témoignant du thrombus dans l'artère occluse), l'effacement des sillons corticaux ou la dédifférenciation substance blanche/substance grise.
- Au-delà de la 6^{ème} heure, l'hypodensité cérébrale est marquée et systématisée au territoire artériel infarci, puis remplacée par une atrophie parenchymateuse séquellaire après plusieurs mois.
- Avantages par rapport à l'IRM :
 - (a) Disponibilité élevée dans le cadre de l'urgence.
 - (b) Temps d'acquisition court.
- Inconvénients par rapport à l'IRM :
 - (a) Faible sensibilité.
 - (b) Grande variabilité inter-observateur ⁴.

b. L'IRM cérébrale

- Le protocole minimal d'urgence est composé de 4 séquences :
 - (a) Diffusion (ou Diffusion-weighted imaging, DWI), permettant de visualiser l'infarctus cérébral de manière très précoce en hypersignal.
 - (b) T2/FLAIR, permettant de préciser la chronologie de survenue d'une lésion ischémique, indispensable notamment dans les cas d'AVC à

horaire de début inconnu. Le mismatch FLAIR/DWI (lésion ischémique en hypersignal DWI mais non visible en FLAIR) permettra d'orienter vers une chronologie aiguë, de délai de survenue inférieur à 4h30⁵. Il permet aussi de détecter d'éventuels flux lents (sous formes d'hypersignaux serpiginieux intravasculaires), signes d'un ralentissement du débit artériel dans le territoire hypoperfusé. Ils peuvent être le seul signe d'occlusion vasculaire notamment dans les accidents ischémiques transitoires^{6,7} et constituent un facteur prédictif de la survenue ou de la récurrence d'un AVC ischémique⁷⁻⁹.

(c) T2* (ou susceptibilité magnétique) ou SWI (Susceptibility Weighted Imaging), permettant de visualiser des remaniements hémorragiques en hyposignal au sein de la lésion ischémique. La détection du thrombus dans l'artère occluse est aussi permise par ces séquences, en fonction de sa composition intrinsèque en érythrocytes, sous la forme d'un large hyposignal marqué intravasculaire lorsqu'il est aigu. Il est en effet mieux visible dans les séquences de susceptibilité à plusieurs temps d'écho (dont un temps d'écho court), par différence de contraste avec l'artère saine en hypersignal^{10,11}.

(d) Time of flight (TOF), permettant d'évaluer la perméabilité du polygone de Willis.

- Avantages par rapport au scanner⁴ :

(a) Sensibilité élevée pour le diagnostic d'infarctus en phase aiguë et la recherche d'un éventuel diagnostic différentiel.

(b) Variabilité inter-observateur moindre.

(c) Sensibilité supérieure pour la détection de remaniements hémorragiques.

- Inconvénients par rapport au scanner :

(a) Disponibilité moindre.

(b) Temps d'acquisition plus long.

(c) Existence de contre-indications à évaluer en fonction du rapport bénéfice-risques (notamment : claustrophobie, pace-maker non compatible, matériel métallique intra-crânien).

c. Recommandations

- En France, les patients suspects d'AVC aigu doivent avoir un accès prioritaire à l'imagerie cérébrale 24 h/24 et 7 j/7. L'IRM est l'examen de première intention. En cas d'impossibilité d'accéder à l'IRM, il convient de réaliser un scanner cérébral ¹².
- Les guidelines Américaines (AHA/ASA 2018 ¹³) soulignent que chaque patient arrivant à l'hôpital avec une suspicion d'AVC aigu doit avoir une évaluation par imagerie cérébrale, par scanner sans injection permettant dans la majorité des cas d'obtenir les informations nécessaires pour prendre une décision de traitement immédiat. De plus, les circuits appropriés doivent être mis en place pour qu'au moins 50 % des patients éligibles à une thrombolyse intraveineuse et/ou une thrombectomie mécanique aient accès à un examen d'imagerie dans les 20 minutes suivant leur arrivée aux urgences.

3. Traitements

L'AVC ischémique étant dû à une occlusion artérielle, le traitement le plus efficace consiste en une revascularisation urgente afin de préserver un maximum de parenchyme cérébral sain, notamment par la thrombolyse intra veineuse et/ou par la thrombectomie mécanique.

a. Thrombolyse intraveineuse

La thrombolyse intraveineuse par le rt-PA (Altéplase) est recommandée dans les 4h30 suivant le début des symptômes ou dans les AVC à horaire de début inconnu validés par le mismatch FLAIR/DWI⁵ (lésion ischémique hyperintense en DWI mais non visible en FLAIR, compatible avec une chronologie aiguë) chez les patients éligibles. Elle doit être administrée le plus tôt possible. Les contre-indications principales sont liées au risque hémorragique (notamment : hémorragie intracrânienne ; traitement concomitant par des anticoagulants oraux ; thrombopénie ; hypertension artérielle sévère non contrôlée) mais le rapport bénéfice-risque est très largement favorable^{12,14,15}. Dans les centres disposant d'une Unité Neuro-Vasculaire (UNV) où le patient sera pris en charge, elle peut être rapidement administrée après prescription par un médecin spécialisé en pathologie neurovasculaire.

b. Thrombectomie mécanique

La thrombectomie mécanique par voie endovasculaire est recommandée dans les 6 heures suivant le début des symptômes chez les patients qui présentent une occlusion proximale d'une artère cérébrale¹³. Les indications peuvent être étendues jusqu'à 16 heures chez les patients ayant un mismatch DWI/Perfusion et jusqu'à 24 heures chez

les patients ayant un mismatch entre la sévérité clinique (score NIHSS) et un infarctus de petite taille, s'appuyant sur les résultats des études DIFFUSE 3 et DAWN^{13,16-19}.

Elle consiste à extraire le thrombus intra-artériel chez les patients ayant une occlusion proximale d'une artère intracrânienne et peut être réalisée en complément de la thrombolyse intraveineuse. Elle doit être réalisée dans un centre de neuro-radiologie interventionnelle (disposant au moins d'une salle d'angiographie interventionnelle permettant une anesthésie générale dans des conditions d'asepsie identiques à celles d'un bloc opératoire) par un médecin-opérateur de thrombectomie mécanique (neuroradiologue interventionnel en France)²⁰.

4. Problématique du temps d'acquisition en IRM et techniques d'optimisation

Chaque minute compte à partir de la suspicion clinique d'AVC jusqu'à la prise en charge thérapeutique. Les avancées techniques récentes se sont donc portées sur la nécessité de réduire le temps d'acquisition de l'IRM avec notamment des séquences ultrarapides (UR) et des méthodes d'intelligence artificielle (IA). Ces techniques peuvent permettre dans certains cas de diminuer le temps d'acquisition du protocole AVC d'environ 10 minutes à moins de 2 minutes.

a. Techniques de diminution du temps d'acquisition par optimisation des séquences

Plusieurs méthodes permettent d'optimiser significativement l'acquisition de séquences d'IRM. Ces techniques permettent soit d'améliorer la qualité d'image, en

particulier le rapport signal sur bruit (RSB) et la résolution spatiale tout en conservant un temps d'acquisition identique, soit d'accélérer le temps d'acquisition pour une qualité identique.

De nombreuses techniques sont disponibles commercialement ou accessibles auprès des constructeurs via l'implication dans des projets de recherche (séquences en work in progress). L'objectif n'est pas de les recenser toutes, mais on peut citer comme exemple l'acquisition multibande, permettant l'acquisition de plusieurs coupes de manière simultanée ^{21,22}, ou encore la technique de Compressed Sensing, acquisition avec sous-échantillonnage aléatoire de l'espace k ^{23,24}.

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés à l'utilisation et l'optimisation de séquences ultrarapides de type echo planar imaging (EPI).

b. Séquences ultrarapides EPI

L'EPI est la méthode d'acquisition la plus rapide en IRM (100 ms/coupe) mais avec une résolution spatiale limitée ²⁵. Elle repose sur :

- Une impulsion d'excitation, éventuellement précédée d'une préparation de l'aimantation.
- Une acquisition continue du signal sous la forme d'un train d'échos de gradient, pour acquérir l'espace K .
- Des gradients de lecture et de phase adaptés pour le codage spatial de l'image, avec plusieurs trajectoires possibles pour remplir l'espace K .

