

Année 2022/2023

Thèse

Pour le
DOCTORAT EN MEDECINE
Diplôme d'État
par
Valentin LEFEVRE
Né le 6 avril 1995 à Tours (37)

ÉLABORATION D'UN OUVRAGE D'AUTO-APPRENTISSAGE DE L'IMAGERIE DE L'AVC ISCHEMIQUE AIGU

Présentée et soutenue publiquement le **8 septembre 2023** devant un jury composé de :

Président du Jury : Professeur Laurent BRUNEREAU, Radiologie et
Imagerie Médicale, Faculté de Médecine – Tours

Membres du Jury : Professeur Baptiste MOREL, Radiologie pédiatrique, Faculté de
Médecine – Tours
Docteur Marie GAUDRON, *PH*, Neurologie, CHRU – Tours
Docteur Nabil EL GANI, *Assistant spécialiste*, Radiologie et Imagerie
Médicale, CHRU – Tours

Directeur de thèse : Professeur Jean-Philippe COTTIER, Radiologie et Imagerie
Médicale, Faculté de Médecine – Tours

Année 2022/2023

Thèse

Pour le
DOCTORAT EN MEDECINE
Diplôme d'État
par
Valentin LEFEVRE
Né le 6 avril 1995 à Tours (37)

ÉLABORATION D'UN OUVRAGE D'AUTO-APPRENTISSAGE DE L'IMAGERIE DE L'AVC ISCHEMIQUE AIGU

Présentée et soutenue publiquement le **8 septembre 2023** devant un jury composé de :

Président du Jury : Professeur Laurent BRUNEREAU, Radiologie et
Imagerie Médicale, Faculté de Médecine – Tours

Membres du Jury : Professeur Baptiste MOREL, Radiologie pédiatrique, Faculté de
Médecine – Tours
Docteur Marie GAUDRON, *PH*, Neurologie, CHRU – Tours
Docteur Nabil EL GANI, *Assistant spécialiste*, Radiologie et Imagerie
Médicale, CHRU – Tours

Directeur de thèse : Professeur Jean-Philippe COTTIER, Radiologie et Imagerie
Médicale, Faculté de Médecine – Tours

RÉSUMÉ

Ce travail de thèse a consisté en l'élaboration d'un ouvrage correspondant à une méthode d'auto-apprentissage de l'imagerie de l'accident vasculaire ischémique (AVC) aigu, destinée au corps médical intervenant dans sa prise en charge.

Le livre a pour but d'enseigner l'imagerie de l'AVC aux non-radiologues et de réaliser une mise à jour des connaissances des radiologues et neuroradiologues. Une liste de notions relatives à l'imagerie de l'AVC ischémique aigu de l'enfant et de l'adulte a d'abord été élaborée en s'appuyant sur des ouvrages et articles de référence. Toutes ces notions ont ensuite été incluses et développées au sein de 21 dossiers clinico-radiologiques de difficulté croissante comportant chacun un énoncé et des questions de différents types (dossiers progressifs, QCM, QROC etc.).

Au total, plus de 150 figures et diagrammes originaux ont été élaborés. Ils illustrent plus de 200 pages de contenu relatif à la neuroradiologie. L'ouvrage s'appuie sur plus de 200 références bibliographiques et comporte également un glossaire, un index alphabétique, un index thématique et une table des matières. Il contient également un atlas radio-anatomique original complet et des considérations embryologiques.

Mots clés :

AVC; Imagerie; Méthode; Pédagogie; Auto-apprentissage; Neuroradiologie

ABSTRACT

This thesis consists of developing a textbook on acute ischemic stroke imaging. This textbook is designed for self-directed learning and intended for all medical stakeholders in the management of acute ischemic strokes.

The book aims to teach stroke imaging to non-radiologists and update the knowledge of radiologists and neuroradiologists.

First, a list of concepts related to imaging of acute ischemic stroke in children and adults was created based on reference works and articles. Afterwards, all these key notions were further developed and included in 21 clinico-radiological cases of increasing difficulty. Each case comprises a clinical history and various questions (progressive clinical cases, MCQ etc.).

Furthermore, more than 150 original figures and diagrams have been developed, constituting more than 200 pages of neuroradiology-related content. These pages include more than 200 bibliographical references, a glossary, an alphabetical index, a thematic index, and a table of contents. The book also contains a complete original radio-anatomical atlas and embryological considerations.

Keywords:

Stroke; Imaging; Method; Pedagogy; Iconography; Self-learning; Neuroradiology

UNIVERSITE DE TOURS
FACULTE DE MEDECINE DE TOURS

DOYEN

Pr Patrice DIOT

VICE-DOYEN

Pr Henri MARRET

ASSESSEURS

Pr Denis ANGOULVANT, *Pédagogie*

Pr Mathias BUCHLER, *Relations internationales*

Pr Theodora BEJAN-ANGOULVANT, *Moyens – relations avec l'Université*

Pr Clarisse DIBAO-DINA, *Médecine générale*

Pr François MAILLOT, *Formation Médicale Continue*

Pr Patrick VOURC'H, *Recherche*

RESPONSABLE ADMINISTRATIVE

Mme Carole ACCOLAS

DOYENS HONORAIRES

Pr Emile ARON (†) – 1962-1966

Directeur de l'Ecole de Médecine – 1947-1962

Pr Georges DESBUQUOIS (†) – 1966-1972

Pr André GOUAZE (†) – 1972-1994

Pr Jean-Claude ROLLAND – 1994-2004

Pr Dominique PERROTIN – 2004-2014

PROFESSEURS EMERITES

Pr Daniel ALISON

Pr Gilles BODY

Pr Philippe COLOMBAT

Pr Etienne DANQUECHIN-DORVAL

Pr Luc FAVARD

Pr Bernard FOUQUET

Pr Yves GRUEL

Pr Gérard LORETTE

Pr Loïc VAILLANT

PROFESSEURS HONORAIRES

P. ANTHONIOZ – P. ARBEILLE – A. AUDURIER – A. AUTRET – C. BARTHELEMY – J.L. BAULIEU – C. BERGER – JC. BESNARD – P. BEUTTER – C. BONNARD – P. BONNET – P. BOUGNOUX – P. BURDIN – L. CASTELLANI – J. CHANDENIER – A. CHANTEPIE – B. CHARBONNIER – P. CHOUTET – T. CONSTANS – C. COUET – L. DE LA LANDE DE CALAN – P. DUMONT – J.P. FAUCHIER – F. FETISSOF – J. FUSCIARDI – P. GAILLARD – G. GINIES – D. GOGA – A. GOUDEAU – J.L. GUILMOT – O. HAILLOT – N. HUTEN – M. JAN – J.P. LAMAGNERE – F. LAMISSE – Y. LANSON – O. LE FLOCH – Y. LEBRANCHU – E. LECA – P. LECOMTE – AM. LEHR-DRYLEWICZ – E. LEMARIE – G. LEROY – M. MARCHAND – C. MAURAGE – C. MERCIER – J. MOLINE – C. MORAIN – J.P. MUH – J. MURAT – H. NIVET – D. PERROTIN – L. POURCELOT – R. QUENTIN – P. RAYNAUD – D. RICHARD-LENOBLE – A. ROBIER – J.C. ROLLAND – P. ROSSET – D. ROYERE – A. SAINDELLE – E. SALIBA – J.J. SANTINI – D. SAUVAGE – D. SIRINELLI – J. WEILL

PROFESSEURS DES UNIVERSITES - PRATICIENS HOSPITALIERS

ANDRES Christian.....	Biochimie et biologie moléculaire
ANGOULVANT Denis	Cardiologie
APETOH Lionel	Immunologie
AUPART Michel.....	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
BABUTY Dominique	Cardiologie
BACLE Guillaume.....	Chirurgie orthopédique et traumatologique
BAKHOS David.....	Oto-rhino-laryngologie
BALLON Nicolas.....	Psychiatrie ; addictologie
BARBIER François.....	Médecine intensive et réanimation
BARILLOT Isabelle	Cancérologie ; radiothérapie
BARON Christophe	Immunologie
BEJAN-ANGOULVANT Théodora.....	Pharmacologie clinique
BERHOUE Julien.....	Chirurgie orthopédique et traumatologique
BERNARD Anne	Cardiologie
BERNARD Louis	Maladies infectieuses et maladies tropicales
BLANCHARD-LAUMONNIER Emmanuelle	Biologie cellulaire
BLASCO Hélène.....	Biochimie et biologie moléculaire
BONNET-BRILHAULT Frédérique	Physiologie
BOURGUIGNON Thierry	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
BRILHAULT Jean.....	Chirurgie orthopédique et traumatologique
BRUNEREAU Laurent.....	Radiologie et imagerie médicale
BRUYERE Franck.....	Urologie
BUCHLER Matthias.....	Néphrologie
CAILLE Agnès	Biostat., informatique médical et technologies de communication
CALAIS Gilles.....	Cancérologie, radiothérapie
CAMUS Vincent.....	Psychiatrie d'adultes
CORCIA Philippe.....	Neurologie
COTTIER Jean-Philippe	Radiologie et imagerie médicale
DEQUIN Pierre-François.....	Thérapeutique
DESMIDT Thomas.....	Psychiatrie
DESOUBEUX Guillaume.....	Parasitologie et mycologie
DESTRIEUX Christophe	Anatomie
DI GUISTO Caroline	Gynécologie obstétrique
DIOT Patrice.....	Pneumologie
DU BOUEXIC de PINIEUX Gonzague	Anatomie & cytologie pathologiques
DUCLUZEAU Pierre-Henri.....	Endocrinologie, diabétologie, et nutrition
EHRMANN Stephan	Médecine intensive – réanimation
EL HAGE Wissam.....	Psychiatrie adultes
ELKRIEF Laure.....	Hépatologie – gastroentérologie
ESPITALIER Fabien.....	Anesthésiologie et réanimation, médecine d'urgence
FAUCHIER Laurent.....	Cardiologie
FOUGERE Bertrand	Gériatrie
FRANCOIS Patrick.....	Neurochirurgie
FROMONT-HANKARD Gaëlle	Anatomie & cytologie pathologiques
GATAULT Philippe.....	Néphrologie
GAUDY-GRAFFIN Catherine.....	Bactériologie-virologie, hygiène hospitalière
GOUPILLE Philippe	Rhumatologie
GUERIF Fabrice.....	Biologie et médecine du développement et de la reproduction
GUILLON Antoine.....	Médecine intensive – réanimation
GUILLON-GRAMMATICO Leslie.....	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
GUYETANT Serge	Anatomie et cytologie pathologiques
GYAN Emmanuel.....	Hématologie, transfusion
HALIMI Jean-Michel.....	Thérapeutique
HANKARD Régis.....	Pédiatrie
HERAULT Olivier	Hématologie, transfusion
HERBRETEAU Denis	Radiologie et imagerie médicale
HOURIOUX Christophe.....	Biologie cellulaire
IVANES Fabrice	Physiologie
LABARTHE François	Pédiatrie
LAFFON Marc	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale, médecine d'urgence
LARDY Hubert.....	Chirurgie infantile
LARIBI Saïd.....	Médecine d'urgence
LARTIGUE Marie-Frédérique	Bactériologie-virologie
LAURE Boris.....	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie
LECOMTE Thierry.....	Gastroentérologie, hépatologie

LEGRAS Antoine.....	Chirurgie thoracique
LESCANNE Emmanuel.....	Oto-rhino-laryngologie
LEVESQUE Éric.....	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale, médecine d'urgence
LINASSIER Claude	Cancérologie, radiothérapie
MACHET Laurent	Dermato-vénéréologie
MAILLOT François	Médecine interne
MARCHAND-ADAM Sylvain	Pneumologie
MARRET Henri	Gynécologie-obstétrique
MARUANI Annabel	Dermatologie-vénéréologie
MEREGHETTI Laurent	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
MITANCHEZ Delphine	Pédiatrie
MOREL Baptiste	Radiologie pédiatrique
MORINIERE Sylvain.....	Oto-rhino-laryngologie
MOUSSATA Driffa	Gastro-entérologie
MULLEMAN Denis.....	Rhumatologie
ODENT Thierry.....	Chirurgie infantile
OUAISSI Mehdi	Chirurgie digestive
OULDAMER Lobna	Gynécologie-obstétrique
PAINTAUD Gilles	Pharmacologie fondamentale, pharmacologie clinique
PATAT Frédéric.....	Biophysique et médecine nucléaire
PERROTIN Franck.....	Gynécologie-obstétrique
PISELLA Pierre-Jean.....	Ophtalmologie
PLANTIER Laurent	Physiologie
REMERAND Francis	Anesthésiologie et réanimation, médecine d'urgence
ROINGEARD Philippe.....	Biologie cellulaire
RUSCH Emmanuel.....	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
SAINT-MARTIN Pauline.....	Médecine légale et droit de la santé
SALAME Ephrem.....	Chirurgie digestive
SAMIMI Mahtab	Dermatologie-vénéréologie
SANTIAGO-RIBEIRO Maria	Biophysique et médecine nucléaire
SAUTENET-BIGOT Bénédicte.....	Thérapeutique
THOMAS-CASTELNAU Pierre	Pédiatrie
TOUTAIN Annick.....	Génétique
VELUT Stéphane.....	Anatomie
VOURC'H Patrick.....	Biochimie et biologie moléculaire
WATIER Hervé	Immunologie
ZEMMOURA Ilyess	Neurochirurgie

PROFESSEUR DES UNIVERSITES DE MEDECINE GENERALE

DIBAO-DINA Clarisse
LEBEAU Jean-Pierre

PROFESSEURS ASSOCIES

MALLET Donatien.....Soins palliatifs
ROBERT Jean.....Médecine Générale

PROFESSEUR CERTIFIE DU 2ND DEGRE

MC CARTHY Catherine.....Anglais

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES - PRATICIENS HOSPITALIERS

AUDEMARD-VERGER Alexandra

BISSON Arnaud

BRUNAUT Paul

CARVAJAL-ALLEGRIA Guillermo.....

CLEMENTY Nicolas.....

DOMELIER Anne-Sophie

DUFOUR Diane

FOUQUET-BERGEMER Anne-Marie.....

GARGOT Thomas

GOUILLEUX Valérie.....