La rapidité d'acquisition se fait cependant au prix d'une dégradation de la qualité d'image (et notamment du RSB) et la présence d'artéfacts liés :

- A la sensibilité intrinsèque à la susceptibilité magnétique menant à des phénomènes de distorsion.
- Aux imperfections de gradients qui perturbent le codage spatial, à l'origine d'images fantômes.
- A la bande passante de lecture étroite dans le sens du codage de phase, provoquant des artéfacts de déplacement chimique dans cette direction, nécessitant la suppression du signal de la graisse.

Des études récentes ont testé un protocole nommé « EPIMix » basé sur des séquences UR EPI permettant d'acquérir 6 séquences d'IRM en moins de 2 minutes (comprenant : T1-FLAIR, T2, DWI, ADC, T2* et T2-FLAIR) ²⁶⁻²⁹. Deux de ces études ont testé plus précisément la performance diagnostique de ce protocole dans la détection d'AVC en phase aiguë ^{28,29}, et ont montré une concordance quasi équivalente au protocole standard malgré une dégradation de la qualité des images, notamment en raison d'artéfacts de distorsion. De plus, l'acquisition des 6 séquences se réalisait de manière systématique et ne laissait pas de flexibilité quant à une éventuelle modification du protocole ou des paramètres techniques en fonction d'une situation clinique donnée.

- c. Technique de diminution du temps d'acquisition par méthode de débruitage assistée par intelligence artificielle (IA)

Une deuxième méthode complémentaire aux techniques d'acquisition UR permettant d'accélérer l'acquisition et la qualité des images est basée sur l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle ^{30,31}.

La technique d'imagerie rapide améliorée par l'IA que nous utilisons combine :

- Un nouveau schéma de machine learning (apprentissage automatique) permettant de limiter l'amplification du bruit et d'améliorer le RSB.
- Un module de préparation de transfert de magnétisation pour fournir un contraste cliniquement satisfaisant (comparable au contraste obtenu avec des séquences Turbo Spin Echo).
- Des facteurs de sous-échantillonnage EPI élevés pour réduire la distorsion.

L'entraînement machine learning et la reconstruction d'image intègrent un paramètre réglable pour contrôler le niveau de débruitage/lissage souhaité. Cette méthode a été testée et validée dans une étude récente ³⁰.

5. Objectifs

L'objectif principal de notre étude est d'évaluer les performances diagnostiques d'un protocole UR, basé en partie sur des séquences multi shot EPI (msEPI), optimisées par l'IA, dans la détection d'AVC ischémiques en phase aiguë en comparaisons au protocole de référence.

Les objectifs secondaires sont d'évaluer la détection de signes associés recherchés systématiquement lors de l'exploration d'un AVC en phase aiguë, en comparaison avec le protocole de référence, tels que :

- Nombre de lésions et territoires vasculaires atteints
- Visibilité des lésions en FLAIR
- Flux lents en FLAIR

- Remaniements hémorragiques en T2*
- Thrombus en T2*
- Diagnostic différentiel en cas de diffusion négative

MATERIEL ET METHODES

1. Considérations éthiques

Cette étude a été validée par le comité d'éthique local du Groupement des Hôpitaux de l'Institut Catholique de Lille (GHICL), IRB 000133355 le 14 décembre 2021 (projet RNIPH-2021-40). Chaque participant a été informé en utilisant différents moyens de communication tels que des lettres médicales, des affiches, un site Web. Conformément à la loi, chacun a pu s'opposer à l'utilisation de ses données à des fins de recherche.

2. Population

De janvier à octobre 2021, nous avons inclus dans cette étude prospective monocentrique, tous les patients âgés de 18 ans ou plus qui ont été admis dans l'UNV du Centre Hospitalier de Saint-Philibert (Groupement des Hôpitaux de l'Institut Catholique de Lille, GHICL) pour suspicion d'AVC ischémique en phase aiguë potentiellement éligibles à une thrombolyse intraveineuse, associée ou non à une thrombectomie mécanique, avec un délai inférieur à 4h30 ou un horaire de début des symptômes inconnu, et ayant bénéficié d'une IRM cérébrale en urgence.

Pour chaque sujet, un enregistrement complet des données anamnestiques pertinentes a été réalisé, comprenant le temps écoulé depuis l'apparition des symptômes, la gravité du déficit neurologique à l'admission évaluée par le score

NIHSS (National Institutes of Health Stroke Scale), les symptômes neurologiques initiaux, le traitement en cours, le taux de glycémie, et la tension artérielle systolique à l'admission.

Les critères d'exclusion étaient :

- b. Un âge inférieur à 18 ans ;
- c. Une contre-indication à l'IRM ;
- d. Un délai connu depuis l'apparition des symptômes supérieur à 4h30 ;
- e. Une acquisition incomplète du protocole IRM ou des problèmes techniques (notamment artéfacts de mouvement).

3. Protocole IRM

Les acquisitions ont été réalisées sur une IRM 3 Tesla (MAGNETOM Vida ; Siemens Healthcare, Erlangen, Allemagne), en utilisant une antenne tête à 20 canaux pour la réception du signal.

Pour chaque patient, le protocole IRM comprenait systématiquement deux jeux de données d'imagerie différents acquis dans un ordre aléatoire :

- Le protocole standard de référence (durée : 7 minutes et 27 secondes) : 3D SWI, axial T2-FLAIR et DWI.
- Le protocole UR (durée : 1 minute et 54 secondes) : basé sur une méthode msEPI accélérée par l'IA pour obtenir les séquences T2, T2* et T2-FLAIR, complétée par une séquence DWI rapide single shot EPI. La méthode UR utilise un facteur de sous-échantillonnage élevé pour atténuer la distorsion EPI

et intègre une nouvelle technique de reconstruction de machine learning pour fournir un RSB amélioré ainsi qu'une technique basée sur la carte de champ B0 pour réduire davantage la distorsion EPI ³⁰.

Une séquence 3D TOF (durée : 1 minute et 45 secondes) était également systématiquement incluse dans le protocole, réalisant un temps total d'examen de 11 minutes et 6 secondes.

Le protocole UR a été testé et validé préalablement auprès de 16 sujets sains (8 femmes, 8 hommes âgés de 19 à 67 ans). Les données sous-échantillonnées rétrospectivement de 12 sujets ont été utilisées pour entraîner l'IA, et les quatre sujets restants ont été utilisés pour la validation. Un module de préparation de contraste de magnétisation optimisé intégré à l'acquisition msEPI-FLAIR a permis de fournir un contraste gris/blanc amélioré similaire à celui d'une acquisition Turbo Spin Echo T2-FLAIR ³².

On note que dans le protocole UR, des images pondérées en T2 ont été acquises conjointement à l'acquisition T2* (sans pénalité de temps), mais n'ont pas été utilisées dans la présente étude.

Les paramètres de séquence IRM sont présentés dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1. Paramètres IRM du protocole ultra rapide)

| Protocole ultra rapide | | | |
|---------------------------------|---------|----------|-----------------|
| Paramètres | T2*/T2 | T2-FLAIR | DWI (b0, b1000) |
| Champ de vue (mm ²) | 224x224 | 224x224 | 224x224 |
| Matrice | 224x224 | 224x224 | 160x160 |
| Largeur de coupe (mm) | 4 | 4 | 4 |
| Espace inter-coupes | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| Temps de répétition(ms) | 4500 | 9000 | 2700 |
| Temps d'écho (ms) | 21/XX | 85 | 71 |
| Espacement des échos (ms) | 1.18 | 1.19 | 0.96 |
| Temps d'inversion (ms) | - | 2500 | - |
| Bande passante (Hz) | 970 | 970 | 1158 |
| Accélération | PAT2 | PAT2 | PAT2, SMS2 |
| Durée (s) | 25 | 57 | 32 |

Tableau 2. Paramètres IRM du protocole de référence

| Protocole de référence | | | |
|---------------------------------|---------|----------|-----------------|
| Paramètres | T2*-SWI | T2-FLAIR | DWI (b0, b1000) |
| Champ de vue (mm ²) | 180x220 | 172x230 | 240x240 |
| Matrice | 196x256 | 214x230 | 126x140 |
| Epaisseur de coupe (mm) | 1.5 | 4 | 3 |
| Espace inter-coupes (mm) | 0 | 1 | 0 |
| Temps de répétition (ms) | 27 | 9000 | 5000 |
| Temps d'écho (ms) | 10/20 | 111 | 75 |
| Espacement des échos (ms) | - | 10.1 | 0.73 |
| Temps d'inversion (ms) | - | 2500 | - |
| Bande passante (Hz) | 120 | 200 | 1552 |
| Accélération | PAT2 | PAT2 | PAT2, SMS2 |
| Durée (s) | 230 | 126 | 90 |

4. Analyse radiologique

Tous les examens ont été anonymisés et randomisés avant analyse.