HOARAU Cyrille	Immunologie
KERVARREC Thibault	Anatomie et cytologie pathologiques
LE GUELLEC Chantal	Pharmacologie fondamentale, pharmacologie clinique
LEDUCQ Sophie	Dermatologie
LEFORT Bruno	Pédiatrie
LEJEUNE Julien	Hématologie, transfusion
LEMAIGNEN Adrien	Maladies infectieuses
MACHET Marie-Christine	Anatomie et cytologie pathologiques
MOUMNEH Thomas	Médecine d'urgence
PARE Arnaud	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie
PIVER Éric	Biochimie et biologie moléculaire
ROUMY Jérôme	Biophysique et médecine nucléaire
STANDLEY-MIQUELESTORENA Elodie	Anatomie et cytologie pathologiques
STEFIC Karl	Bactériologie
TERNANT David	Pharmacologie fondamentale, pharmacologie clinique
VAYNE Caroline	Hématologie, transfusion
VIUILLAUUE-WINTER Marie-Laure	Génétique

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

AGUILLON-HERNANDEZ Nadia	Neurosciences
NICOGLOU Antonine	Philosophie – histoire des sciences et des techniques
PATIENT Romuald	Biologie cellulaire
RENOUX-JACQUET Cécile	Médecine Générale

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES

AUMARECHAL Alain	Médecine Générale
BARBEAU Ludvine	Médecine Générale
CHAMANT Christelle	Médecine Générale
ETTORI-AJASSE Isabelle	Médecine Générale
PAUTRAT Maxime	Médecine Générale
RUIZ Christophe	Médecine Générale
SAMKO Boris	Médecine Générale

CHERCHEURS INSERM - CNRS - INRAE

BECKER Jérôme	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
BOUAKAZ Ayache	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
BOUTIN Hervé	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
BRIARD Benoit	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
CHALON Sylvie	Directrice de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
DE ROCQUIGNY Hugues	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1259
ESCOFFRE Jean-Michel	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
GILLOT Philippe	Chargé de Recherche Inrae – UMR Inrae 1282
GOMOT Marie	Chargée de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
GOUILLEUX Fabrice	Directeur de Recherche CNRS – EA 7501 – ERL CNRS 7001
GUEGUINOUE Maxime	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1069
HEUZE-VOURCH Nathalie	Directrice de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
KORKMAZ Brice	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
LATINUS Marianne	Chargée de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
LAUMONNIER Frédéric	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
LE MERRER Julie	Directrice de Recherche CNRS – UMR Inserm 1253
MAMMANO Fabrizio	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1259
MEUNIER Jean-Christophe	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1259
PAGET Christophe	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
RAOUL William	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1069
SECHER Thomas	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
SI TAHAR Mustapha	Directeur de Recherche Inserm – UMR Inserm 1100
SUREAU Camille	Directrice de Recherche émérite CNRS – UMR Inserm 1259
TANTI Arnaud	Chargé de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253
WARDAK Claire	Chargée de Recherche Inserm – UMR Inserm 1253

CHARGES D'ENSEIGNEMENT

Pour l'Ethique Médicale

BIRMELE Béatrice	Praticien Hospitalier
------------------------	-----------------------

REMERCIEMENTS

À MES MAÎTRES AUX MEMBRES DU JURY

À Monsieur le Professeur Jean-Philippe COTTIER,

De votre indéfectible aménité, votre courage et votre sincère humilité. Ils prouvent que de la plus grande compétence, celle qui s'exerce dans la sérénité et la confiance de son caractère, naît une douceur affable qui en est le plus déroutant témoin.

En particulier, votre détermination à ne pas lâcher une question que vous n'eussiez pas pénétrée à fond et nettement comprise, compliment de l'éloge de Marc-Aurèle à Antonin qui selon moi décrit le plus précisément votre caractère.

Pour vos précieux enseignements neuroradiologiques, toujours en pleine conscience, en garde et en stage.

D'avoir accepté d'encadrer mon travail de thèse et de votre confiance.

Soyez assuré, Monsieur, de mon profond respect.

À Monsieur le Professeur Laurent BRUNEREAU,

De m'avoir accueilli dans votre équipe avec une grande bienveillance, et ce par deux fois.

Pour vos enseignements sur tous les domaines radiologiques, qui m'accompagneront toute ma carrière, votre faculté à connaître tous les domaines de notre métier que vous savez aussi transmettre.

De votre disponibilité qui n'a jamais fait défaut tout au long de mon internat.

Soyez assuré de mon respect et de ma profonde gratitude.

D'avoir accepté de bien vouloir juger ce travail.

À Monsieur le Professeur Baptiste MOREL

De m'avoir accueilli avec bienveillance dans cette magnifique surspécialité qu'est la radiopédiatrie.

De vous être intéressé et d'avoir soutenu mon travail à un moment crucial de sa conception et m'ayant donné le courage de la clôturer.

D'avoir accepté de bien vouloir juger ce travail, et ce très tôt dans sa conception.

À Monsieur le Docteur Nabil EL GANI

Pour ton soutien dès les prémices de mon travail.

Pour ton aide dans le choix et le recueil des dossiers, qui m'a permis de cocher l'ensemble des notions radiologiques préétablies, tâche qui a été pour longtemps décourageante et dont tu m'as fait l'amitié de me délivrer en ce début d'année.

Pour tes enseignements.

D'avoir accepté de bien vouloir juger ce travail.

Sois assuré de ma profonde gratitude.

À Madame le Docteur Marie GAUDRON

De m'avoir accueilli au sein de l'UNV de Tours pendant mon externat, toujours dans une grande bienveillance. C'est un honneur de pouvoir continuer à travailler avec toi.

De m'avoir donné le goût pour cette matière dont je souhaite faire mon métier.

D'avoir accepté de bien vouloir juger ce travail.

REMERCIEMENTS

À MES PROCHES

À mes chers parents, Karine et Philippe

Que j'aime de tout mon cœur et sans quoi rien n'aurait été possible, ces études sont un travail d'équipe et cette réussite est la nôtre.

De m'avoir élevé dans un amour sans borne qui m'a permis de ne jamais faire mourir cette part d'enfance qui m'accompagne. De m'avoir permis d'être aussi musicien. De m'avoir enseigné que la gentillesse et la bienveillance s'exercent sans rien attendre en retour.

À Toi, Anne

Le monde a pris la forme de ton visage,
Ma joie celle de ton sourire,
Mon but celle de notre destin comme tu l'envisages,
Ma vie celle sur mon être, de ton empire.

À ma sœur Laurianne

Nous nous voyons trop rarement mais tu as toujours été là pour moi. Merci aussi de m'avoir accompagné dans ma construction personnelle et culturelle et d'avoir toujours été là. C'est toi qui m'as lu le Petit Prince et je ne l'oublierai jamais. Merci de tes efforts continus pour prouver qu'il n'est pas inéluctable de céder à sa pente naturelle.

À mon frère Jean-Maxime

Pour ta constante bienveillance à mon égard.

À mes neveux Sacha et Raphaël

Dont le courage et l'intelligence devraient inspirer tous les adultes.
Votre enfantine gravité me laisse entrevoir toute la grandeur que vous saurez atteindre.

À mes grands-parents, Colette et Gérard, qui nous ont quittés

D'être tous les jours une source d'inspiration par votre courage, votre abnégation, votre droiture d'âme. Votre volonté de sans cesse s'élever, de ne jamais céder à sa pente naturelle. D'avoir souhaité tout nous transmettre et nous montrer la hauteur qui naît de la force de supporter avec courage les épreuves de la vie. Je regrette que vous ne puissiez être là en personne pour cette fin d'études, mais vous l'avez été et vous le serez encore dans tous les choix de ma vie.

À ma grand-mère Thérèse

Je n'ai pas eu la chance de longtemps te connaître mais assez pour en conserver de beaux souvenirs.

À mes beaux-parents, Sandrine et Philippe, à Jeannine

Pour la bienveillance que vous m'avez témoignée, pour nous avoir toujours accompagnés et soutenus au cours de nos études.

Pour votre courage et votre patience.

À Opus, Berlioz et Sadko

« Aux qualités qu'on exige d'un chien, connaissez-vous beaucoup de maîtres qui soient dignes d'être adoptés ? »

– Pierre-Augustin Caron de Beaumarchais

REMERCIEMENTS

À MES AMIS

À Monsieur Nicolas BOUSSANGE

Pour ta constance dans l'amitié depuis tellement d'années, mon ami de la vraie gauche républicaine sur lequel j'ai toujours pu compter, à nos interminables discussions nocturnes sur la vie et son éventuel sens. Mais son sens supprimé, il reste encore la vie comme disait cet auteur que nous aimons.

À Monsieur Victor CHRZANOWSKI

En qui j'ai toujours placé mon entière confiance, qui m'a tant appris en histoire et en géographie. Je ne t'ai jamais entendu te plaindre, tu as toujours été partant, sans jamais poser de question, pour toutes les aventures intelligentes (et moins intelligentes) que nous avons partagées. De m'avoir aidé à vérifier qu'il y avait toujours un exemplaire du Maître et Marguerite à la Fnac. Na zdrowie!

À Monsieur Paul PAPON

Mon ami et colocataire, à notre amour de l'astrophysique (live-session avec Chris Impey ce soir 21h), à ton inénarrable talent pour la cuisine te valant le grade suprême d'Um-ami.

À Monsieur Clément DALMASSO

De m'avoir fait confiance tout au long de ton parcours. De m'avoir continuellement aidé, soutenu et témoigné ta sincère amitié. De m'avoir fait l'honneur de bien vouloir relire et corriger ce travail. J'admire ton courage et ta persévérance et tu seras un excellent radiologue. *Je n'oublie néanmoins pas que tu m'as snobé au conservatoire.*

À Madame Louise O'BYRNE

Pour ton amitié et ta bienveillance, pour ton courage de supporter Clément, vivement les prochaines vacances tous ensemble.

À Monsieur Guillaume GERMAIN

De tous les Suisses que je connais, tu es celui que je préfère. Pour ton indéfectible amitié dans tous ces grands moments, qu'ils soient passés à l'extrémité d'une AK-15 ou autour d'une grande fondue. Pour l'aide que tu nous as apportée à un moment crucial.

À Monsieur le Docteur Maxime GOUGUET

D'avoir été mon mentor en radiologie, d'avoir cru en moi et de m'avoir aidé à me réaliser, de ta volonté de toujours te dépasser. Pour les plus terribles fous rires interdits en vacation. *Pour l'importance commune que nous attachons à la ponctualité en sénologie.* Sois assuré de ma gratitude.

À Monsieur le Docteur Romain AUGER

De ta grande amitié, d'être l'alter ego du prince Mychkine de Dostoïevski.

À Madame Rozenn MAINGUY

Co-externe, Co-interne et très bientôt je l'espère, co-neuroradiologue. Merci de toute ton aide et ton amitié au cours de ces longues années.

À Monsieur Hugo TARTARIN

Le plus bienveillant tartoudoux qu'il m'ait été donné de rencontrer doublé d'un artiste génial. *Ma cheville gauche te remercie aussi chaleureusement.*

À Monsieur Timothée WERLE

Le plus libre penseur de notre génération, sois assuré de mon amitié et de toute mon estime humaine et professionnelle.

À Madame Marie-Anne AUGER

De m'avoir fait l'honneur de bien vouloir relire ce travail.

Au Docteur Carine CATALA-PETAVY, à Mathias et Paul CATALA

De votre amitié et de tous ces excellents moments passés ensemble.

Aux Lantus : Thomas M., Emeline S., Rozenn M., Lucas R. Whitney MP., Aurélien P., Audrey G., Vincent R.

Les meilleurs co-externes dont on puisse rêver.

Aux Hannetons presque parfaits : Adrien M., Rozenn M., Diane B., Mélissa J., Edouard T., Hugo T., Elisa D., Romain A.

À mes co-internes, certains étant déjà devenus mes seniors (plus pour longtemps) : Victor K., Thomas P., Pierre L., Young K. (Kim-Kayen), Camille M., Julie F., Alexandre S., Quentin B., Baptiste D., Emmanuel S., Tanguy L., David M., Valère B., Carla Z., Doriane T., Olivier C., Camille M.

À Monsieur le Docteur Loïc BOUILLEAU

Pour tes enseignements, ton amitié et ton amour de la grande musique.

À Madame Le Docteur Brigitte CARUANA-GROSHENS

Pour ton amitié et ton soutien depuis le début de cette aventure.

À Madame Tiffany CARTIER et Monsieur Baptiste VAN-MEER

À nous seuls le meilleur conseil syndical.

À mes amis de l'autre côté de l'océan Atlantique : Pierre et Christine P., D. et M. Boisvert, Luc et Lucie B.

À tous ceux qui m'ont soutenu et cru en moi tout au long de mon parcours, à ceux que j'ai pu oublier, à ceux qui m'ont accompagné.

À ceux que je n'ai pas connu mais qui m'ont inspiré et guidé : Antoine de Saint-Exupéry pour voir la beauté dans le visage l'Homme, Marc-Aurèle pour traverser les épreuves et devenir le promontoire sur lequel sans cesse se brisent les vagues, Boulgakov et ses récits d'un jeune Médecin pour se dire que tout était déjà comme cela et que cela aussi passera, Dostoïevski pour la compréhension aiguë de l'âme humaine, Marguerite Yourcenar de m'avoir convaincu que tout ce que les hommes ont dit de mieux a été dit en grec et que rien n'est plus lent que la véritable naissance d'un homme.

REMERCIEMENTS

À MES MAÎTRES ET COLLÈGUES

À l'équipe de radiologie du CHRU Trousseau et en particulier au Docteur Julien PUCHEUX, au Docteur Nicolas CAZENEUVE, au Docteur Loïc METAIRY, au Docteur Marie BESSON, au Docteur Juliette BURASCHI, au Docteur Axel MASSON, au Docteur Béatrice SCOTTO, au Docteur Marion MOREL, au Docteur A. DELHOMMAIS

Pour vos précieux conseils lors de ma phase socle et de votre accueil lors de mon stage d'approfondissement. Pour l'exigence du travail bien fait que vous m'avez transmise.

À l'équipe de radiologie du CHRU Bretonneau, en particulier au Docteur Aurore BLEUZEN, au Docteur Bénédicte ROULOT, au Docteur Anne VILDÉ, au Docteur Antoine BRAULT.

Pour vos enseignements et la confiance que vous avez choisie de m'accorder.

Au service d'échographie-Doppler et particulièrement au Docteur Jérôme ROUMY

Pour tes enseignements et ton amitié.

À l'ensemble du service de radiologie du CH de Blois, au Docteur Anas MAJHTOUB-ALMUGHRABI, au Docteur Raouf BENKAOUHA, au Docteur Yassine MNAJA

De votre accueil chaleureux et de vos enseignements, de votre confraternité familiale.

Remerciements particuliers au Docteur Dominique ISART

Qui m'a tant appris, en sénologie et en gestes interventionnels, qui m'a toujours témoigné la plus grande bienveillance, soyez assurée, Madame, de ma profonde et perpétuelle gratitude.

Remerciements posthumes au Docteur Farouq OUTABACHI qui nous a quittés cette année, et dont la bienveillance et l'optimisme invincible dont il faisait preuve continuera de nous inspirer.

À l'ensemble du service de radiologie du CHR d'Orléans (maintenant CHU), au Docteur Isabelle TAFANI-MELLOUX, au Docteur Véronique ADVENIER, Au Docteur Bertrand NICOLAS-LAURENT, Aux Docteur Khaled GOUIAA, Khalil KNAISSI, Khalid KADRE et François PASQUALIN.

Aux manipulateurs en électroradiologie médicale avec qui j'ai toujours eu grand plaisir à travailler.

À l'équipe encadrante et aux étudiants de l'IFMEM de Tours.

Au Docteur Nathalie LEPAUL

Pour ta confiance et ta bienveillance.

À mes professeurs du lycée Descartes, Monsieur Olivier GOISQUE, Monsieur Eric LANGLOIS, Monsieur Julien BOUTON, Madame Céline BLEUET

De m'avoir conféré toutes les ressources nécessaires à la réussite de ces études, de m'avoir transmis la passion des sciences et de la langue russe.

À toute l'équipe et à mes enseignants du Conservatoire à Rayonnement Régional de Tours, en particulier, madame Chantal BOULAY, Monsieur Olivier NIZIER, Madame Catherine NATALINI, Monsieur Xavier RICHARD.

À mon père Philippe LEFEVRE

Que je remercie ainsi deux fois, et ici pour son enseignement du piano et de m'avoir prouvé que la liberté était de choisir ses contraintes.

SERMENT D'HIPPOCRATE

En présence des enseignants et
enseignantes de cette Faculté,
de mes chers condisciples
et selon la tradition d'Hippocrate,
je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur
et de la probité dans l'exercice de la Médecine.

Je donnerai mes soins gratuits à l'indigent,
et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail.

Admis dans l'intérieur des maisons, mes yeux
ne verront pas ce qui s'y passe, ma langue taira
les secrets qui me seront confiés et mon état ne servira pas à
corrompre les mœurs ni à favoriser le crime.

Respectueux et reconnaissant envers mes Maîtres,
je rendrai à leurs enfants
l'instruction que j'ai reçue de leurs parents.

Que les hommes et les femmes
m'accordent leur estime si je suis fidèle à
mes promesses.
Que je sois couvert d'opprobre et méprisé
de mes confrères et consœurs
si j'y manque.

La thèse complète correspond au livre « **Imagerie de l'accident vasculaire cérébral ischémique aigu, une méthode d'auto-apprentissage** » fourni en fichier au format PDF aux membres du jury.

Le support papier suivant est une présentation de la thèse et donc de cet ouvrage. Il a pour but principal d'exposer les modalités de sa création et son fonctionnement, mais à des fins de lisibilité, il n'a pas vocation à reprendre le contenu détaillé de l'ensemble de ce livre qui sera sujet à des mises à jour régulières, certaines seront donc postérieures à l'impression du présent document.

Table des matières

RÉSUMÉ	3
ABSTRACT	4
REMERCIEMENTS.....	9
INTRODUCTION	17
1. Prise en charge pluridisciplinaire des AVC aigus	17
a. Rôle du radiologue	17
b. Rôle du neurologue.....	18
2. Supports scientifiques et environnement éditorial	18
a. Compétences fondamentales.....	18
b. Compétences avancées	19
c. Supports de formation et environnement éditorial	19
3. Enjeux pédagogiques.....	22
MATERIEL ET METHODES	25
1. Elaboration de la liste des notions.....	25
2. Recherche et sélection des dossiers.....	25
3. Classement des dossiers.....	26
4. Elaboration des questions	26
5. Rédaction de la correction	27
6. Illustrations	27
7. Annexes	28
8. Objectif final	28
RESULTATS	29
1. Le livre	29
2. Dossiers et notions	29
DISCUSSION	30
1. Du choix du support	30
2. De la pertinence des données	30
3. Limites et difficultés.....	30
4. Développements ultérieurs	30
CONCLUSION	32
BIBLIOGRAPHIE.....	33
ANNEXES	37
ANNEXE 1 : Liste des notions.....	38
ANNEXE 2 : Exemples.....	40

INTRODUCTION

1. Prise en charge pluridisciplinaire des AVC aigus

Les accidents vasculaires cérébraux (AVC) correspondent à la survenue brutale d'un déficit neurologique focal. Ils touchent en France 150 000 patients par an et constituent la première cause de handicap moteur acquis de l'adulte. 80% des AVC sont d'origine ischémique et 20 % sont liés à des hémorragies intracrâniennes (1). L'ischémie cérébrale constitue donc une pathologie fréquente et grave pour laquelle il existe des traitements spécifiques de désobstruction vasculaire afin de restaurer un débit sanguin cérébral le plus précocement possible : la thrombolyse intraveineuse (TIV) et la thrombectomie mécanique (TM). La prise en charge des AVC est pluridisciplinaire et s'appuie sur un plateau technique médical et paramédical au sein des Unités Neurovasculaires (UNV) réparties sur le territoire français. Plus de 130 UNV sont actuellement en activité sur le territoire (2).

Le patient victime d'un AVC ischémique aigu fait d'abord l'objet d'une évaluation de l'indication de prise en charge en UNV par le médecin neurologue. Si celle-ci est validée, il est transféré en urgence au sein de ces unités pluridisciplinaires où un bilan clinique et biologique de première intention est réalisé en urgence. L'évaluation du score NIHSS (National Institutes of Health Stroke Scale) permet notamment d'évaluer la gravité clinique de façon simple, rapide et reproductible. Le patient est ensuite accompagné par l'équipe neurologique dans le service de radiologie où l'imagerie réalisée en première intention selon les recommandations françaises est l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM). Un protocole d'acquisition standardisé est alors effectué, éventuellement complété de séquences supplémentaires en fonction des résultats initiaux. En cas d'AVC ischémique constitué et de certains paramètres clinico-radiologiques, le traitement de repermeabilisation est effectué en urgence au décours immédiat de l'imagerie.

a. Rôle du radiologue

Le radiologue est un acteur fondamental de la prise en charge d'un AVC aigu :

D'abord, il distingue l'AVC ischémique du saignement intracrânien aigu, dont la clinique peut être voisine mais les implications thérapeutiques tout à fait différentes. En effet, le traitement thrombolytique est absolument contre-indiqué en cas de saignement intracrânien aigu et la prise en charge relève alors essentiellement du contrôle de la pression artérielle voire de la neurochirurgie dans les cas les plus graves.

Il fait le diagnostic positif d'ischémie cérébrale et le diagnostic de gravité radiologique en fonction de l'étendue des lésions et des complications éventuellement associées. Il peut également, dans une certaine mesure, dater l'ischémie et guider le traitement, particulièrement dans les cas d'« AVC du réveil » où l'histoire clinique ne permet pas cette datation. En effet, il existe des indications précises correspondant aux fenêtres thérapeutiques acceptables d'administration du traitement thrombolytique ou de désobstruction mécanique. En fonction de paramètres qui sont détaillés dans l'ouvrage qui fait l'objet de ce travail, il est alors possible de distinguer les AVC ischémiques hyperaigus (datant classiquement de moins de 4h30) des AVC aigus et subaigus dont les enjeux thérapeutiques sont différents.

Le neuroradiologue interventionnel est l'acteur principal de la désobstruction vasculaire par voie intra-artérielle puisque c'est lui qui détient l'expertise de la thrombectomie mécanique. Il choisit d'abord la technique à employer (aspiration, stent-retriever etc...). En conditions

stériles, il guide la progression du matériel de thrombectomie (introduit par un point d'entrée périphérique) à travers le système artériel, puis extrait le thrombus responsable de l'ischémie avec d'excellents résultats dans la majorité des cas.

b. Rôle du neurologue

Le médecin neurologue est le principal coordinateur de la prise en charge de l'AVC aigu. C'est d'abord lui qui valide l'admission en UNV puis réalise l'examen clinique initial. Il prescrit les différents examens complémentaires nécessaires et il accompagne systématiquement le patient à l'IRM dans le cadre d'une prise en charge en coopération avec l'équipe d'imagerie. Au décours de l'IRM et en fonction des résultats, il affirme ou infirme l'indication à un traitement thrombolytique par voie intraveineuse qu'il administrera le cas échéant. Enfin, il est le coordinateur d'un bilan étiologique pluridisciplinaire s'appuyant notamment sur les compétences de l'équipe paramédicale (réalisation d'un certain nombre de gestes techniques) mais aussi d'autres services, comme la cardiologie ou la médecine physique et réadaptation. Ce bilan permet alors la mise en place d'un traitement préventif de la récurrence ischémique et du traitement étiologique d'une cause reconnue comme probable, telle que l'hypertension artérielle ou la fibrillation atriale.

2. Supports scientifiques et environnement éditorial

Comme nous l'avons vu, la prise en charge pluridisciplinaire de l'AVC aigu requiert une expertise de chaque acteur au cœur du soin. Il existe différents modes d'acquisition de ces compétences fondamentales et avancées.

a. Compétences fondamentales

Ce socle de compétences est commun à toutes les spécialités médicales, et notamment au radiologue et au neurologue. Il correspond à la formation universitaire de premier et second cycles des études médicales où les notions fondamentales concernant l'AVC aigu sont abordées : examen clinique, étiologies, prise en charge à la phase aiguë, prévention, pronostic et suivi (1). Les séquences fondamentales d'imagerie sont présentées, accompagnées d'illustrations-types de dossiers typiques, la plupart du temps sans piège diagnostique difficile. En particulier, la refonte et la réorganisation des connaissances dans le cadre du nouvel EDN en cinquième année (Examen Dématérialisé National) remplaçant l'ECN (Examen Classant National qui était réalisé en sixième année)(3) s'est appuyée sur un classement en différents rangs de compétence (A, B et C).

Le rang A correspond aux connaissances que tout étudiant doit connaître en fin de second cycle. Le rang B regroupe celles qui devront être acquises par l'étudiant en fin de second cycle pour qu'il soit apte dès le premier jour de sa Phase Socle. Certaines notions plus avancées qui relevaient du domaine de la spécialité et qui faisaient parfois l'objet d'une interrogation spécifique dans le cadre de l'ECN ont été supprimées ou classées en rang C, non exigibles à l'examen.

En 2023, les connaissances de rang A exigibles pour l'item 340 « Accidents Vasculaires Cérébraux » en lien avec l'imagerie sont : *connaître la définition et la classification des AVC, connaître les facteurs de risque des AVC, connaître l'urgence diagnostique des AVC, connaître les arguments cliniques diagnostiques en faveur des infarctus cérébraux constitués, accident ischémique transitoire, hémorragies intraparenchymateuses, signes de gravité, connaître les principales étiologies* et d'autres connaissances plus spécifiques en lien avec le traitement et ne correspondant pas à l'objectif du présent travail.

Nous pouvons alors constater qu'au sortir du second cycle, le jeune interne de neurologie ou radiologie doit donc perfectionner sa connaissance de l'AVC, et notamment approfondir la physiopathologie de l'AVC, enrichir sa gamme diagnostique, étiologique et sa sémiologie radiologique spécifique.

b. Compétences avancées

La formation de l'interne de Radiologie dépend dans un premier temps des cours fondamentaux du Collège des Enseignants en Radiologie de France (CERF), d'abord avec des notions fondamentales sur l'AVC aigu abordées au cours de la phase Socle (première année d'internat) dans le cadre du module d'Urgence, puis au cours de la phase d'approfondissement puis de consolidation avec des cours de neuroradiologie spécifiques. Enfin, le Diplôme Inter-Universitaire (DIU) de neuroradiologie complète et enrichit ces connaissances pour l'interne désireux de se spécialiser en neuroradiologie. Mais les compétences s'acquièrent également sur le terrain, lors des stages, qu'il s'agisse de vacations de radiologie générale ou des vacations spécialisées de neuroradiologie spécifiquement. Il s'agit ici d'un apprentissage par l'expérience et le compagnonnage. Notamment, la participation à la permanence des soins au sein d'une UNV et la gestion des alertes thrombolytiques est une expérience de terrain particulièrement formatrice.

Le radiologue doit connaître l'imagerie de l'AVC ischémique typique et atypique, sous ses différents aspects temporels, notamment dans le cadre de la permanence des soins et des patients récusés de l'UNV qui bénéficieront d'une imagerie à la phase aiguë ou subaiguë d'un déficit. Outre la sémiologie radiologique de l'AVC, il doit connaître la sémiologie des diagnostics différentiels d'un déficit de survenue brutale (« Stroke mimics ») et tous les éléments diagnostiques et pronostiques de l'imagerie qui guident les options thérapeutiques. Le Développement Professionnel Continu (DPC), la littérature scientifique et les ouvrages de radiologie lui permettent d'actualiser et d'approfondir ses connaissances.

La formation du neurologue et de l'interne de neurologie relève du domaine des compétences cliniques et thérapeutiques mais également de l'imagerie. L'apprentissage de l'imagerie de l'AVC s'effectue principalement lors d'un stage clinique en UNV et dans les cours de spécialité. Le neurologue doit connaître l'imagerie fondamentale de l'AVC mais également ses diagnostics différentiels, notamment dans le cadre des fréquentes demandes d'avis téléphoniques faisant suite à la réalisation d'une imagerie. Enfin, par ses connaissances cliniques, il est à même de guider et conseiller le radiologue quant à la recherche d'une lésion spécifique, notamment grâce à un examen clinique précis et standardisé qui sous-tend le diagnostic de localisation.

c. Supports de formation et environnement éditorial

Plusieurs types de supports permettent d'acquérir une des compétences avancées relatives à l'AVC aigu :

D'abord, l'expérience de terrain quotidienne et la revue d'un grand nombre de dossiers et d'imageries, qu'elle soit acquise en vacation, au cours des réunions de concertation pluridisciplinaires (RCP) ou des réunions internes aux services de radiologie. Elle présente l'inconvénient de majoritairement dépendre de situations classiques et fréquentes au regard de l'épidémiologie. En effet, les cas les plus rares et atypiques sont moins représentés. En

revanche, l'expérience en « vie réelle » donne sûrement une vision plus exhaustive d'une pathologie donnée en couvrant les situations classiques et difficiles de la pratique quotidienne. Cette expérience doit donc être complétée par d'autres modes d'apprentissage.

Les articles scientifiques, qu'ils relèvent de la recherche fondamentale physiopathologique, d'essais contrôlés randomisés, de méta-analyses ou d'une revue de cas permettent une formation approfondie relative à l'ensemble des informations disponibles au regard de l'état de l'art. Ils ont l'avantage d'être facilement disponibles et accessibles au sein de nos institutions et d'être toujours actualisés.

Leur inconvénient repose principalement sur leur austérité pédagogique, les informations cruciales étant parfois noyées dans de grands paragraphes ou parfois difficilement compréhensibles. La présentation souvent paratactique des résultats participe de cette lecture fastidieuse. Un travail de synthèse est souvent nécessaire pour que ces connaissances soient plus facilement mobilisables. Enfin, chaque article détaille souvent une seule notion sur l'AVC et oblige bien souvent à des recherches nombreuses, fastidieuses, fréquentes et spécifiques dans le cadre du développement professionnel.

Les articles de mise au point ou de synthèse sont particulièrement utiles (articles EMC...), puisque sur un sujet donné, les informations actuelles et récentes sont articulées au sein d'une construction iconographique et pédagogique, où l'information est présentée de sorte à être mémorisable et transmissible.

Ils présentent parfois l'inconvénient, par leur format réduit, de ne pouvoir concerner qu'un sujet ou un thème donné. Il faut toutefois reconnaître que certains articles font preuve d'une grande capacité de synthèse, résumant pour certains l'imagerie de l'AVC aigu en quelques pages. Néanmoins, le niveau de détail consenti est nécessairement plus faible que celui d'un ouvrage consacré et la volonté didactique impose souvent de présenter des cas typiques ne représentant qu'un faible échantillon des situations rencontrées en pratique.

Les ouvrages scientifiques ont l'avantage de pouvoir expliciter un sujet de façon exhaustive, par le texte mais aussi grâce à l'iconographie, particulièrement importante dans le domaine radiologique. Ils ont l'avantage d'être facilement disponibles et mobilisables et par leur nature, à mesure de leur utilisation, d'être connus et reconnus (éléments de mise en page par exemple), facilitant leur mémorisation. Par ailleurs, l'objet-livre est bien souvent un élément plaisant dans le processus d'apprentissage, permettant des annotations faciles, personnelles et fréquentes. Les livres ne semblent en effet pas nuire à la qualité du sommeil contrairement aux écrans (Cf infra) et pourraient même le favoriser (4), mobilisant des capacités attentionnelles adaptées sans risque de pluri-stimulation intempestive (notifications, attention multitâche). Enfin, le livre est systématiquement disponible sans risque d'inaccessibilité (ou très rare), sans mot de passe à retenir ou de connexion à internet nécessaire : il est à cet égard, *mutatis mutandis* plus fiable qu'un support informatique.