L'analyse qualitative a été réalisée par un neuroradiologue expérimenté (sénior) et un interne de radiologie (junior) en aveugle.

Chaque examen a été analysé dans un ordre aléatoire et en aveugle par les deux lecteurs, en protocole standard et en protocole UR.

Chaque lecteur devait évaluer chaque jeu de données selon une évaluation visuelle qualitative avec les critères suivants (Tableau 3) (Figure 1) :

- Carte DWI et ADC : présence, nombre et localisation des AVC ischémiques aigus, définis par un hypersignal parenchymateux en DWI et une diminution significative de l'ADC.
- FLAIR : visibilité de l'AVC aigu et détection des flux lents.
- T2* (UR)/SWI (référence) : détection de thrombus et présence de remaniements hémorragiques au sein de l'AVC aigu.

En l'absence d'AVC récent en DWI, les lecteurs devaient rechercher un éventuel diagnostic différentiel visible en IRM.

Les deux lecteurs ont examiné les examens présentant des divergences au cours d'une même session pour obtenir un consensus.

Tableau 3. Critères d'évaluation visuelle qualitative utilisés pour chaque jeu de données

| | | |
|--|---|-------------------------------------|
| DWI/ADC | AVC ischémique en phase aiguë | Absence |
| | | Présence |
| | Nombre de lésions | 1 |
| | | 2 |
| | | 3 ou plus |
| | Localisation de la lésion (territoire vasculaire) | Artère cérébrale moyenne droite |
| | | Artère cérébrale moyenne gauche |
| | | Artère cérébrale antérieure droite |
| | | Artère cérébrale antérieure gauche |
| | | Artère cérébrale postérieure droite |
| | | Artère cérébrale postérieure gauche |
| | | Hémisphère cérébelleux droit |
| | | Hémisphère cérébelleux gauche |
| Tronc | | |
| Multi-territorial | | |
| FLAIR | Visibilité des lésions récentes | Non |
| | | Oui |
| | | Agés différents |
| | Flux lents | Absence |
| | Présence | |
| SWI/T2* | Remaniements hémorragiques | Absence |
| | | Présence |
| | Thrombus artériel | Absence |
| | | Présence |
| Si DWI -, Diagnostic Différentiel | | Absence |
| | | Hématome |
| | | Autres |

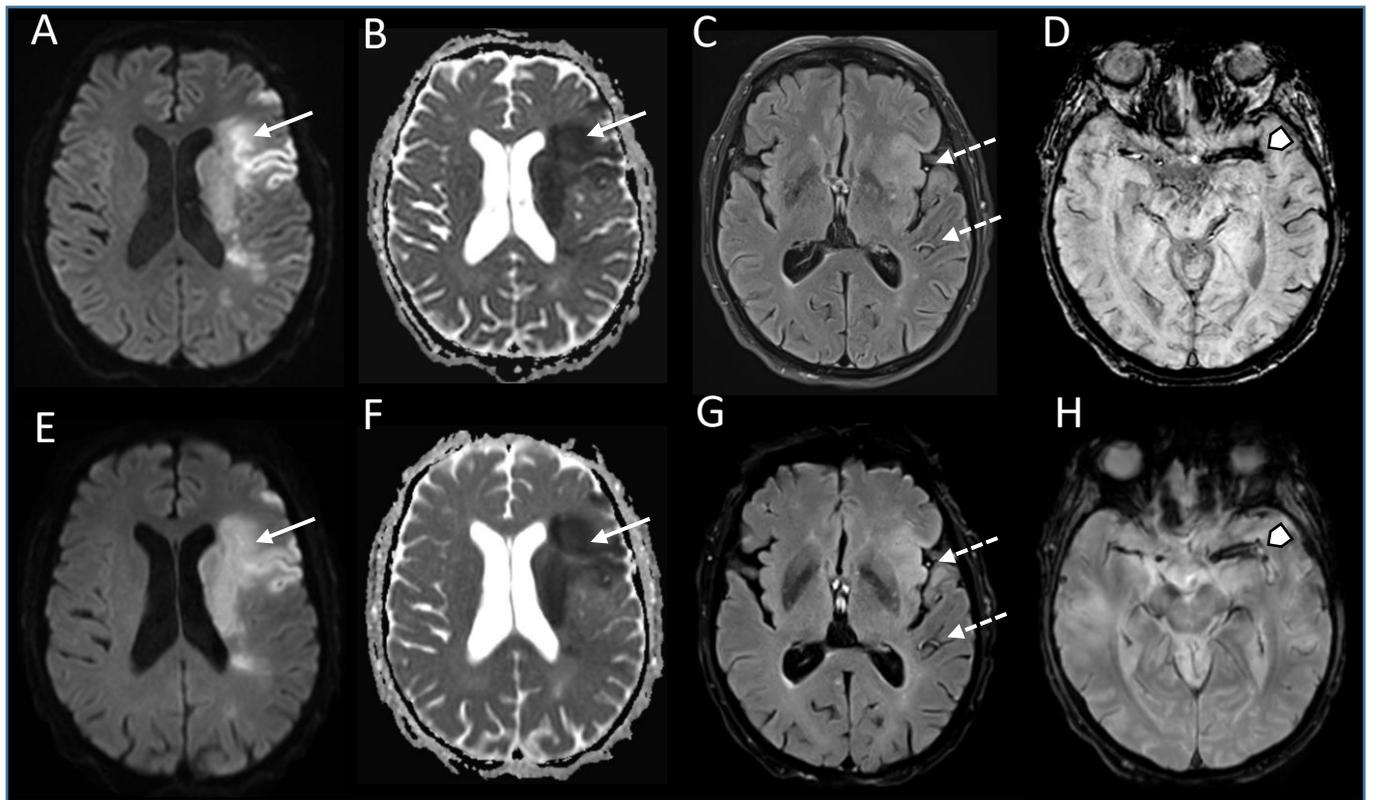


Figure 1. AVC récent situé dans le territoire de l'artère sylvienne gauche détecté de manière similaire avec les protocoles de référence (rangée du haut) et UR (rangée du bas). AVC aigu hyperintense en DWI (A et E) (flèches blanches), hypointense sur les cartes ADC (B et F). Flux lents en FLAIR (C et G) (flèches pointillées). Le thrombus artériel est visible à la fois en SWI (C) et en UR-T2 (G) (têtes de flèches).*

5. Analyse statistique

Les analyses statistiques ont été réalisées par Stéphane Verdun, Biostatisticien de la Délégation à la Recherche Clinique et à l'Innovation du GHICL avec le logiciel R version 4.0.5.

Les reproductibilités inter-observateur (junior vs sénior) et intra-observateur (pour le junior, protocole UR vs standard) ont été étudiées.

Le coefficient Kappa de Cohen a été calculé pour chaque diagnostic, pour le même protocole entre les deux lecteurs puis entre les deux protocoles pour le junior.

RESULTATS

1. Population

173 patients ont été inclus dans l'étude et ont bénéficié de l'ensemble des séquences IRM (protocole standard et protocole UR) de janvier à octobre 2021. 142 patients avaient un horaire de début des symptômes connu depuis l'apparition des symptômes (délai moyen jusqu'à l'IRM [min, \pm écart-type] = 146 \pm 81,1). 31 patients ont été pris en charge pour un AVC avec une heure de début inconnue.