Les ouvrages « physiques » ont comme principaux inconvénients d'être d'une part, moins facilement accessibles que les articles (parfois chers, lourds, difficiles à transporter) et d'autre part plus difficiles à mettre à jour. Par exemple, en 2010, les données médicales de recherche doubleraient tous les trois à cinq ans (contre tous les 50 ans en 1950) (5) : cela impose donc une mise à jour régulière et des rééditions fréquentes des livres médicaux (dont ceux traitant de la spécialité radiologique) au risque de devenir obsolètes, inutiles puis encombrants. Ce phénomène est parfaitement illustré par l'exemple des encyclopédies universelles au format papier, très populaires dans les foyers au cours du XX^{ème} siècle qui reposent aujourd'hui sur les étagères des bouquinistes, vendues à des prix dérisoires en raison de la péremption d'une grande partie des informations qui y étaient contenues et du caractère encombrant des ouvrages. Le

projet d'encyclopédie de la Bibliothèque de la Pléiade a par exemple été abandonné après la parution de quelques ouvrages en raison de la célérité du renouvellement des informations et données scientifiques.

Les cours en ligne, les MOOC (Massive Open Online Course), les vidéoconférences et les modalités connexes possèdent l'avantage d'être interactifs, par la réalisation de questions à choix multiples (QCM) par exemple. La qualité des images radiologiques conférée par un écran numérique est la meilleure de l'ensemble des supports d'information, et il est possible de faire défiler les images ou de réaliser des reformatations multiplanaires par exemple : c'est donc une modalité de choix pour s'entraîner en situation quasiment « vie réelle », d'autant plus qu'il est de plus en plus aisé de garder non loin de soi un grand nombre de supports numériques, qu'ils soient sur clef USB, sur les postes de travail du service ou hébergés sur un service de cloud. Leur mise à jour est aisée, réalisable autant de fois que nécessaire. Il s'agit du support interactif par excellence permettant, au sein d'un texte de cours, d'évaluer les connaissances du lecteur et de favoriser de concert les processus cognitifs et conatifs (relatifs à une idée d'effort à fournir).

Ils possèdent l'inconvénient de représenter une énième exposition aux écrans (6), facteur de risque reconnu de troubles musculosquelettiques, d'aggravation de la myopie, d'altération du sommeil (inhibition de la production de mélatonine (7) par les lumières « bleues » de faible longueur d'onde), d'isolement social, d'exacerbation de l'attention multitâche (informations plurielles et volatiles nuisant aux processus attentionnels) et de surdéveloppement d'une attention réactive (défaut d'attention introspective, vulnérabilité accrue aux stimuli environnementaux et négligence des stimuli internes). L'exposition aux écrans est considérable dans nos professions médicales et elle l'est encore plus en radiologie, phénomène amplifié par l'omniprésence des smartphones qui sont aujourd'hui devenu quasiment indispensables au mode de fonctionnement des services. Enfin, ils possèdent l'inconvénient de pouvoir être temporairement ou définitivement indisponibles : panne de serveurs, fin de l'hébergement d'un site, défaut de connexion à internet, mots de passe à retenir etc...

La méditation en pleine conscience (8), de plus en plus promue dans nos pays occidentaux tente par exemple de rééduquer ces processus attentionnels, bien souvent altérés dans ce « mode automatique » nuisant à l'investissement du moment présent. La pratique de la méditation améliore d'ailleurs significativement la qualité de vie.

Il convient en outre de distinguer trois types d'informations scientifiques que nous pouvons ici simplement et arbitrairement définir :

- D'une part, les données « non périssables » qui resteront, a priori, toujours vraies, *comme les signes cliniques de l'AVC aigu, la sémiologie fondamentale ou les différentes étiologies d'ischémie cérébrale.*
- Les données « semi-périssables » qui resteront fondamentalement vraies mais pourront faire l'objet de modifications ou de précisions, notamment dans l'ensemble des classifications (étiologiques surtout), *comme les mécanismes physiopathologiques, la sémiologie radiologique (nouvelles machines, nouvelles modalités potentielles).*
- Enfin, les données « périssables » qui sont soumises à de fortes variations à court terme : thérapeutiques et leurs indications, pathologies immunologiques et émergentes, recommandations de prise en charge...

	Expérience de terrain	Articles scientifiques	Articles de synthèse	Livres papier	Cours en ligne
Facilité d'accès	+++	+	+	++	+++
Portabilité		++	++	+/-	+++
Multiplification des références	-	+++	+++	+	+/-
Mise à jour		Facile	Facile	Difficile	Facile
Cas rares	+/-	+++	+++	+++	+++
Risques liés aux écrans	+/-	+/-	+/-	Non	+++
Risque d'indisponibilité		+/-	+/-	Non	+++

Tableau 1: avantages (vert) et inconvénients (rouge) des différents supports d'information en neuroradiologie.

Nous voyons donc que l'ouvrage papier semble garder des avantages certains : il s'agit d'un objet fiable, durable, ne dépendant pas d'un accès au réseau internet, et susceptible de contenir un grand nombre d'informations que le lecteur peut s'appropriier au fil du temps. Il s'agit également d'un outil « personnalisable » dans la mesure où il peut être très facilement annoté voire complété par le lecteur.

L'élaboration d'un support « parfait » est probablement une aporie pédagogique et la combinaison de ces ressources permet d'allier leurs avantages et de pallier leurs inconvénients.

Plusieurs ouvrages de référence sur l'AVC aigu et sur la neuro-imagerie en général sont disponibles sur le marché en 2023. Les deux ouvrages les plus usités sont :

- Imagerie des Accidents Vasculaires Cérébraux et Médullaires (9) de Jean-Louis Dietemann. Il s'agit d'un ouvrage de référence en langue française, concernant les AVC ischémiques et hémorragiques, riche d'une abondante iconographie. Le texte est développé et rédigé. Il ne contient pas d'entraînement spécifique.
- Neuro-imagerie et Osborn's Brain de Ann G. Osborn (10,11), volumineux ouvrage de référence américain sur l'ensemble de la neuroradiologie, traduit dans de nombreuses langues. Le style y est télégraphique (listes à puces) avec de nombreux encarts de résumés, destinés à l'ancrage mémoriel. Les informations homothétiques sont regroupées. L'AVC ischémique et hémorragique ne constitue qu'une sous-partie de l'ensemble du livre. Il ne contient pas d'entraînement spécifique.

3. Enjeux pédagogiques

Nous avons effectué une revue de la littérature concernant les méthodes et les enjeux de l'apprentissage de la médecine de nos jours à l'aide des mots clefs suivants sur PubMed : pedagogy-radiology-teaching-medicine.

Les articles compulsés soulignent l'importance d'un certain nombre de concepts pédagogiques ayant fait la preuve de leur efficacité ou ayant un intérêt potentiel dans l'apprentissage en médecine et plus particulièrement en radiologie.

Le concept d'apprentissage authentique (« Authentic learning ») correspond à un apprentissage actif et conduit par l'étudiant engagé dans un processus complexe et indépendant où l'esprit critique est particulièrement valorisé ; l'objectif est ici de conserver la flexibilité nécessaire dans l'exercice du métier en « vie réelle » (12). L'étudiant est acteur et non

spectateur de son apprentissage et cette méthode pédagogique s'appuie particulièrement sur l'augmentation graduelle de la difficulté des tâches au fur et à mesure de la progression.

Le concept d'échafaudage (« scaffolding »), correspond au fait de fournir à l'étudiant des outils d'apprentissage variés, gradués, élaborés : exercices, discussions entre pairs, discussion ouverte, écriture d'un journal etc...

Ces deux concepts soulignent l'importance de fournir une expérience aussi proche que possible des situations de vie réelle, et ce de manière graduée et accompagnée. Ce concept d'apprentissage actif améliorerait la compréhension conceptuelle globale ainsi que la mémoire à court et long terme, notamment en s'efforçant d'optimiser les processus attentionnels dont l'intensité a tendance à décroître de concert avec l'assimilation des données après environ 20 minutes de cours (13,14). Ces méthodes favoriseraient également une meilleure intégration des connaissances de haut rang (analyse, application, auto-évaluation) en comparaison à un apprentissage passif.

Nous pouvons citer l'exemple du fameux ouvrage de Dale Dubin : *Lecture accélérée de l'ECG* (15) exploitant le concept d'apprentissage actif en proposant aux lecteurs des exercices fréquents et des exemples de difficulté croissante ainsi que des rappels fréquents des notions les plus importantes.

Neher & al. proposent un modèle pédagogique s'appuyant sur des micro-compétences en cinq étapes, appliquées au domaine de la radiologie par Tan & al.(16,17) au décours d'une première analyse des images d'un dossier clinique donné.

Dans un premier temps, on demande à l'étudiant de s'engager dans un diagnostic en proposant directement une conclusion : il s'agit d'un véritable défi pour le jeune interne puisqu'il s'agit en une phrase de synthétiser l'ensemble des informations fournies par l'examen d'imagerie.

Dans un deuxième temps, l'enseignant demande à l'étudiant de justifier sa conclusion par des preuves extraites de l'imagerie, correspondant aux éléments sémiologiques pertinents qu'il aura relevés. C'est également l'étape où la corrélation avec la clinique est importante.

Dans un troisième temps, l'enseignant a évalué l'étendue des connaissances de son élève et peut donc lui enseigner les règles générales et les points importants en rapport avec ce cas clinique : « take-home messages ».

Les deux dernières étapes sont enseignées de concert : renforcer ce qui a été réussi (positive feedback), et corriger les erreurs : vérification du compte-rendu, remarques orientées sur le travail en cours et non sur l'étudiant en lui-même : *ad-argumentum* (orientés sur l'argumentation, sur le contenu) mais pas *ad-hominem* (pas contre l'Homme en lui-même) (18). Voici un exemple pour illustrer et mieux comprendre cet apprentissage en cinq étapes dans le domaine de la radiologie :

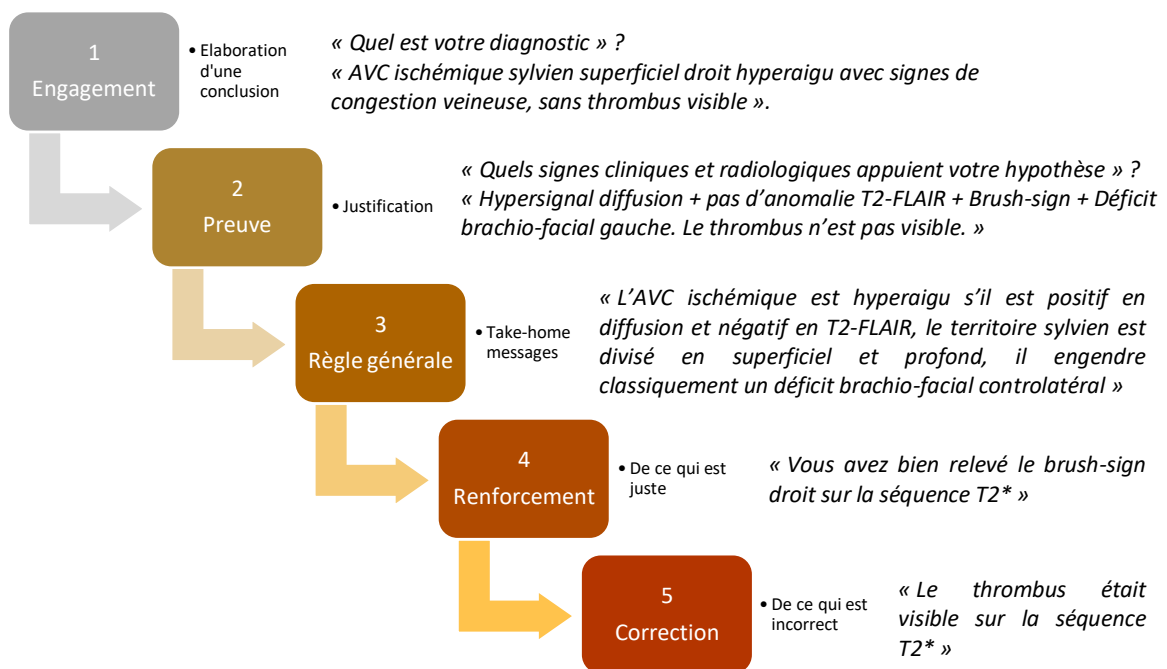


Figure 1: Modèle des "Five Microskills" appliqués à la radiologie, avec l'exemple d'un AVC aigu.

Une autre dimension de l'enseignement de la radiologie est de prendre en compte le caractère propre de la génération concernée. La génération « Y », « millenials » en anglais, globalement née entre 1980 et 2000 apprécierait d'avoir du temps d'apprentissage indépendant et entre pairs (19) et aurait un besoin accru, comparativement aux générations antérieures, d'objectifs d'apprentissage clairs et définis, par exemple par une succession de tâches encadrées exerçant différents groupes de compétences. Il apparaît également que les pauses fréquentes pour résumer les notions importantes « bullet-points » et la participation à des exercices d'application fréquents au sein du cours (cas cliniques par exemple) facilitent la mémorisation (20).

Il n'existe pas, à notre connaissance, d'ouvrage didactique d'apprentissage de l'imagerie de l'AVC aigu par les cas cliniques en langue française.

L'objectif du présent travail était d'élaborer une méthode polyvalente d'auto-apprentissage de l'AVC ischémique aigu :

- À destination des radiologues, neuroradiologues et neurologues qu'ils soient internes ou seniors.
- S'appuyant sur des dossiers cliniques de difficulté croissante, les premiers niveaux devant être assez faciles pour un interne, les niveaux les plus avancés difficiles pour un neuroradiologue. Ceux-ci seraient dotés d'une correction détaillée pédagogique, explicitant les notions fondamentales (physiques et physiopathologiques) et avancées.
- Exhaustif et reflétant l'état de l'art.
- Riche d'illustrations originales.

MATERIEL ET METHODES

L'élaboration d'un manuel d'auto-apprentissage exhaustif suggère une construction à caractère pédagogique. L'étymologie de ce mot fait écho aux méthodes d'apprentissage explicitées en introduction. En effet, le suffixe -agogique signifie l'idée de conduire vers, de mener ou d'amener, et par extension, d'initier. Il provient du grec -agôgia lui-même dérivant de l'adjectif agôgos « qui transporte, qui conduit »*. La pédagogie correspond d'abord à l'instruction des enfants et de la jeunesse, mais par extension, elle désigne l'ensemble des méthodes dont l'objet est d'assurer l'adaptation réciproque d'un contenu de formation et des individus à former (21). Le suffixe -agogie souligne ce processus d'accompagnement de l'apprentissage, comme nous l'avons vu pour la méthode de l'échafaudage progressif des connaissances. Un ouvrage pédagogique, a fortiori dans le contexte de l'apprentissage en autonomie, devrait donc accompagner le lecteur, naviguer de conserve pour le conduire et le guider au gré des différentes notions d'intérêt.

Pour réaliser cet objectif, nous nous sommes appuyés sur une méthode de travail dont nous détaillons les étapes successives ci-après :

1. Elaboration de la liste des notions

La première étape de ce travail a consisté en l'élaboration d'une liste exhaustive de l'ensemble des notions radiologiques fondamentales et avancées relatives à l'AVC ischémique aigu (Annexe 1). A cet effet, nous nous sommes appuyés sur plusieurs ouvrages, sites internet et travaux de synthèse :

- Les livres *Osborn's brain* et *Neuroimagerie* (10,11), constituant une référence dans le domaine de la neuroradiologie.
- *Imagerie de l'AVC ischémique* du Docteur Rémi Duprès, disponible sur le site onclepaul.fr (22), constituant une remarquable synthèse de l'ensemble des connaissances radiologiques concernant l'AVC ischémique qu'il soit aigu, subaigu ou chronique.
- Le livre *Imagerie des Accidents Vasculaires Cérébraux et Médullaires* de Jean-Louis Dietemann (9).
- Le site <https://radiopaedia.org/>, encyclopédie radiologique collaborative de grande qualité, validée par les pairs et par des « expert advisers », constamment actualisée et très détaillée.

2. Recherche et sélection des dossiers

La seconde étape consistait à élaborer un certain nombre de cas cliniques, l'ensemble devant expliquer l'ensemble des notions préétablies.

La banque de données iconographiques principale correspondait à l'enregistrement successif de dossiers patients par le Professeur Cottier entre 2018 et 2022 sur le PACS du CHRU de Tours, sélectionnés pour leur particulier intérêt pédagogique et scientifique. Les dossiers ont été analysés en binôme puis sélectionnés et classés par rang de difficulté. Pour

* Le mot pédagogue a d'abord désigné des esclaves chargés de conduire les enfants (préfix ped-) à l'école.

chacun d'entre eux, l'ensemble des notions d'intérêt a été listée. Une grande partie de ce cahier des charges a été complété à la suite de cette première démarche, mais certaines notions et pathologies plus rares manquaient.

Nous avons donc interrogé les différents praticiens hospitaliers, assistants spécialistes et chefs de clinique de neuroradiologie du CHRU à la recherche des notions restantes. Cette étape a permis d'enrichir notre base de données en pathologies rares (S.M.A.R.T-syndrome par exemple).

Enfin, quelques notions subsidiaires étaient encore manquantes. Nous avons donc effectué une recherche lexicale au sein du thésaurus du logiciel d'exploitation à l'aide de mots clefs, permettant une analyse exhaustive des comptes rendus réalisés depuis 2006.

Nous avons finalement retenu une soixantaine de dossiers, permettant d'illustrer la soixantaine de notions pré-établies.

3. Classement des dossiers

Les dossiers retenus ont ensuite fait l'objet d'une catégorisation selon quatre classes de difficulté croissante, symbolisées par des couleurs. Le premier palier (couleur verte) correspond à des dossiers élémentaires traitant des notions exigibles d'un interne de radiologie ou de neurologie. Le second palier (couleur jaune) correspond à des notions avancées, relevant essentiellement du domaine de la spécialité et acquises par l'interne de radiologie à la fin de son internat. Le troisième palier (couleur rouge) correspond à des notions difficiles du domaine de la spécialité radiologique. Le quatrième et dernier palier (couleur violette) correspond à des notions avancées du domaine de la spécialité neuroradiologique.

L'objectif était ensuite d'introduire ces dossiers un à un et d'extraire successivement les notions clefs permettant de passer au dossier suivant à la suite d'une série de questions. Il s'agissait donc d'un apprentissage actif (par l'entraînement) et graduel.

4. Elaboration des questions

Nous avons choisi différents modèles docimologiques pour interroger le lecteur et évaluer ses connaissances relatives aux différents dossiers :

- Les QCM sont un mode d'interrogation très courant au cours des études médicales. Ils possèdent l'avantage de pouvoir introduire des distracteurs au sein du choix de réponse, permettant d'éprouver les facultés de reconnaissance et de confiance en sa réponse. Leur défaut est d'évaluer principalement des facultés de reconnaissance des propositions vraies sans restitution active de la réponse.
- Les questions à réponse ouverte et courte (QROC) attendent de l'étudiant la production active d'une réponse à la question sans s'aider d'une liste de proposition. Elles ont pour avantage de vérifier l'encodage mémoriel de l'information puisque celle-ci doit être restituée de façon totalement autonome sans faire appel aux facultés de reconnaissance des propositions. Il est plus difficile d'insérer des distracteurs que pour les QCM.
- Les Dossiers Progressifs (DP) permettent une mise en situation proche de la vie réelle, mettant en jeu différentes compétences théoriques et pratiques. Elles permettent également l'élaboration progressive du raisonnement en amenant l'étudiant au concept

visé par un cadre d'apprentissage permettant d'acquérir ou de réviser les compétences nécessaires à sa compréhension.

De ces trois grands modèles, nous avons élaboré six types de dossiers cliniques permettant de varier la docimologie et favoriser l'attention du lecteur afin d'éviter l'écueil d'une lecture monotone et fastidieuse :

- Les dossiers classiques qui comportent environ cinq questions ouvertes, souvent de difficulté croissante, portant sur une série d'images radiologiques fournies en début d'énoncé.
- Les questions à choix multiples (QCM).
- Les dossiers progressifs.
- Les dossiers jumeaux correspondent à l'énoncé simultané de deux cas cliniques dont le message pédagogique est voisin.
- Les dossiers jumeaux progressifs correspondent à la combinaison des deux éléments précédents.
- Les dossiers à mots-clés correspondent à un cas particulier de QROC : la réponse attendue est courte (avec un certain nombre de mots-clés attendus). Ils sont construits de façon à inciter le lecteur à organiser ses réponses par probabilité et à s'engager pleinement dans une proposition, qu'elle soit juste ou erronée. Ici, le seul moyen d'obtenir le point est de répondre exactement comme l'énoncé l'entend : il s'agit d'un mode d'interrogation difficile favorisant la confiance du lecteur en une réponse donnée.

5. Rédaction de la correction

La correction de chaque dossier est pensée pour expliciter de manière exhaustive l'ensemble des concepts fournis en Annexe 1. Il s'agit donc de réponses élaborées et longues, reprenant point par point les éléments de l'énoncé sur lesquels elles s'appuient. L'objectif est également de transmettre ou de rappeler des notions fondamentales qui sont bien souvent absentes des ouvrages connexes au sein de cet environnement éditorial. Par exemple, le principe physique de chacune des séquences d'IRM pertinentes dans l'AVC est rappelé, de même que la physiopathologie sous-tendant l'ischémie ou l'hémorragie cérébrales. Des ouvertures sont fréquemment proposées, sur des concepts embryologiques, sur la recherche dans le domaine etc... Des icônes balisent le texte pour repérer facilement les éléments importants, les pièges diagnostics fréquents ou les données de recherche.

6. Illustrations

Un autre objectif essentiel de l'ouvrage réside dans sa richesse en illustrations originales. De nombreux diagrammes et figures ont été réalisés, pour certaines d'après modèle, sur le logiciel Power Point ®. Les schémas anatomiques s'appuient sur les références du domaine : l'atlas d'anatomie de Frank Netter (23), pour sa clarté, bien qu'il reste assez succinct dans le domaine neurologique : c'est pourquoi nous avons également utilisé la collection des illustrations médicales du même auteur (24), qui illustre le rapport entre clinique, pathologie, imagerie et physiopathologie. Du point de vue du texte explicatif en rapport avec l'anatomie, et pour certaines figures, nous nous sommes également inspirés de la série d'ouvrages, et en particulier le cinquième tome d'« Anatomie Clinique » du Professeur Pierre Kamina pour sa grande qualité et son soin à employer la *Terminologia Anatomica* (25). Enfin, nous nous sommes également appuyés sur certaines figures issues d'articles scientifiques. Ces modèles ont permis de garantir une pertinence anatomique et d'y superposer les éléments relatifs à

l'AVC aigu, notamment en rapport avec la clinique (territoires infarcis, trajet des voies longues, variantes artérielles etc...).

7. Annexes

Nous avons choisi, en annexe, d'élaborer un court atlas de radiologie anatomique d'utilisation simple, pour une référence rapide en cours de vacation. Sa construction a été facilitée par les données du site <https://www.imaios.com/fr> et par le tutoriel interactif « Territoires Vasculaires Cérébraux » de Micheau A. et Hoa D (26). Néanmoins, la vascularisation du tronc cérébral étant sujette à de très importantes variations anatomiques et chaque référence fournissant des données différentes et parfois contradictoires, nous avons réalisé une synthèse de ces deux sources et d'articles scientifiques actuels pour fournir au lecteur une cartographie des principales artères susceptibles de vasculariser les différents éléments constitutifs du tronc cérébral.

Nous avons également développé certaines notions embryologiques en annexe à titre d'ouverture dans les domaines de la biologie fondamentale, de l'évolution et de l'anatomie comparée.

8. Objectif final

Nous espérons que l'ensemble de ces objectifs a concouru à l'élaboration d'un ouvrage exhaustif, pratique, le plus attrayant possible, richement illustré, stimulant la curiosité du lecteur, notamment vis-à-vis de domaines de connaissances souvent absents des ouvrages connexes comme la physique fondamentale, la physiopathologie, l'embryologie et l'anatomie simple et comparée.

RESULTATS

1. Le livre

L'ouvrage, construit selon la méthode explicitée plus haut, comporte 240 pages en date du 15/06/2023. Le texte est illustré par 160 figures et diagrammes ainsi que 12 tableaux.

Les annexes comportent un atlas de radiologie anatomique, ainsi qu'un certain nombre de glossaires et lexiques.

L'index alphabétique est composé des entrées clés les plus susceptibles de faire l'objet d'une recherche par le lecteur. L'index thématique permet de naviguer dans l'ouvrage, particulièrement après sa première lecture. En effet, cet ouvrage a vocation à être lu dans l'ordre pré-établi dans un premier temps puisqu'il introduit les concepts dans un ordre défini et de difficulté croissante. Il est ensuite possible de retrouver l'une ou l'autre notion à l'aide de cet index thématique qui relie les notions clés de l'Annexe 1 avec le dossier correspondant.

Les annexes comprennent également un glossaire sémiologique, explicitant les différents signes radiologiques présentés dans le livre.

L'ouvrage est actuellement disponible en format .pdf. Chaque figure est insérée comme un fichier .png, permettant de ne pas perdre en qualité lors des zooms, pour un meilleur confort de lecture sur ordinateur, téléphone ou tablette.

2. Dossiers et notions

Au total, une soixantaine de dossiers de patients ont été compulsés, parmi lesquels 20 dossiers cliniques de difficulté croissante ont été retenus.

Ces 20 dossiers se répartissent en quatre dossiers de niveau I (élémentaire, vert), quatre dossiers de niveau II (avancé, jaune), quatre dossiers de niveau III (difficile, rouge) et neuf dossiers de niveau IV (avancé, violet). Un dossier supplémentaire constituant une introduction aux AVC hémorragiques a également été inclus en fin d'ouvrage. Il est vite apparu que certaines notions étaient trop riches pour être contenues dans une seule vignette clinique et que d'autres étaient trop restreintes pour faire l'objet d'un dossier consacré. Ainsi, les encarts « Pour aller plus loin », en fin de dossier, explicitent une notion subsidiaire en rapport avec celui-ci, souvent subtile ou difficile. Ils peuvent également apporter des précisions ou des explications supplémentaires sur ce même dossier.

L'ensemble des notions pré-établies en Annexe 1 est contenu et expliqué dans l'ouvrage. L'AVC ischémique pédiatrique a également été inclus dans ce travail.

L'annexe 2 comprend l'exemple d'un dossier complet et explicité.

DISCUSSION

1. Du choix du support

Dans le cadre de ce travail, nous avons fait la gageure que même à l'ère de l'informatique, le format papier (ou sur liseuse .pdf) conservait un intérêt et un certain nombre d'avantages justifiant sa place dans l'arsenal pédagogique, notamment dans le cadre de l'enseignement de la neuroradiologie. Son caractère nomade et transportable, immédiatement disponible et ne dépendant ni d'une connexion internet, ni d'identifiants ou de mots de passe à retenir favorisent son utilisation en routine.

2. De la pertinence des données

Ce travail a fait l'objet d'une relecture d'expert par le Professeur Jean-Philippe Cottier, et par le Professeur Baptiste Morel pour la partie pédiatrique. Sans avoir la prétention d'être exhaustif sur un sujet transdisciplinaire, ce travail a pour vocation d'être un guide, une aide pour chaque médecin désireux d'actualiser ses connaissances, de se former à cette thématique ou de rechercher une donnée en particulier. Une relecture future par des médecins neurologues est prévue pour renforcer la validité du contenu clinique.

3. Limites et difficultés

Ce travail présente plusieurs limites et nous avons dû faire face à un certain nombre de difficultés.

D'abord, il a été élaboré sur un temps assez court (environ un an) : un temps plus long aurait pu permettre le développement de la partie consacrée à l'hémorragie cérébrale. Nous nous sommes appuyés sur de nombreuses sources mais nous avons dû faire des choix, particulièrement lorsque plusieurs références divergeaient concernant un même sujet, notamment concernant les recommandations diagnostiques ou thérapeutiques souvent différentes selon les sociétés d'organes nationales et internationales.

Par ailleurs, certaines notions complexes n'acceptent qu'un certain degré de simplification pédagogique et demeurent difficiles à s'approprier, et n'ont été que brièvement développées dans l'ouvrage. L'apprentissage de ces concepts plus difficiles devra être complété grâce à d'autres supports.

Enfin, le format papier suppose la sélection d'un nombre donné d'images fixes et ne permet pas d'atteindre l'interactivité conférée par un format informatique qui serait probablement plus proche de la situation en « vie réelle » face à une console d'interprétation.

4. Développements ultérieurs

Plusieurs pistes de travail peuvent être imaginées dans le cadre de la poursuite de ce projet. D'abord, une partie complète sur l'hémorragie cérébrale et les AVC médullaires, (construite de façon analogue) permettrait le développement d'un contenu plus exhaustif concernant les accidents vasculaires cérébraux et médullaires.

Ensuite, une validation par les pairs au fur et à mesure de l'utilisation du livre renforcera sa robustesse et sa pertinence scientifique, et fournira certainement des pistes pour l'amélioration de l'ouvrage sur le fond ou sur la forme. Par exemple, de nouveaux dossiers ou images complémentaires pourront enrichir le contenu du livre. Des corrections seront également apportées au fur et à mesure des retours des lecteurs. Enfin, un support informatique

« compagnon » de l'ouvrage papier peut également être envisagé pour élaborer un outil pédagogique multimodal, par exemple avec l'emploi de « QR codes » permettant d'insérer une iconographie dynamique et interactive au fil du texte.

CONCLUSION

Le présent travail a permis l'élaboration d'une méthode d'auto-apprentissage de l'imagerie de l'AVC ischémique de l'adulte et de l'enfant. Il s'agit d'un livre contenant 240 pages en date du 15/06/2023, illustré de 160 figures et diagrammes et s'appuyant sur 220 références bibliographiques. Il comporte 21 dossiers cliniques de difficulté croissante, introduisant de façon échafaudée et progressive les notions essentielles à la compréhension de cette pathologie. La docimologie se veut variée et une certaine emphase pédagogique a été recherchée. Des mises à jour sont prévues, ainsi que de nouveaux chapitres en fonction du retour d'expérience des lecteurs.