Les caractéristiques de la population sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 4. Caractéristiques de la population. ET, écart type ; n, nombre ; NIHSS, National Institutes of Health Stroke Scale, de 0 à 42

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Taille de l'échantillon | n = 173 | |
| Age moyen +/- ET (années) | 69 +/- 18 | |
| Hommes/Femmes | n = 72/ n = 101 | |
| NIHSS moyen à l'admission +/- ET | 8,2 +/- 8,1 | |
| Patients avec un temps connu depuis le déficit initial (%) | n = 142 (82,1 %) | |
| Délai entre le déficit initial et l'IRM (min) +/- ET | 146 +/- 81,1 | |
| Déficit initial (%) | Déficit sensitivomoteur | n = 104 (60,1%) |
| | Vertiges | n = 8 (4,6%) |
| | Troubles phasiques | n = 54 (31,2%) |
| | Autres | n = 7 (4%) |
| AVC récent (DWI + sur le protocole standard) (%) | n = 77 (44,5%) | |
| Thrombolyse (%) | n = 35 (20%) | |
| Thrombectomie (%) | n = 12 (6,9%) | |
| Décès durant l'hospitalisation (%) | n = 20 (11,6 %) | |

2. Reproductibilité inter-observateur

La reproductibilité inter-observateur entre les deux lecteurs, sénior et junior a été analysée sur tous les examens, en protocole standard et en protocole UR.

Les résultats sont détaillés dans le tableau 5.

a. Protocole standard

Les valeurs de kappa de Cohen ont montré une concordance presque parfaite pour la détection de l'AVC récent en DWI ($k=0,97$; intervalle de confiance [IC] à 95%, 0,93-1), en ADC ($k=0,98$; [IC] à 95%, 0,94-1), pour le nombre de lésions ($k=0,92$; [IC] à 95%, 0,86-0,97), pour la visibilité des lésions récentes en FLAIR ($k=0,92$; [IC] à 95%, 0,84-1), la détection des flux lents en FLAIR ($k=0,92$; [IC] à 95%, 0,86-0,99), la détection des remaniements hémorragiques en T2* ($k=0,85$; [IC] à 95%, 0,56-1) ainsi que pour la détection d'un diagnostic différentiel ($k=0,92$; [IC] à 95%, 0,81-1).

La concordance était forte pour la localisation de l'AVC en DWI ($k=0,78$; [IC] à 95%, 0,67-0,89) et pour la détection du thrombus en T2* ($k=0,79$; intervalle de confiance [IC] à 95%, 0,67-0,91).

b. Protocole UR

Les valeurs de kappa de Cohen ont montré une concordance presque parfaite pour la détection de l'AVC aigu en DWI ($k=0,94$; intervalle de confiance [IC] à 95%, 0,89-0,99), en ADC ($k=0,99$; [IC] à 95%, 0,97-1), le nombre de lésions ($k=0,93$; [IC] à 95%, 0,89-0,98), la localisation de l'AVC en DWI ($k=0,82$; [IC] à 95%, 0,71-0,92), la visibilité des lésions récentes en FLAIR ($k=0,87$; [IC] à 95%, 0,77-0,97), la détection des flux

lents en FLAIR ($k=0,91$; [IC] à 95%, 0,83-0,98) et la détection d'un diagnostic différentiel ($k=0,87$; [IC] à 95%, 0,73-1).

La concordance était forte pour la détection des remaniements hémorragiques en T2* ($k=0,66$; [IC] à 95%, 0,04-1) et pour la détection du thrombus en T2* ($k=0,71$; intervalle de confiance [IC] à 95%, 0,52-0,9).

Tableau 5. Concordance inter-observateur en protocole standard et UR. Kappa, Coefficient Kappa de Cohen mesurant la concordance entre le sénior et le junior, intervalle de confiance à 95%. N dis, nombre de discordances/effectif total.

| Paramètre | UR | | Standard | |
|---------------------------------------|--------------------|-------|--------------------|--------|
| | Kappa | N dis | Kappa | N dis |
| Visibilité lésions DWI | 0.94 [0.89 ; 0.99] | 5/173 | 0.97 [0.93 ; 1] | 3/173 |
| Visibilité lésions ADC | 0.99 [0.97 ; 1] | 1/173 | 0.98 [0.94 ; 1] | 2/172 |
| Si DWI+, territoire vasculaire | 0.82 [0.71 ; 0.92] | 10/81 | 0.78 [0.67 ; 0.89] | 12/80 |
| Nombre de lésions | 0.93 [0.89 ; 0.98] | 7/173 | 0.92 [0.86 ; 0.97] | 9/173 |
| Visibilité lésions récentes en FLAIR | 0.87 [0.77 ; 0.97] | 6/81 | 0.92 [0.84 ; 1] | 4/79 |
| Flux lents en FLAIR | 0.91 [0.83 ; 0.98] | 6/171 | 0.92 [0.86 ; 0.99] | 5/172 |
| Remaniements hémorragiques en T2*/SWI | 0.66 [0.04 ; 1] | 1/80 | 0.85 [0.56 ; 1] | 1/77 |
| Thrombus en T2*/SWI | 0.71 [0.52 ; 0.9] | 8/168 | 0.79 [0.67 ; 0.91] | 11/171 |
| Si DWI -, diagnostic différentiel | 0.92 [0.81 ; 1] | 2/53 | 0.87 [0.73 ; 1] | 3/58 |

3. Analyse qualitative

L'analyse qualitative comparant les protocoles UR et de référence a été réalisée à partir des résultats d'un seul lecteur (junior).

Les résultats sont présentés dans le tableau 6.

a. DWI/ADC

La détection d'un AVC récent en UR-DWI par rapport au protocole de référence (réf-DWI) a montré une concordance presque parfaite ($k=0,95$; [IC] 95 %, 0,91-1). Un AVC récent a été trouvé chez 77 des 173 patients (44,5%) en séquence réf-DWI et chez 75 patients en séquence UR-DWI. Parmi eux, 3 AVC récents ont été détecté en réf-DWI et non en UR-DWI, alors qu'une lésion a été détectée en UR-DWI mais pas en réf-DWI (Figure 2), réalisant un total de 4 cas de discordance. En comparaison, le sénior a retrouvé 2 de cas de discordance.

La concordance était également presque parfaite pour la visibilité des lésions sur les cartes ADC ($k=0,96$; [IC] à 95 %, 0,93-1). Les faibles cas de discordance portaient sur un AVC récent détecté en réf-DWI et non en UR-DWI, contre deux lésions détectées en UR-DWI et non en réf-DWI, soit 3 cas de discordances. Un seul cas discordant a été rapporté chez le sénior.

La concordance était presque parfaite sur la localisation anatomique vasculaire de l'AVC ($k=0,87$; [IC] à 95 %, 0,78-0,96), avec 7 cas de discordance au total entre les deux protocoles. Deux cas ont été côtés en multi-territorial en UR-DWI mais en territoire unique en réf-DWI (un dans le territoire de l'artère cérébrale moyenne gauche et un cérébelleux gauche), trois cas ont été côtés en multi-territorial en réf-DWI mais en territoire unique en UR-DWI (un dans le territoire de l'artère cérébrale moyenne

droite et deux dans le territoire de l'artère cérébrale moyenne gauche) et deux cas ont été considérés comme des territoires différents (Figure 3). En comparaison, le sénior a retrouvé un seul cas de discordance.

Enfin, la concordance était presque parfaite sur le nombre de lésions ($k=0,89$; [IC] à 95 %, 0,83-0,95), avec 12 cas de discordance au total. La séquence réf-DWI a détecté plus de lésions que la séquence UR-DWI dans 7 cas, alors que cette dernière a identifié un nombre plus élevé d'AVC récents dans 5 cas. En comparaison, le sénior a retrouvé 6 cas de discordance.