BIBLIOGRAPHIE

1. Collège des Enseignants en Neurologie. Collège des Enseignants de Neurologie. 2016 [cité 27 févr 2022]. Accidents vasculaires cérébraux. Disponible sur: <https://www.cen-neurologie.fr/fr/deuxieme-cycle/accidents-vasculaires-cerebraux>
2. sfnv [Internet]. [cité 6 févr 2023]. Unités NeuroVasculaires. Disponible sur: <https://www.societe-francaise-neurovasculaire.fr/unites-neurovasculaire-sfnv>
3. Haute Autorité de Santé [Internet]. [cité 7 févr 2023]. ECN / EDN. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/jcms/p_3076609/fr/ecn/-edn
4. Finucane E, O'Brien A, Treweek S, Newell J, Das K, Chapman S, et al. Does reading a book in bed make a difference to sleep in comparison to not reading a book in bed? The People's Trial-an online, pragmatic, randomised trial. *Trials*. 4 déc 2021;22(1):873.
5. Densen P. Challenges and Opportunities Facing Medical Education. *Trans Am Clin Climatol Assoc*. 2011;122:48-58.
6. Les conséquences d'un usage excessif des écrans – Le bon usage des écrans [Internet]. [cité 10 févr 2023]. Disponible sur: <https://lebonusagedesecrans.fr/essentiel-a-savoir/consequences-usage-excessif/>
7. Tähkämö L, Partonen T, Pesonen AK. Systematic review of light exposure impact on human circadian rhythm. *Chronobiol Int*. févr 2019;36(2):151-70.
8. Roberts KC, Danoff-Burg S. Mindfulness and health behaviors: is paying attention good for you? *J Am Coll Health J ACH*. 2010;59(3):165-73.
9. Dietemann JL. Imagerie des accidents vasculaires cérébraux et médullaires. Sauramps; 2018. 452 p.
10. Osborn AG, Salzman KL, Jhaveri MD. Neuro-imagerie. Elsevier Masson; 2021. 1240 p.
11. FACR AGOM, Hedlund GL, Salzman KL. Osborn's Brain : Imaging, pathology, and anatomy. Philadelphia, PA: Elsevier - Health Sciences Division; 2017. 1300 p.
12. Venne VL, Coleman D. Training the Millennial learner through experiential evolutionary scaffolding: implications for clinical supervision in graduate education programs. *J Genet Couns*. déc 2010;19(6):554-69.
13. Prince M. Does Active Learning Work? A Review of the Research. *J Eng Educ*. 2004;93(3):223-31.
14. Sivarajah RT, Curci NE, Johnson EM, Lam DL, Lee JT, Richardson ML. A Review of Innovative Teaching Methods. *Acad Radiol*. 1 janv 2019;26(1):101-13.
15. Dubin D. Lecture accélérée de l'ECG [Internet]. Maloine; 2007 [cité 11 févr 2023]. 370 p. Disponible sur: <https://www.unitheque.com/lecture-acceleree-ecg/maloine/Livre/2707>
16. Neher JO, Gordon KC, Meyer B, Stevens N. A Five-Step "Microskills" Model Of Clinical Teaching. *J Am Board Fam Pract*. 1 juill 1992;5(4):419-24.

17. Tan CJ, Lim CY. Teaching the millennial radiology resident: applying a five-step 'microskills' pedagogy. *Singapore Med J*. 2018;59(12):619-21.
18. Archer JC. State of the science in health professional education: effective feedback. *Med Educ*. janv 2010;44(1):101-8.
19. Chen PH, Scanlon MH. Teaching Radiology Trainees From the Perspective of a Millennial. *Acad Radiol*. 1 juin 2018;25(6):794-800.
20. Slanetz PJ, Kung J, Eisenberg RL. Teaching radiology in the millennial era. *Acad Radiol*. mars 2013;20(3):387-9.
21. PEDAGOGIE : Définition de PEDAGOGIE [Internet]. [cité 21 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.cnrtl.fr/definition/pedagogie>
22. Duprès R. Imagerie de l'AVC ischémique [Internet]. onclepaul.fr; 2021. Disponible sur: <http://onclepaul.fr/wp-content/uploads/2011/07/AVC-ischemiques-.RD-2021.pdf>
23. Netter F. *Atlas of Human Anatomy*. Elsevier; 2014.
24. Netter F, Jr HRJ, MD TB, FRCP MJAMDs, PhD SPM. *The Netter Collection of Medical Illustrations: Nervous System, Volume 7, Part I*. 2nd edition. Philadelphia, PA: Saunders; 2013. 396 p.
25. Kamina P. *Anatomie clinique*. Vol. 5. Maloine; 2013. 417 p.
26. Micheau A, Hoa D. IMAIOS. 2008 [cité 20 mai 2023]. Cerveau IRM 3D : anatomie normale | e-Anatomy. Disponible sur: <https://www.imaios.com/fr/e-anatomy/cerveau/irm-cerebrale>
27. Nezu T, Koga M, Kimura K, Shiokawa Y, Nakagawara J, Furui E, et al. Pretreatment ASPECTS on DWI predicts 3-month outcome following rt-PA: SAMURAI rt-PA Registry. *Neurology*. 10 août 2010;75(6):555-61.
28. Kerleroux B, Janot K, Hak JF, Kaesmacher J, Hassen WB, Benzakoun J, et al. Mechanical Thrombectomy in Patients with a Large Ischemic Volume at Presentation: Systematic Review and Meta-Analysis. *J Stroke*. sept 2021;23(3):358-66.
29. de Margerie-Mellon C, Turc G, Tisserand M, Naggara O, Calvet D, Legrand L, et al. Can DWI-ASPECTS substitute for lesion volume in acute stroke? *Stroke*. déc 2013;44(12):3565-7.
30. Yoo AJ, Verduzco LA, Schaefer PW, Hirsch JA, Rabinov JD, González RG. MRI-Based Selection for Intra-Arterial Stroke Therapy. *Stroke*. juin 2009;40(6):2046-54.
31. Oppenheim C, Samson Y, Manaï R, Lalam T, Vandamme X, Crozier S, et al. Prediction of malignant middle cerebral artery infarction by diffusion-weighted imaging. *Stroke*. sept 2000;31(9):2175-81.
32. Kerleroux B, Tomasino C, Soriano D, Rodrigues PG, Moura FS, Cottier JP, et al. EASY score (Eloquent, Age and baseline SYmptoms score) for outcome prediction in patients with acute ischemic stroke. *Clin Neurol Neurosurg*. 1 avr 2021;205:106626.

33. Oppenheim C. Diffusion : Applications au cerveau [Internet]. 2012. Disponible sur: http://www.sfrnet.org/data/upload/files/CO%20Diffusion_DES_technique_2013.pdf
34. Kastler B, Vetter D. Comprendre l'IRM. 8^e éd. Elsevier Masson; 2018. 424 p.
35. Kahle KT, Simard JM, Staley KJ, Nahed BV, Jones PS, Sun D. Molecular Mechanisms of Ischemic Cerebral Edema: Role of Electroneutral Ion Transport. *Physiology*. août 2009;24(4):257-65.
36. von Kummer R, Hacke W. Safety and efficacy of intravenous tissue plasminogen activator and heparin in acute middle cerebral artery stroke. *Stroke*. mai 1992;23(5):646-52.
37. Leng X, Fang H, Leung TWH, Mao C, Xu Y, Miao Z, et al. Impact of Collateral Status on Successful Revascularization in Endovascular Treatment: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Cerebrovasc Dis Basel Switz*. 2016;41(1-2):27-34.
38. Lima FO, Furie KL, Silva GS, Lev MH, Camargo ÉCS, Singhal AB, et al. The Pattern of Leptomeningeal Collaterals on CT Angiography Is a Strong Predictor of Long-Term Functional Outcome in Stroke Patients With Large Vessel Intracranial Occlusion. *Stroke*. oct 2010;41(10):2316-22.
39. Bang OY, Saver JL, Kim SJ, Kim GM, Chung CS, Ovbiagele B, et al. Collateral Flow Predicts Response to Endovascular Therapy for Acute Ischemic Stroke. *Stroke*. mars 2011;42(3):693-9.
40. Liebeskind DS. Collateral circulation. *Stroke*. sept 2003;34(9):2279-84.
41. Maier B, Robichon E, Bourcier R, Dargazanli C, Labreuche J, Thion LA, et al. Association of Hypotension During Thrombectomy and Outcomes Differs With the Posterior Communicating Artery Patency. *Stroke*. sept 2021;52(9):2964-7.
42. Kaloss AM, Theus MH. Leptomeningeal anastomoses: Mechanisms of pial collateral remodeling in ischemic stroke. *WIREs Mech Dis*. 2022;14(4):e1553.
43. Souza LCS, Yoo AJ, Chaudhry ZA, Payabvash S, Kemmling A, Schaefer PW, et al. Malignant CTA collateral profile is highly specific for large admission DWI infarct core and poor outcome in acute stroke. *AJNR Am J Neuroradiol*. août 2012;33(7):1331-6.
44. Menon BK, Smith EE, Modi J, Patel SK, Bhatia R, Watson TWJ, et al. Regional leptomeningeal score on CT angiography predicts clinical and imaging outcomes in patients with acute anterior circulation occlusions. *AJNR Am J Neuroradiol*. oct 2011;32(9):1640-5.
45. Nave AH, Kufner A, Bücke P, Siebert E, Kliesch S, Grittner U, et al. Hyperintense Vessels, Collateralization, and Functional Outcome in Patients With Stroke Receiving Endovascular Treatment. *Stroke*. mars 2018;49(3):675-81.
46. Rocha M, Desai S, Son J, Tonetti DA, Jovin T, Jadhav AP. Clinical characteristics of fast and slow progressors of infarct growth in anterior circulation large vessel occlusion stroke. *J Cereb Blood Flow Metab Off J Int Soc Cereb Blood Flow Metab*. 17 juin 2021;271678X211015068.

47. Rocha M, Jovin TG. Fast Versus Slow Progressors of Infarct Growth in Large Vessel Occlusion Stroke: Clinical and Research Implications. *Stroke*. sept 2017;48(9):2621-7.
48. Nael K, Sakai Y, Khatri P, Prestigiacomo CJ, Puig J, Vagal A. Imaging-based Selection for Endovascular Treatment in Stroke. *RadioGraphics*. oct 2019;39(6):1696-713.
49. Ospel JM, Hill MD, Kappelhof M, Demchuk AM, Menon BK, Mayank A, et al. Which Acute Ischemic Stroke Patients Are Fast Progressors?: Results From the ESCAPE Trial Control Arm. *Stroke*. mai 2021;52(5):1847-50.
50. Renú Jornet A, Urra X, Laredo C, Montejo C, Rudilosso S, Llull L, et al. Benefit from mechanical thrombectomy in acute ischemic stroke with fast and slow progression. *J Neurointerventional Surg*. févr 2020;12(2):132-5.
51. Hodel J, Leclerc X, Rodallec M, Gerber S, Blanc R, Outteryck O, et al. Fluid-attenuated inversion recovery vascular hyperintensities are not visible using 3D CUBE FLAIR sequence. *Eur Radiol*. juill 2013;23(7):1963-9.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Liste des notions

	TECHNIQUE
Diffusion	Dossier 1
Faux-négatifs	Dossier 15
Optimisée	Dossier 12
Réversible	Dossier 12 (Pour aller plus loin)
T2-FLAIR	Dossier 1bis
T2*	Dossier 1bis, Introduction à l'AVC hémorragique
TOF	Dossier 3
T1 et T1-Gadolinium	Dossier 7
ARM	Dossier 9
Pseudo-occlusion carotidienne	Dossier 10 (Pour aller plus loin)
Stagnation du Gadolinium	Dossier 15 (Pour aller plus loin)
Scanner	
Intérêts (CI)	Dossier 5 (Pour aller plus loin)
Protocole	Dossier 5
Angioscanner des TSA	Dossier 3
Perfusion	Dossier 8
Imagerie spectrale	Dossier 8 (Pour aller plus loin), Dossier 20
IRM de paroi/plaque (introduction)	Dossier 19 (Pour aller plus loin)
Doppler transcrânien	Dossier 16 (Pour aller plus loin)

FACTEURS DE RISQUE, EPIDEMIOLOGIE, PHYSIOPATHOLOGIE

Épidémiologie	Introduction générale
Facteurs de risque	Introduction générale
Physiopathologie	Introduction générale
Pénombre	Introduction générale, Dossier 1bis, Dossier 8
Collatéralité	Dossier 1bis (Physiopathologie)
Œdème cytotoxique	Dossier 1
Œdème vasogénique	Dossier 17

ETENDUE ET SEVERITE

Score NIHSS	Dossier 1
NASCET	Dossier 3
Complications	
Transformation hémorragique	Dossier 3
AVC sylvien malin	Dossier 5, Dossier 13

SEMIOLOGIE

Sémiologie scanographique	Dossier 5
Mismatch	Introduction générale
Radio-clinique	Dossier 8
FLAIR-diffusion	Introduction générale, Dossier 1
Perfusion-diffusion	Dossier 8
SWI-diffusion	Dossier 1bis
FHV-diffusion	Dossier 1bis
Occlusion en tandem	Dossier 10
Introduction aux AVC subaigus	Dossier 7

	ETIOLOGIE
Classification ASCOD	Dossier 3, Annexe 4
Athérome (Ascod)	Dossier 3
Diaphragme carotidien	Dossier 9 (Pour aller plus loin)
Emboles calciques	Dossier 5, Dossier 16 (Pour aller plus loin)
Maladie des petits vaisseaux (aScod)	Dossier 2
Cardioembolique (asCod)	Dossier 12
Dissection (ascoD)	Dossier 9
Dysplasie fibromusculaire	Dossier 9 (Pour aller plus loin)
Pièges diagnostics	Dossier 9 (Pour aller plus loin)
Autres (ascOd)	
Embolie gazeuse	Dossier 16, Dossier 16 (Pour aller plus loin)
Embolie graisseuse	Dossier 16 (Pour aller plus loin)
CADASIL/CARASIL	Dossier 17
Moya-Moya	Dossier 18
Drépanocytose	Dossier 18 (Pour aller plus loin)
Vascularites	Dossier 19
Stroke-mimics	Dossier 17
Stroke-chameleons	Dossier 17

	ANATOMIE ET VARIANTES
Atlas anatomique	Annexe 1
Variantes anatomiques	Annexe 2, Dossier 7, Dossier 7 (Pour aller plus loin), Dossier 12, Dossier 15
Infarctus jonctionnels	Dossier 6

	THERAPEUTIQUE
Thrombolyse	Introduction générale, Dossier 2 (Pour aller plus loin), Dossier 8
Thrombectomie	Introduction générale, Dossier 8, Dossier 8 (Pour aller plus loin)
Craniectomie	
Sinking-flap syndrome	Dossier 13

	PEDIATRIE
Épidémiologie	Introduction générale, Dossier 19 (Pour aller plus loin)
Moya-Moya	Dossier 18
Drépanocytose	Dossier 18 (Pour aller plus loin)
Vascularites	Dossier 19 (Pour aller plus loin)

ANNEXE 2 : Exemples

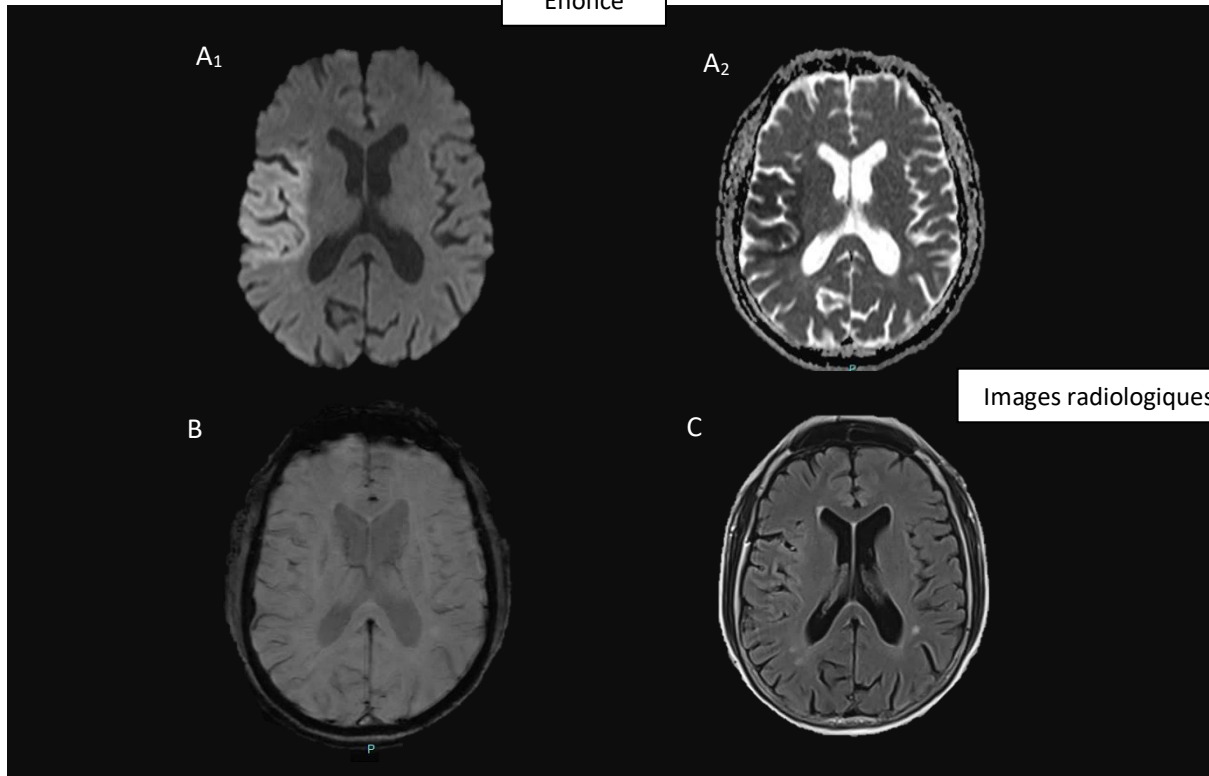
Dossier 1

Dossier classique

Type de dossier

Homme de 70 ans aux antécédents de fibrillation atriale, d'hypertension artérielle et d'œsophagite ayant présenté brutalement une hémiparésie et une paralysie faciale gauches, ainsi qu'une aphasie vers 10h40. Admis au sein de la filière d'alerte thrombolyse, le patient est adressé à l'IRM à 12h30.

Énoncé



Images radiologiques

Question 1 : Quelles séquences ont-elles été réalisées ?

Question 2 : Quelle est la séquence manquante ?

Question 2 : Quel est votre diagnostic ?

Question 3 : Sachant que ce patient ne présente aucune comorbidité et pas d'autre anomalie que celles visualisées, quel traitement pourrait être envisagé d'emblée ?

Question 5 : Comment expliquer l'hypersignal sur la séquence A ?

Questions

Dossier 1 : Réponses

Question 1 :

A : Séquence pondérée en diffusion (DWI) : A₁ : b1000. A₂ : Cartographie ADC

B : T2* (SWI). C : T2-FLAIR.

Correction
détaillée

Question 2 :

La séquence d'angiographie par résonance magnétique (ARM) en temps de vol.

Ces quatre séquences doivent être réalisées pour toute suspicion d'AVC aigu.

Question 2 :

Hypersignal en diffusion systématisé au territoire sylvien superficiel droit, sans stigmate hémorragique, sans hypersignal T2 FLAIR significatif associé (très discret hypersignal) : AVC ischémique aigu sylvien superficiel droit avec un mismatch DWI-FLAIR.

Question 3 :

L'association [DWI + /FLAIR - / absence de CI] permet l'administration d'un agent thrombolytique intraveineux (rt-PA). Nous verrons plus avant la cinétique d'évolution du signal en lien avec ces différentes séquences.

L'étendue des anomalies en diffusion peut être évaluée de façon semi-quantitative par le score ASPECTS :

Le score ASPECTS (Alberta Stroke Program Early CT score):

Il s'agit d'un score simple, décrit d'abord pour le scanner mais également utilisable en IRM (27). Il permet d'évaluer l'étendue d'une ischémie sylvienne en **divisant le territoire en 10 secteurs répartis sur deux coupes de référence** (l'une coupe passant par les noyaux gris centraux, l'autre passant par la courante rayonnante). Chaque secteur compte pour un point que l'on retranche si le territoire est en hypersignal, pour obtenir un score sur 10. Un score de 8-10 correspond ainsi à une ischémie peu étendue, un score 0-5 à un infarctus sylvien très étendu.

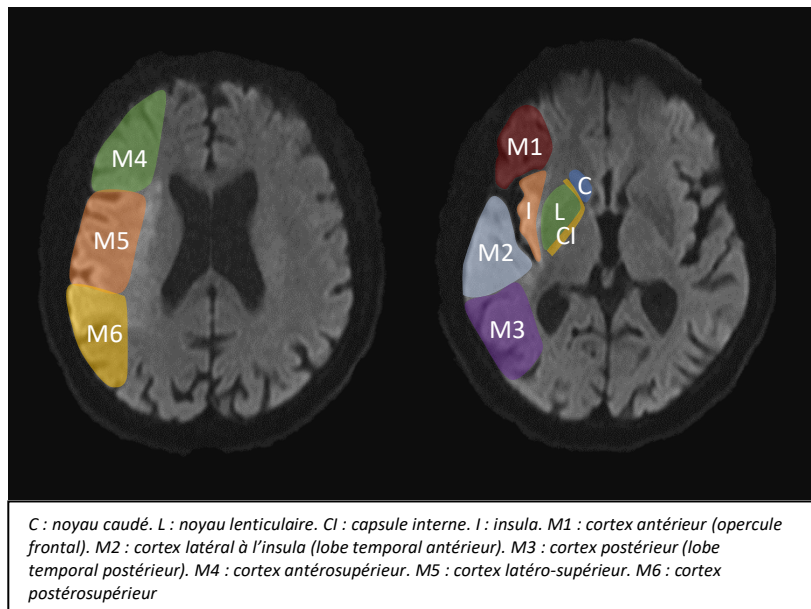


Figure 2: Territoires du score ASPECTS

Dossier 1 : Réponses (suite)

Dans notre cas, le score ASPECTS est à 6. Classiquement, un score < 5 est en défaveur d'un traitement thrombolytique en raison du risque de transformation hémorragique (9). Des études récentes soulignent dans ces cas défavorables l'intérêt de la thrombectomie, même si les résultats sont moins favorables qu'avec les score ASPECTS supérieurs (28).

La séquence de diffusion permet également de calculer le volume de l'ischémie par contourage manuel, semi-automatique ou automatique. D'autre part, un score DWI-ASPECTS < 4 est corrélé à un volume ischémique > 100 mL et un score DWI-ASPECTS ≥ 7 est corrélé à un volume < 70 mL (29).

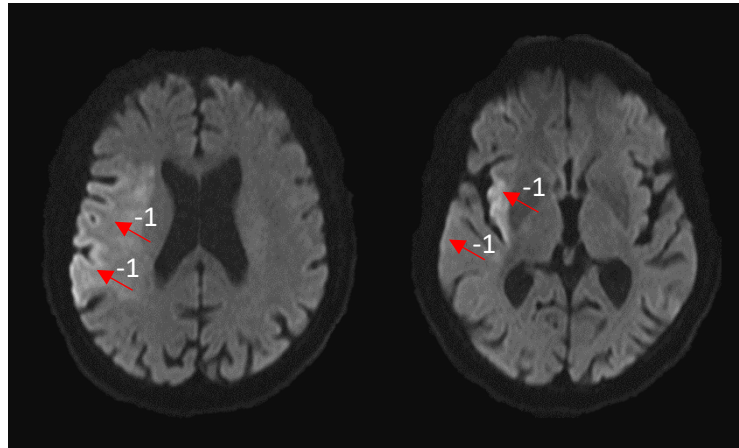


Figure 3: calcul du score ASPECTS chez notre patient où il existe un hypersignal insulaire et des secteurs corticaux M5 ; M6 et M2 (très discret mais visible : le score ASPECTS est donc calculé à $10 - 4 = 6$

L'importance du volume estimé est prédictive d'une évolution défavorable malgré une recanalisation et de transformation hémorragique avec une valeur seuil de 70 – 100 mL dans la littérature (30).

Par ailleurs, un volume > 145 mL est prédictif d'AVC ischémique sylvien malin (31). Il s'agit d'une évolution œdémateuse gravissime d'une vaste ischémie sylvienne, survenant dans 10 % des cas et présentant une mortalité spontanée de 80%. Ces patients sont éligibles à une hémi-craniectomie décompressive (réalisation d'un volet chirurgical permettant la saillie extracrânienne du parenchyme cérébral œdématisé).

Plus récent, le score EASY (Eloquent, Age & baseline SYmptoms) a été proposé comme outil plus fonctionnel et prédictif de la récupération à 3 mois. Il repose sur des critères cliniques et l'évaluation des zones cérébrales « éloquentes », c'est-à-dire les zones à forte expression fonctionnelle, en particulier le bras postérieur de la capsule interne et la couronne rayonnante postéro-supérieure. Ce score de risque qui compte 39 points, incluant l'âge, le score NIHSS à l'admission, et l'atteinte dichotomique (oui/non) des zones cérébrales susmentionnées (32), est toutefois plus difficile à réaliser en urgence.

Dossier 1 : Complément sur la diffusion

Question 5 :

Rappels sur la séquence de diffusion :

La diffusion correspond aux **mouvements des molécules d'eau** (théorie du mouvement brownien d'Albert Einstein, loi de Stokes-Einstein). Sa valeur exerce une influence sur le signal IRM. La séquence IRM de diffusion correspond le plus souvent à une image SE-EPI (spin-echo-echo planar imaging) ultra rapide pondérée en T2 avec une saturation du signal de la graisse. Elle consiste en **l'application de gradients de diffusion** de part et d'autre de l'impulsion de 180 ° de rephasage (33).

Les mouvements protoniques provoqués par l'ajout des gradients sont responsables d'un déphasage supplémentaire par rapport à la séquence pondérée en T2 de départ, source d'une diminution de signal dans l'image dont l'importance varie en fonction de leur mobilité.

- **Les spins des molécules d'eau immobiles** (comme dans la zone ischémique) sont déphasés par le premier gradient et rephasés par le second, il existe peu de chute de signal : ces structures apparaîtront en **hypersignal relatif** sur l'image pondérée en diffusion.
- **Les spins des molécules mobiles** sont peu rephasés et apparaissent en **hyposignal relatif** (comme le LCS).

La séquence de diffusion est définie par le facteur b (s/mm^2) dépendant de l'amplitude du gradient (G), de la durée d'application (τ) et du délai entre deux gradients (T), par la relation* :

$$b = \gamma^2 G^2 \tau^2 (T - \frac{\tau}{3})$$

Plus ce coefficient est élevé, plus l'image est pondérée en diffusion et dépondérée en T2. Le coefficient apparent de diffusion (souvent appelé ADC pour *Apparent Diffusion Coefficient*), exprimé en mm^2/s correspond à la pente de la droite de décroissance de signal entre deux valeurs de b . La valeur de l'ADC est donnée par la relation suivante : $\log \frac{S}{S_0} = -b \cdot \text{ADC}$, où S_0 est le signal à $b=0$ et S le signal à un b déterminé (34).

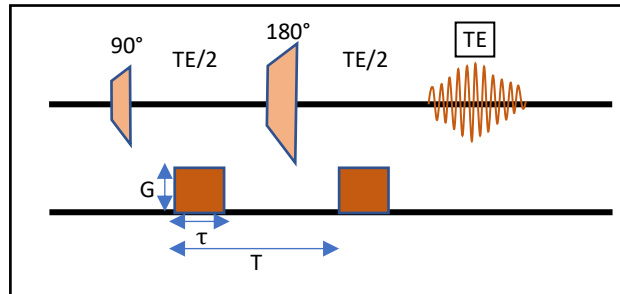


Figure 4: Séquence IRM de diffusion

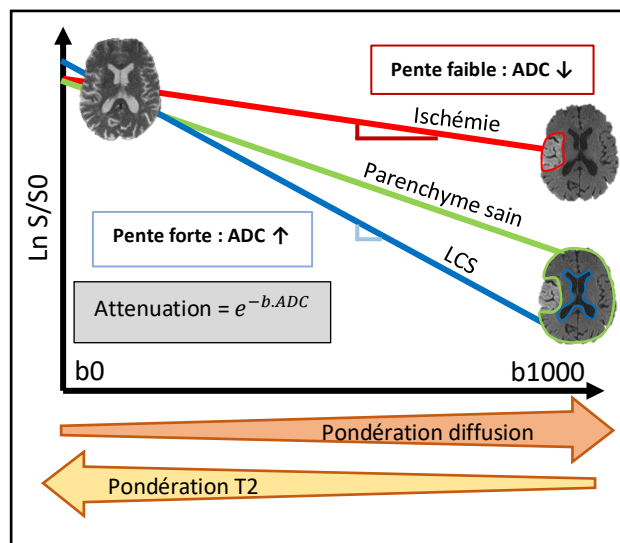


Figure 5: Évolution des signaux en fonction de la valeur de b .



Figure 6: Cartographie ADC

* γ correspond au rapport gyromagnétique de la molécule d'hydrogène. Pour mémoire, celui-ci est constant pour un noyau atomique et un champ magnétique donnés, avec $\omega_0 = \gamma \cdot B_0$, ω étant la fréquence angulaire de Larmor ou fréquence angulaire de précession des protons dans un champ magnétique B .

Dossier 1 : Complément sur la diffusion

❗ Ainsi, plus l'ADC est bas, plus la pente est faible et plus la diffusion est restreinte. Une restriction de la diffusion correspond donc à un hypersignal sur l'image de diffusion et un hyposignal sur la cartographie ADC (représentation colorimétrique des vitesses) Nous verrons dans d'autres dossiers différents pièges relatifs à la pondération T2 de la séquence de diffusion.

❗ L'hypersignal diffusion est expliqué par un œdème cérébral cytotoxique, intracellulaire. Le *primum movens* de l'œdème cytotoxique est l'accumulation intracellulaire d'ions Na^+ par **dysfonctionnement de la pompe Na^+/K^+ ATPase**. La paroi cellulaire devient beaucoup plus perméable au sodium et un mouvement hydrique s'opère via les canaux aquaporiques pour assurer la constance de l'osmolalité. Cet œdème cellulaire restreint la diffusion des molécules d'eau dans l'environnement cérébral (35).