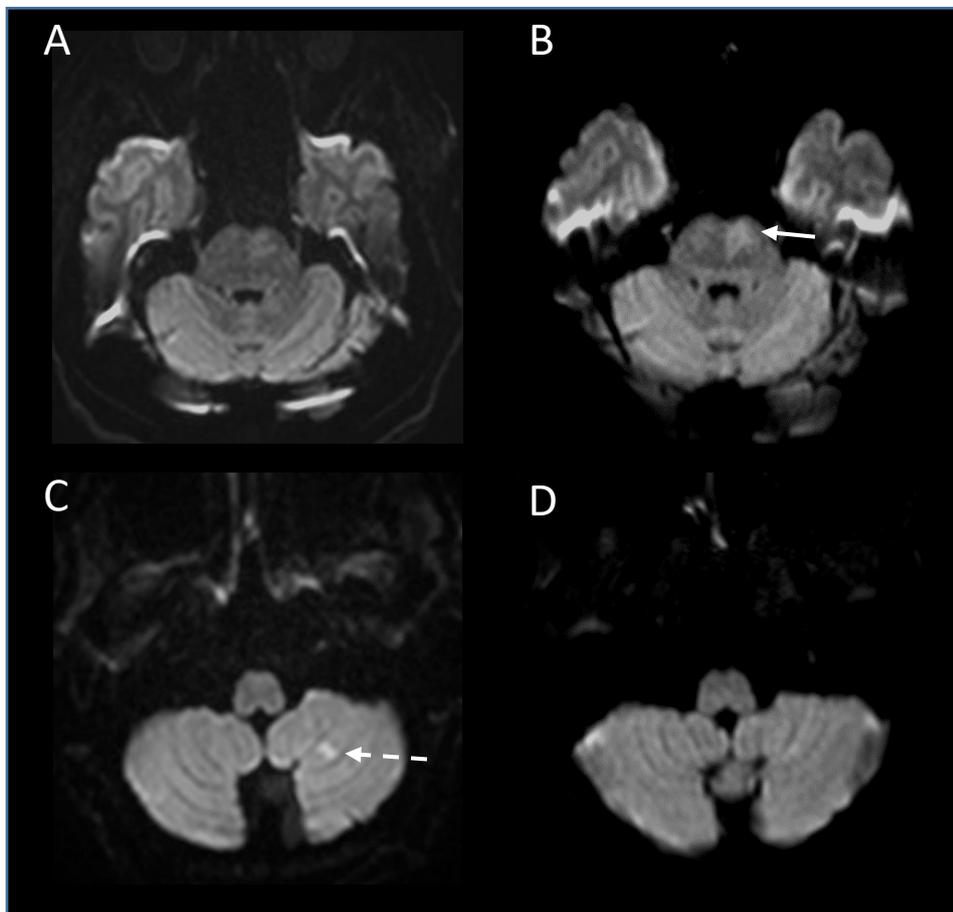


Figure 2. Deux cas de divergences entre réf-DWI (A et C) et UR-DWI (B et D). Sur la rangée du haut, un AVC pontique gauche a été détecté en UR-DWI (flèche blanche) alors qu'il n'a pas été décrit avec le réf-DWI. En revanche, sur la rangée du bas, un AVC cérébelleux gauche a été détecté en réf-DWI (flèche en pointillé) mais non décrit en UR-DWI.

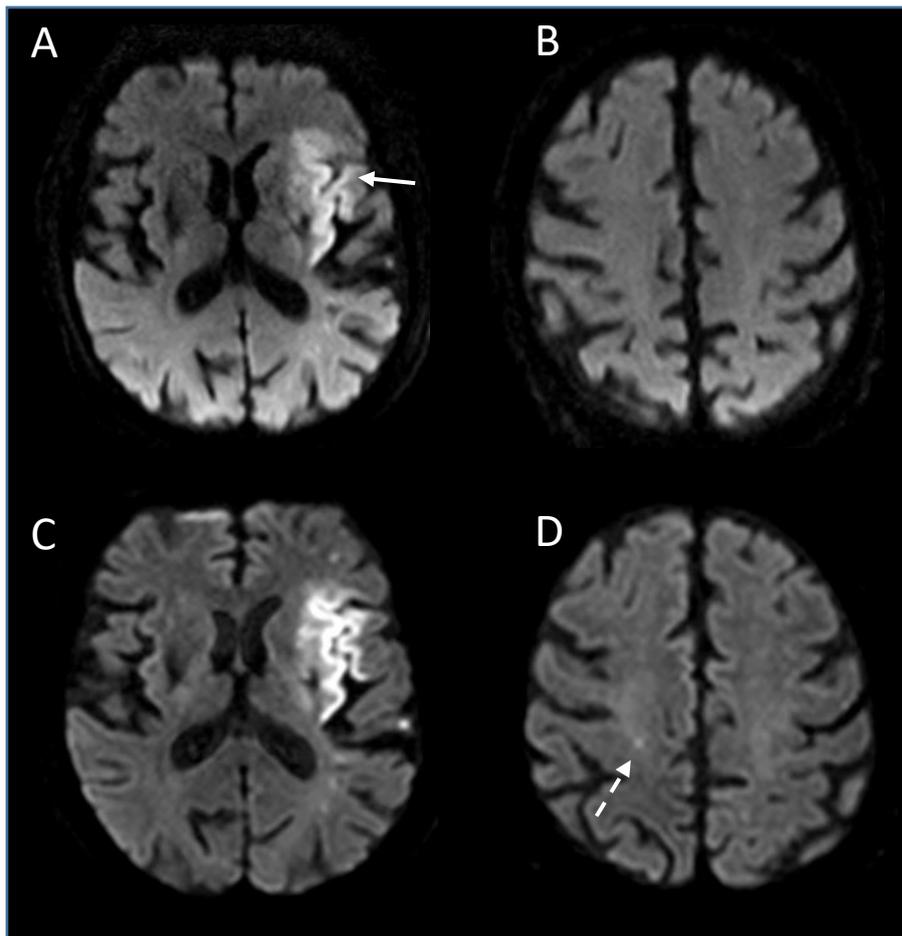


Figure 3. Un cas de divergence entre UR-DWI (A et B) et réf-DWI (C et D). Sur la rangée du haut, le UR-DWI a montré un seul et gros AVC dans le territoire de l'artère cérébrale moyenne gauche. Le réf-DWI a identifié la même lésion mais a également détecté une lésion focale supplémentaire, dans l'hémisphère controlatéral (flèche pointillée).

b. FLAIR

Parmi les 75 AVC récents concordants en réf-DWI et UR-DWI, 36 lésions étaient déjà visibles avec le FLAIR de référence (réf-FLAIR) et 32 avec le UR-FLAIR. La concordance était forte ($k=0,77$; [IC] à 95 %, 0,64-0,9) avec 10 cas de discordance au total. Dans 6 cas, une lésion a été détectée en réf-FLAIR mais pas en UR-FLAIR, l'inverse s'est produit dans 2 cas. Dans un cas, l'AVC a été jugé comme présentant des lésions d'âges différents en UR-FLAIR mais pas en réf-FLAIR, l'inverse s'est

produit également dans un cas. En comparaison, le sénior a retrouvé 3 cas de discordance.

La concordance était également forte pour la détection des flux lents ($k=0,75$; [IC] à 95 %, 0,63-0,86). Au total, 44 cas de flux lents ont été détectés en utilisant le réf-FLAIR et 40 cas en utilisant le UR-FLAIR, pour 16 cas de discordances. 10 cas de flux lents ont été détectés par le réf-FLAIR mais pas par le UR-FLAIR, alors que l'inverse s'est produit dans 6 cas. En comparaison, le sénior a retrouvé 7 cas de discordance.

c. T2*/SWI

La concordance était forte en UR-T2* par rapport au SWI de référence (réf-SWI) pour la détection de remaniements hémorragiques ($k=0,66$; IC à 95 %, 0,04-1). Un cas a été détecté par le réf-SWI et non par le UR-T2*, aucun cas n'a été détecté uniquement avec le UR-T2*. En comparaison, le sénior a retrouvé 3 cas de discordance (Deux cas ont été détectés en réf-SWI et non en UR-T2* alors que l'inverse s'est produit une fois).

La concordance était en revanche modérée pour la détection de thrombus ($k=0,44$; IC à 95 %, 0,25-0,64). Sur 30 cas de thrombus détectés au total, un thrombus a été détecté uniquement avec le réf-SWI et non avec le UR-T2* dans 18 cas, alors que l'inverse s'est produit 2 fois, soit 20 cas de discordance. En comparaison, le sénior a retrouvé 16 cas de discordance.

d. Diagnostic différentiel

Un diagnostic différentiel a été retrouvé dans 14 cas, avec une concordance presque parfaite entre les deux protocoles ($k=0,94$; [IC] à 95%, 0,83-1). Ils comprenaient 9 cas d'hématomes lobaires, un cas de cavernome, un cas de kyste épidermoïde, un cas de méningiome, un cas de métastases et un cas d'état de mal épileptique. Un seul cas de discordance est survenu pour un cas d'état de mal épileptique détecté avec le

protocole UR mais pas avec le protocole standard. Aucun cas de discordance n'a été retrouvé chez le sénior. Quelques exemples sont illustrés en figure 4.

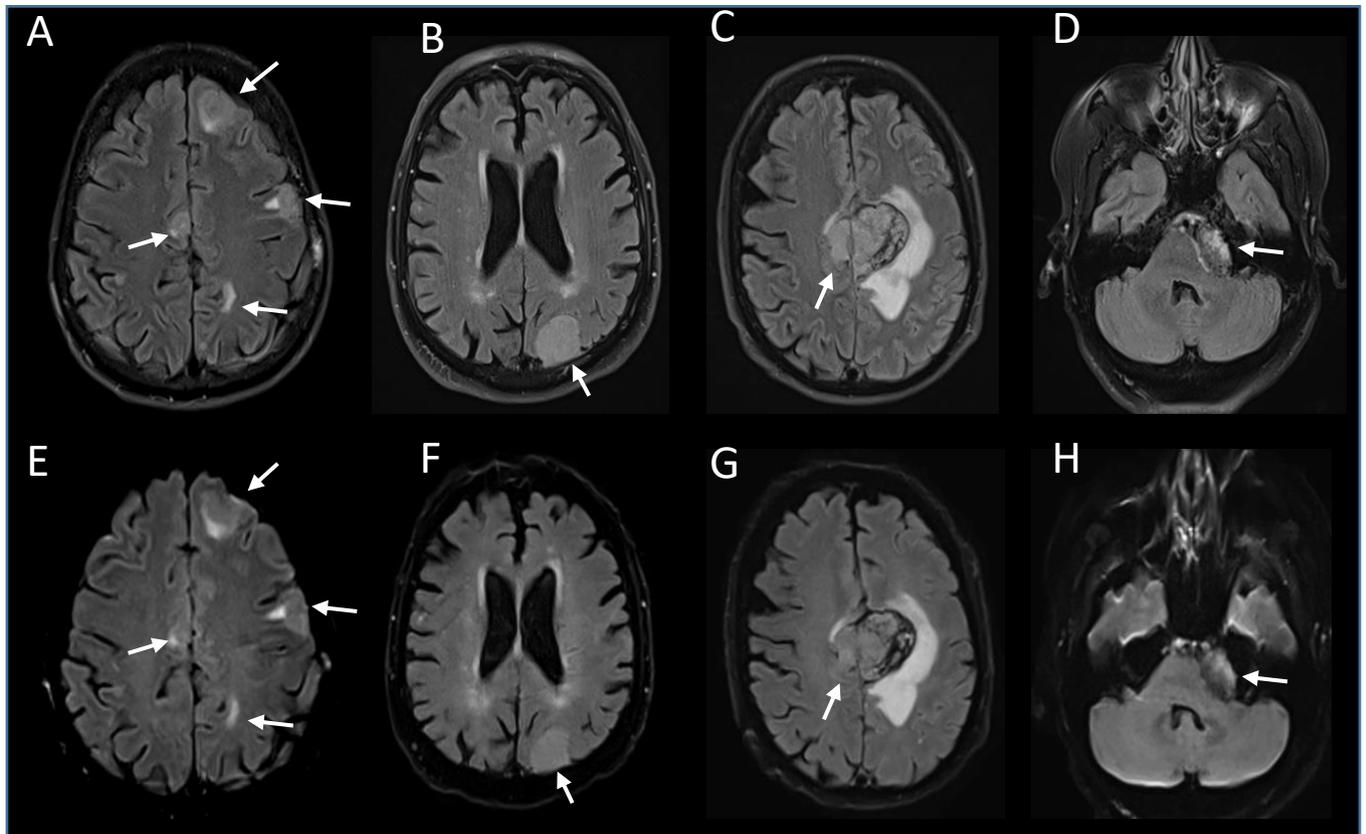


Figure 4. Diagnostics différentiels détectés en réf-FLAIR (rangée du haut) et UR-FLAIR (rangée du bas). A et E : métastases cérébrales multiples. B et F : méningiome occipital. C et G : tumeur hémorragique. D et H : kyste épidermoïde.

Tableau 6. Concordance intra-observateur entre le protocole standard et le protocole UR. Kappa, Coefficient Kappa de Cohen mesurant la concordance entre le protocole standard et le protocole UR chez le junior, intervalle de confiance à 95%. N dis, nombre de discordances/effectif total.

| Paramètre | Kappa | N dis |
|---------------------------------------|--------------------|--------------|
| Visibilité lésions DWI | 0.95 [0.91 ; 1] | 4/173 |
| Visibilité lésions ADC | 0.96 [0.93 ; 1] | 3/172 |
| Si DWI+, territoire vasculaire | 0.87 [0.78 ; 0.96] | 7/80 |
| Nombre de lésions | 0.89 [0.83 ; 0.95] | 12/173 |
| Visibilité lésions récentes en FLAIR | 0.77 [0.64 ; 0.9] | 10/75 |
| Flux lents en FLAIR | 0.75 [0.63 ; 0.86] | 16/170 |
| Remaniements hémorragiques en T2*/SWI | 0.66 [0.04 ; 1] | 1/73 |
| Thrombus en T2*/SWI | 0.44 [0.25 ; 0.64] | 20/167 |
| Si DWI -, diagnostic différentiel | 0.94 [0.83 ; 1] | 1/27 |

DISCUSSION

Les résultats de notre étude ont montré les excellentes performances diagnostiques et la reproductibilité du protocole UR en IRM dans l'évaluation de l'AVC ischémique en phase aiguë pour un temps d'acquisition court, inférieur à 2 minutes.

Ces résultats sont en accord avec les études antérieures qui ont mis en évidence la pertinence des séquences IRM UR dans la détection d'AVC, notamment basées sur EPIMix. Ce dernier a démontré de bons résultats dans la détection des AVC, non inférieurs aux protocoles de référence ²⁶⁻²⁸.

Cependant, notre protocole UR diffère du protocole EPIMix. Alors que ce dernier est une approche "tout ou rien" avec des paramètres fixes (orientation, couverture des tranches, etc.), notre protocole permet à l'opérateur de :

- Choisir librement les paramètres d'orientation et d'acquisition pour chacun des contrastes.
- Répéter l'acquisition pour n'importe quelle séquence indépendamment.
- Choisir les séquences indispensables et ne pas en réaliser certaines si elles ne sont pas nécessaires au diagnostic.
- Combiner des séquences UR avec des séquences conventionnelles, si besoin.

En utilisant des acquisitions multi-shots segmentées (N=2 pour T2-FLAIR, N=4 pour T2/T2*), les séquences UR produisent à la fois une bande passante de pixels plus élevée le long de la direction de codage de phase, entraînant une réduction des distorsions induites par la susceptibilité, et des trains d'échos plus courts, conduisant à des images plus nettes (élargissement réduit de la fonction d'étalement des points

lié à T2*). Ensuite, en utilisant une cartographie rapide des sensibilités des bobines pour chaque acquisition, le protocole UR bénéficie d'une meilleure cohérence entre les données de référence et les données d'imagerie (du fait d'un laps de temps très court entre les acquisitions correspondantes), et d'une sensibilité réduite aux mouvements du sujet. Enfin, en utilisant une reconstruction améliorée par l'IA, le RSB devient comparable aux acquisitions conventionnelles ³⁰.

De plus, notre étude s'est non seulement concentrée sur la détection des AVC en phase aiguë, mais a également étudié plusieurs autres anomalies morphologiques directement associées à l'AVC, notamment en séquences FLAIR et T2*, afin de valider un examen complet entièrement informatif.

La séquence UR-FLAIR a été utilisée pour juger à la fois de la visibilité (et donc de la chronologie) de la lésion d'AVC aigu, et également de la présence de flux lents. L'analyse de la visibilité lésionnelle en UR-FLAIR est un point clé. En effet, contrairement aux études récentes précédemment citées ²⁶⁻²⁹, notre étude s'est concentrée sur les AVC en phase aiguë éligibles à la re-canalisation, incluant les patients dans la fenêtre de 4h30 (n = 142) et les AVC à horaire de début inconnu (n = 31). Ainsi, pendant cette période précoce, l'AVC peut ne pas encore être visible en FLAIR. La validation de la bonne concordance entre les 2 FLAIR, démontrée par nos résultats, est cruciale pour pouvoir utiliser la séquence UR-FLAIR en toute confiance dans le cadre de l'AVC à horaire de début inconnu, où le mismatch FLAIR-DWI conditionne la prise en charge thérapeutique.

La concordance presque parfaite pour la détection des flux lents est un autre point pertinent. En effet, ces indicateurs de débits artériels lents peuvent être le seul signe d'une occlusion d'un gros vaisseau ou d'une sténose sévère, même avec une DWI négative, en particulier dans les accidents ischémiques transitoires ^{6,7}. Dans ce

contexte, ils peuvent également prédire la survenue ou la récurrence d'AVC ischémique, notamment dans les 30 jours suivant l'événement clinique ⁷⁻⁹. Les flux lents ont également été décrits comme des marqueurs de pénombre pouvant bénéficier d'une revascularisation ^{33,34}.

Nous avons également analysé la détection du thrombus et des remaniements hémorragiques en T2*/SWI, associé à un moindre degré de concordance ($k=0,44$ et $k=0,66$ respectivement). L'analyse statistique de la transformation hémorragique a une faible fiabilité, en raison du faible nombre de cas positifs (un seul cas détecté en réf-SWI et aucun en UR-T2*). Cependant, le réf-SWI a détecté significativement plus de thrombi qu'en UR-T2*. Ces résultats peuvent s'expliquer en partie par les différences techniques entre les deux séquences. Le SWI est une séquence multi-échocs 3D avec une résolution spatiale plus élevée et une meilleure sensibilité à la susceptibilité magnétique que le T2*. En revanche, le temps d'acquisition était très nettement favorable à la séquence UR-T2* (25 secondes) par rapport au réf-SWI (3 minutes et 50 secondes). De plus, notre séquence réf-SWI était basée sur la lecture indépendante de deux temps d'écho différents, le plus court étant associé à un effet TOF intrinsèque. Ainsi, les thrombi artériels hypointenses sont plus facilement détectables au sein d'une artère hyperintense en SWI, en raison de l'effet TOF, qu'en T2*, où les lumières vasculaires sont hypointenses. Même si la sensibilité du UR-T2* était limitée pour la détection des thrombi et des remaniements hémorragiques par rapport au réf-SWI, la spécificité était au contraire très élevée (1 ; IC 95 %, 0,97-1 et 0,99 ; IC 95 %, 0,92 -1, respectivement). Précisons également que le protocole d'IRM dans le cadre d'une alerte thrombolyse inclut systématiquement une séquence 3D-TOF dont le rôle est précisément de détecter l'occlusion artérielle.

Enfin, notre étude a validé une concordance presque parfaite entre les séquences UR et le protocole de référence pour la détection des diagnostics différentiels en cas de DWI négative. Ceci est en accord avec plusieurs études antérieures qui ont montré la grande précision diagnostique des protocoles d'IRM UR pour la détection des pathologies intracrâniennes ^{26,35}. Notre étude confirme et complète ces rapports en combinant à la fois la détection de l'AVC aigu et d'autres diagnostics potentiels.

Notre étude a quelques limites.

Chaque ensemble de données a été analysé par un neuroradiologue expérimenté et un interne de radiologie. Certaines discordances pourraient donc être dues au manque d'expérience du junior, et indiqueraient l'existence d'une courbe d'apprentissage dans l'analyse de l'imagerie de l'AVC en phase aiguë en IRM. Ceci est appuyé par le fait qu'il existait moins de cas de discordance entre les deux protocoles chez le sénior que chez le junior.

La comparaison UR-T2* et réf-SWI comportait un biais, puisque ces séquences sont techniquement différentes. La meilleure performance en SWI était donc attendue dans ce contexte.

De plus, la taille de l'échantillon d'examen avec un diagnostic différentiel était faible, limitant la portée de cette analyse.

CONCLUSION

Notre étude met en évidence l'excellente performance diagnostique de notre protocole d'IRM ultrarapide amélioré par l'intelligence artificielle dans la détection et la caractérisation d'AVC en phase aiguë, ainsi que dans la détection des diagnostics différentiels, en moins de deux minutes.

La détection des remaniements hémorragiques et des thrombi était cependant moins bonne avec le UR-T2* qu'avec le réf-SWI, ce qui était prévisible en raison des différences techniques entre ces deux séquences.

BIBLIOGRAPHIE

1. Collège des Enseignants de Neurologie - Accidents vasculaires cérébraux.
2. Gorelick PB. The global burden of stroke: persistent and disabling. *Lancet Neurol.* 2019;18(5):417-418. doi:10.1016/S1474-4422(19)30030-4
3. Saver JL. Time is brain--quantified. *Stroke.* 2006;37(1):263-266. doi:10.1161/01.STR.0000196957.55928.ab
4. Fiebach JB, Schellinger PD, Jansen O, et al. CT and diffusion-weighted MR imaging in randomized order: diffusion-weighted imaging results in higher accuracy and lower interrater variability in the diagnosis of hyperacute ischemic stroke. *Stroke.* 2002;33(9):2206-2210. doi:10.1161/01.str.0000026864.20339.cb
5. Thomalla G, Cheng B, Ebinger M, et al. DWI-FLAIR mismatch for the identification of patients with acute ischaemic stroke within 4-5 h of symptom onset (PRE-FLAIR): a multicentre observational study. *Lancet Neurol.* 2011;10(11):978-986. doi:10.1016/S1474-4422(11)70192-2
6. Shin DH, Han SK, Lee JH, et al. Proximal hyper-intense vessel sign on initial FLAIR MRI in hyper-acute middle cerebral artery ischemic stroke: a retrospective observational study. *Acta Radiol Stockh Swed 1987.* 2021;62(7):922-931. doi:10.1177/0284185120946718
7. Zeng L, Chen J, Liao H, Wang Q, Xie M, Wu W. Fluid-Attenuated Inversion Recovery Vascular Hyperintensity in Cerebrovascular Disease: A Review for Radiologists and Clinicians. *Front Aging Neurosci.* 2021;13:790626. doi:10.3389/fnagi.2021.790626
8. Ding B, Chen Y, Jiang H, Zhang H, Huang J, Ling HW. Fluid-Attenuated Inversion Recovery Vascular Hyperintensities in Transient Ischemic Attack within the Anterior Circulation. *BioMed Res Int.* 2020;2020:7056056. doi:10.1155/2020/7056056
9. Dong X, Nao J. Fluid-attenuated inversion recovery vascular hyperintensities in anterior circulation acute ischemic stroke: associations with cortical brain infarct volume and 90-day prognosis. *Neurol Sci Off J Ital Neurol Soc Ital Soc Clin Neurophysiol.* 2019;40(8):1675-1682. doi:10.1007/s10072-019-03909-0
10. Haller S, Haacke EM, Thurnher MM, Barkhof F. Susceptibility-weighted Imaging: Technical Essentials and Clinical Neurologic Applications. *Radiology.* 2021;299(1):3-26. doi:10.1148/radiol.2021203071
11. Vanaerde O, Budzik JF, Mackowiak A, et al. Comparison between enhanced susceptibility-weighted angiography and time of flight sequences in the detection of arterial occlusion in acute ischemic stroke. *J Neuroradiol J Neuroradiol.* 2017;44(3):210-216. doi:10.1016/j.neurad.2017.01.125

12. Accident vasculaire cérébral: prise en charge précoce (alerte, phase préhospitalière, phase hospitalière initiale, indications de la thrombolyse) - Recommandation de Bonne Pratique HAS 2009.
13. Powers WJ, Rabinstein AA, Ackerson T, et al. 2018 Guidelines for the Early Management of Patients With Acute Ischemic Stroke: A Guideline for Healthcare Professionals From the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke*. 2018;49(3):e46-e110. doi:10.1161/STR.0000000000000158
14. National Institute of Neurological Disorders and Stroke rt-PA Stroke Study Group. Tissue plasminogen activator for acute ischemic stroke. *N Engl J Med*. 1995;333(24):1581-1587. doi:10.1056/NEJM199512143332401
15. Campbell BCV. Thrombolysis and Thrombectomy for Acute Ischemic Stroke: Strengths and Synergies. *Semin Thromb Hemost*. 2017;43(2):185-190. doi:10.1055/s-0036-1585078
16. Albers GW, Marks MP, Kemp S, et al. Thrombectomy for Stroke at 6 to 16 Hours with Selection by Perfusion Imaging. *N Engl J Med*. 2018;378(8):708-718. doi:10.1056/NEJMoa1713973
17. Nogueira RG, Jadhav AP, Haussen DC, et al. Thrombectomy 6 to 24 Hours after Stroke with a Mismatch between Deficit and Infarct. *N Engl J Med*. 2018;378(1):11-21. doi:10.1056/NEJMoa1706442
18. Bracard S, Ducrocq X, Mas JL, et al. Mechanical thrombectomy after intravenous alteplase versus alteplase alone after stroke (THRACE): a randomised controlled trial. *Lancet Neurol*. 2016;15(11):1138-1147. doi:10.1016/S1474-4422(16)30177-6
19. Albers GW, Lansberg MG, Kemp S, et al. A multicenter randomized controlled trial of endovascular therapy following imaging evaluation for ischemic stroke (DEFUSE 3). *Int J Stroke Off J Int Stroke Soc*. 2017;12(8):896-905. doi:10.1177/1747493017701147
20. Organisation de la prise en charge précoce de l'accident vasculaire cérébral ischémique aigu par thrombectomie mécanique - HAS 2018.
21. Runge VM, Richter JK, Heverhagen JT. Speed in Clinical Magnetic Resonance. *Invest Radiol*. 2017;52(1):1-17. doi:10.1097/RLI.0000000000000330
22. Barth M, Breuer F, Koopmans PJ, Norris DG, Poser BA. Simultaneous multislice (SMS) imaging techniques. *Magn Reson Med*. 2016;75(1):63-81. doi:10.1002/mrm.25897
23. Lustig M, Donoho D, Pauly JM. Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging. *Magn Reson Med*. 2007;58(6):1182-1195. doi:10.1002/mrm.21391
24. Geethanath S, Reddy R, Konar AS, et al. Compressed Sensing MRI: A Review. *Crit Rev Biomed Eng*. 2013;41(3). doi:10.1615/CritRevBiomedEng.2014008058

25. imaios e-MRI - echo planar imaging EPI.
26. Delgado AF, Kits A, Bystam J, et al. Diagnostic performance of a new multicontrast one-minute full brain exam (EPIMix) in neuroradiology: A prospective study. *J Magn Reson Imaging JMRI*. 2019;50(6):1824-1833. doi:10.1002/jmri.26742
27. Skare S, Sprenger T, Norbeck O, et al. A 1-minute full brain MR exam using a multicontrast EPI sequence. *Magn Reson Med*. 2018;79(6):3045-3054. doi:10.1002/mrm.26974
28. Kits A, De Luca F, Kolloch J, et al. One-Minute Multi-contrast Echo Planar Brain MRI in Ischemic Stroke: A Retrospective Observational Study of Diagnostic Performance. *J Magn Reson Imaging*. 2021;54(4):1088-1095. doi:10.1002/jmri.27641
29. af Burén S, Kits A, Lönn L, et al. A 78 Seconds Complete Brain MRI Examination in Ischemic Stroke: A Prospective Cohort Study. *J Magn Reson Imaging*. 2022;56(3):884-892. doi:10.1002/jmri.28107
30. Clifford B, Conklin J, Huang SY, et al. An artificial intelligence-accelerated 2-minute multi-shot echo planar imaging protocol for comprehensive high-quality clinical brain imaging. *Magn Reson Med*. 2022;87(5):2453-2463. doi:10.1002/mrm.29117
31. Bilgic B, Chatnuntawech I, Manhard MK, et al. Highly Accelerated Multishot EPI through Synergistic Machine Learning and Joint Reconstruction. *Magn Reson Med*. 2019;82(4):1343-1358. doi:10.1002/mrm.27813
32. Demir S, Clifford B, Lo WC, et al. Optimization of magnetization transfer contrast for EPI FLAIR brain imaging. *Magn Reson Med*. 2022;87(5):2380-2387. doi:10.1002/mrm.29141
33. Nam KW, Kim CK, Kim TJ, et al. FLAIR vascular hyperintensities predict early ischemic recurrence in TIA. *Neurology*. 2018;90(9):e738-e744. doi:10.1212/WNL.0000000000005034
34. Legrand L, Turc G, Edjlali M, et al. Benefit from revascularization after thrombectomy according to FLAIR vascular hyperintensities-DWI mismatch. *Eur Radiol*. 2019;29(10):5567-5576. doi:10.1007/s00330-019-06094-y
35. Kazmierczak PM, Dührsen M, Forbrig R, et al. Ultrafast Brain Magnetic Resonance Imaging in Acute Neurological Emergencies: Diagnostic Accuracy and Impact on Patient Management. *Invest Radiol*. 2020;55(3):181-189. doi:10.1097/RLI.0000000000000625

AUTEUR : Nom : GNANIH

Prénom : Robin

Date de soutenance : 22/09/2022

Titre de la thèse : Etude de la performance diagnostique d'un protocole IRM ultrarapide dans les accidents vasculaires cérébraux ischémiques en phase aiguë.

Thèse - Médecine - Lille 2022

Cadre de classement : DES de Radiodiagnostic et imagerie médicale

Mots-clés : AVC, msEPI, IRM ultrarapide

Résumé :

Contexte : L'AVC en phase aiguë est une urgence thérapeutique nécessitant à la fois des séquences IRM rapides et informatives. Notre objectif dans cette étude était d'évaluer les performances diagnostiques d'un protocole IRM ultrarapide accéléré par l'IA, en comparaison au protocole standard dans la prise en charge de l'AVC ischémique en phase aiguë.

Matériel et méthodes : Entre janvier et octobre 2021, nous avons successivement inclus des patients adressés en urgence pour suspicion d'AVC ischémique en phase aiguë. Chaque sujet inclus a bénéficié d'un protocole IRM 3T incluant les séquences de référence T2-FLAIR, DWI, SWI (durée : 7 min 54 s), et les séquences ultra-rapides FLAIR, T2* et DWI (durée : 1 min 54 s). Une analyse en aveugle de chaque jeu de données a été réalisée par un neuroradiologue expérimenté et un interne de radiologie. Le coefficient Kappa de Cohen a été calculé pour mesurer la concordance entre les protocoles standard et UR.

Résultats : 173 sujets ont été inclus entre janvier et octobre 2021, dont 80 patients avec un AVC en phase aiguë détecté en réf-DWI. L'analyse statistique a montré une concordance presque parfaite entre les séquences UR-DWI et réf-DWI sur la détection, la localisation et le nombre de lésions ainsi que sur la détection des diagnostics différentiels (coefficients kappa respectivement de 0,95, 0,87, 0,89 et 0,94). La concordance était forte en FLAIR pour la visibilité des lésions récentes et des flux lents (coefficients kappa respectivement de 0,77 et 0,75). La concordance était forte en T2*/SWI pour la détection des remaniements hémorragiques, et modérée pour la détection du thrombus (coefficients kappa respectivement de 0,66 et 0,44).

Conclusion : Les séquences ultrarapides améliorées par l'IA ont permis une détection et une caractérisation efficaces des AVC en phase aiguë et des diagnostics différentiels. La détection du thrombus et des remaniements hémorragiques est moins efficace en UR-T2* qu'en réf-SWI, cela peut s'expliquer par les différences techniques entre les deux séquences.

Composition du Jury :

Président : Monsieur le Professeur Jean-Pierre PRUVO

Assesseurs : Madame le Docteur Marta PASQUINI, Madame le Docteur Juliette DING

Directeur de thèse : Monsieur le Professeur Sébastien VERCLYTTE