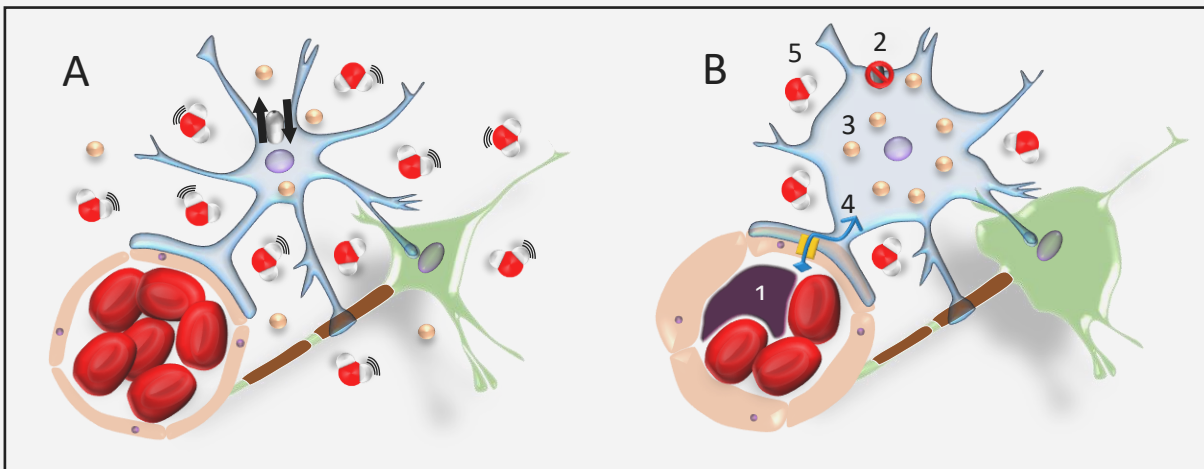


Figure 7 : A : physiologiquement : pied astrocytaire (en bleu) en contact avec les cellules endothéliales du capillaire cérébral (beige) et avec un neurone (en vert). La pompe Na^+/K^+ ATPase (flèches opposées) échange 2 K^+ extracellulaires contre 3 Na^+ intracellulaires. L'eau extracellulaire diffuse normalement. Les ions Na^+ (en jaune) sont majoritairement extracellulaires. B : Œdème cytotoxique. 1 : thrombus. 2 : dysfonction de la pompe par défaut d'apport en ATP. 3 : accumulation de Na^+ intracellulaire. 4 : entrée d'eau intracellulaire (canaux aquaporiques en jaune) 5 : restriction de la diffusion de l'eau extracellulaire.

Schémas originaux

Dossier 1 : Notions acquises

Notions acquises

- **Séquences IRM du protocole de base** : diffusion, T2-FLAIR, SWI ou T2*, AngioMR-TOF
- **AVC hyperaigu typique** : diffusion + **FLAIR** -
- **Quantification de l'hypersignal en diffusion** (/10 points : ASPECTS)
- **Principes de base de la diffusion** : Ischémie → Œdème cytotoxique → Restriction de la diffusion des molécules d'eau → Hypersignal DWI, diminution de l'ADC

Résumé des
principales notions
acquises



Exemple d'encart physiopathologique, « Pour aller plus loin »

Physiopathologie : la collatéralité artérielle cérébrale

La **circulation collatérale** correspond à un réseau de suppléance mis en jeu lorsqu'un vaisseau principal ne peut plus ou incomplètement remplir son rôle de perfusion. **Elle maintient alors la viabilité du tissu au sein de la zone de pénombre.**

De façon générale, comme nous l'avons vu au cours de ce dossier, un bon réseau collatéral est associé à (36–39):

- Un moindre volume infarcté
- Un plus faible risque hémorragique après revascularisation
- Une meilleure évolution clinique
- Une meilleure efficacité de la recanalisation par thrombolyse et thrombectomie (*meilleure pénétration du thrombolytique, modification de l'impaction et du gradient pressionnel au contact du thrombus*).

La circulation collatérale est communément divisée selon son caractère extra- ou intracrânien pouvant lui-même être d'ordre primaire ou secondaire (40).

- **La circulation collatérale extracrânienne**

Elle correspond d'une part à l'**anastomose de l'artère ophtalmique** avec l'artère faciale, l'artère maxillaire et l'artère méningée moyenne, d'autre part à des **anastomoses dures** artériolaires traversant les foramen mastoïdien et pariétal et s'anastomosant avec l'artère méningée moyenne. Ce sont donc des voies de communication entre l'artère carotide interne (ACI) et l'artère carotide externe (ACE).

- **La circulation collatérale intracrânienne**

- **Le réseau primaire**

Il correspond au **polygone de Willis**.

L'**artère communicante antérieure (AcomA)** permet un flux interhémisphérique entre les artères cérébrales antérieures (ACA) et un flux rétrograde dans l'ACA proximale, véritable support collatéral de la portion antérieure du polygone. *Il a été montré que l'hypotension au cours d'une thrombectomie mécanique dans le cadre d'une occlusion de l'artère cérébrale moyenne (ACM) était associée à un mauvais pronostic fonctionnel que chez les patients ne présentant pas d'artère communicante postérieure (AcomP) (41).* ⚙️

L'**AcomP** relie la circulation antérieure à la circulation postérieure, permettant un flux dans les deux sens.

La **portion proximale des ACP** permet un flux interhémisphérique local.

- **Le réseau secondaire**

Il correspond à la **circulation leptoméningée** et à l'**artère ophtalmique (par flux rétrograde)**. Les anastomoses leptoméningées correspondent à un réseau inter-artériolaire connectant les circulations antérieure, moyenne et postérieure au sein de la pie-mère. Il prédomine à la jonction ACA-ACM, puis entre ACM et ACP avec également quelques rares anastomoses entre ACA et ACP. Les branches distales des artères cérébelleuses présentent des voies collatérales avec la circulation postérieure*.

* D'autres anastomoses moins prédominantes existent : plexus tectal (ACP supra-tentorielle et artère cérébelleuse supérieure -ACS- infratentorielle), plexus orbitaire (artère ophtalmique et artères méningée moyenne, maxillaire, faciale et ethmoïdales) ; rete mirabile caroticum (entre l'ACI et l'ACE).

Ces vaisseaux très particuliers présentent des propriétés plastiques de remodelage en lien avec une interaction multifactorielle temporo-spatiale de l'endothélium, de la réponse immunitaire et des interactions cellulaires associées aux vaisseaux pour favoriser ou contrecarrer l'artériogénèse.(42). 

- **Évaluation de la collatéralité**

Le réseau collatéral peut être évalué :

- Par un **angioscanner monophasique** (43). L'importance de son développement est prédictive d'un plus faible volume d'infarctus et d'un meilleur pronostic fonctionnel. Souza & al. proposent un système de gradation par 5 catégories, 0 correspondant à l'absence de collatérale dans plus de la moitié d'un territoire d'une branche M2 de l'ACM, le stade 4 à la présence accrue de collatérales par rapport à la normale.
- Par un **angioscanner multiphasique** (44), employant plusieurs phases d'acquisition, rarement réalisé en routine. Son utilisation est diagnostique et pronostique, en renseignant sur le degré et l'étendue du remplissage artériel pial. Il irradie moins que le scanner de perfusion et ne nécessite qu'une injection mais il est moins informatif sur le mismatch et les stroke mimics.
- En IRM par la visualisation des FHV (45) (voir **Dossier 1 bis**).
- En artériographie qui est l'examen dynamique de référence.



- **Concept de « progresseur rapide »**

La qualité du réseau collatéral permet de définir deux types de phénotype dans le cadre de l'AVC ischémique aigu (46-50) : *

- Les « **progresseurs rapides** » possèdent un réseau collatéral peu développé. L'extension du cœur ischémique est rapide dans les 6 premières heures et le maintien de la viabilité de la pénombre est particulièrement précaire. L'occlusion est souvent située à hauteur de la carotide, suggérant que le site anatomique atteint joue également un rôle dans la détermination du phénotype. La prise en charge par thrombectomie doit être particulièrement rapide, tant qu'une zone de pénombre est encore présente.
- Les « **progresseurs lents** » possèdent un réseau collatéral développé. L'extension du cœur ischémique aux dépens de la pénombre est lente dans les 6 premières heures. Certains patients maintiennent une zone de pénombre sauvable jusqu'à plusieurs jours après l'occlusion vasculaire.

* De nombreux facteurs semblent entrer en jeu dans la détermination de ce phénotype, comme l'anémie, l'hyperlipidémie et le caractère peu sévère des symptômes qui seraient associés au phénotype « progresseur lent ».

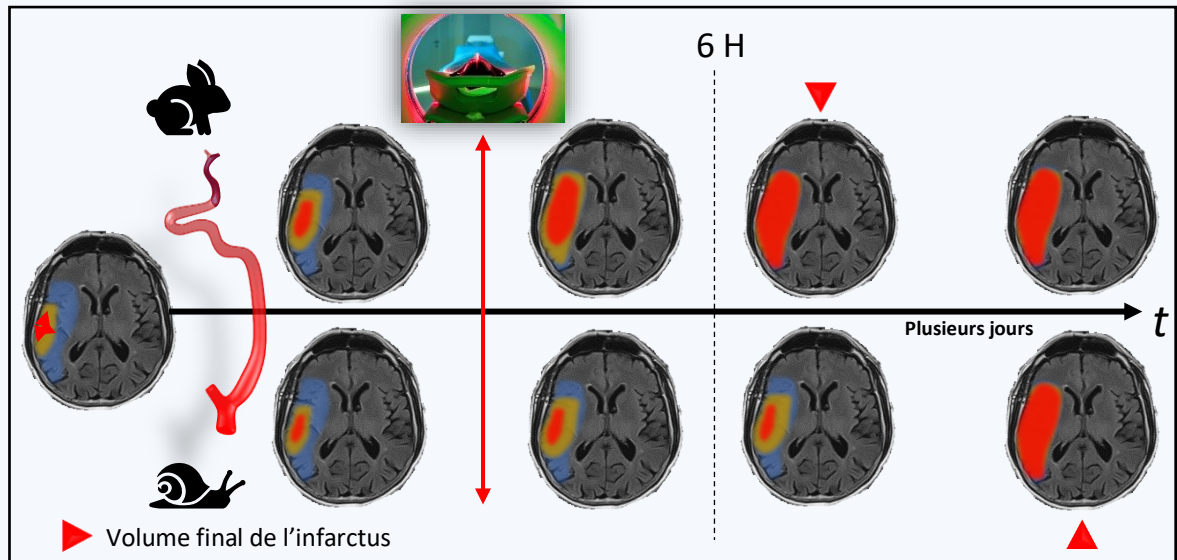


Figure 8: Progresseur rapide (en haut), progresseur lent (en bas). L'occlusion vasculaire a lieu à t_0 . Dès la réalisation de l'imagerie (double flèche rouge), le cœur ischémique est plus volumineux chez les "progresseurs rapides". Le volume final de l'infarctus est atteint beaucoup plus rapidement chez le progresseur rapide » que chez le « progresseur lent » où la viabilité de la pénombre peut être maintenue plusieurs jours après l'occlusion.

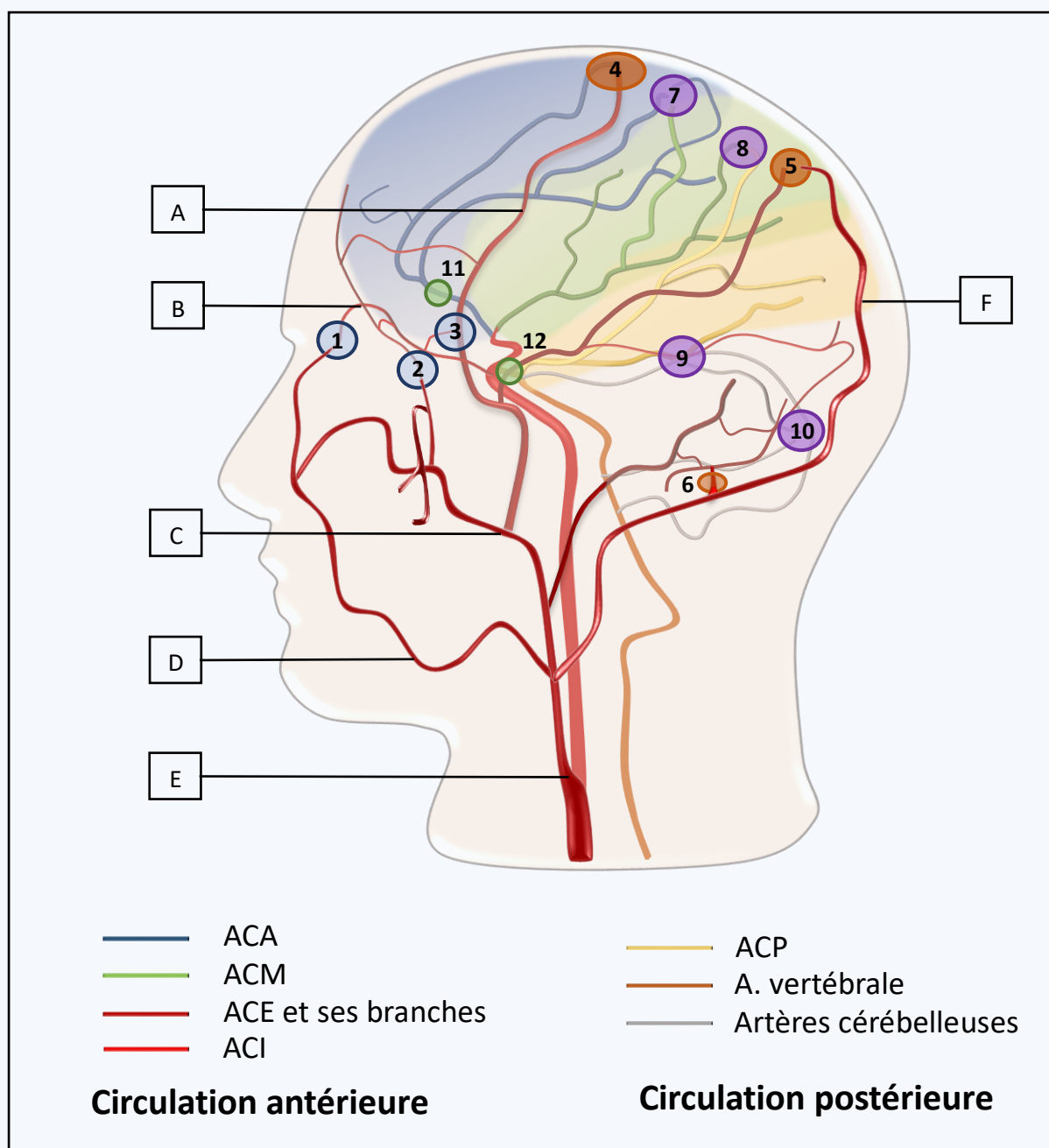


Figure 9: Circulation collatérale cérébrale, d'après David S. Liebeskind.

A : a. méningée moyenne. B : a. ophtalmique. C : a. maxillaire. D : a. faciale. E : a. carotide externe. F : a. occipitale.

Les territoires vasculaires de l'ACA, ACM et de l'ACP sont figurés respectivement en bleu, vert et jaune.

Anastomoses extracrâniennes :

Anastomoses de l'artère ophtalmique avec : 1 : a. faciale ; 2 : a. maxillaire ; 3 : a. méningée moyenne.

Anastomoses artériolaires dures : 4 : a. méningée moyenne ; 5 et 6 : a. occipitale au travers des foramen mastoïdien (5) et pariétal (6).

Anastomoses intracrâniennes

Réseau secondaire leptoméningé : 7 : ACA-ACM ; 8 : ACM-ACP ; 9 : ACP- ACS : plexus tectal ; 10 : a. cérébelleuses.

Réseau primaire : 11 : AcomA ; 12 : AcomP.

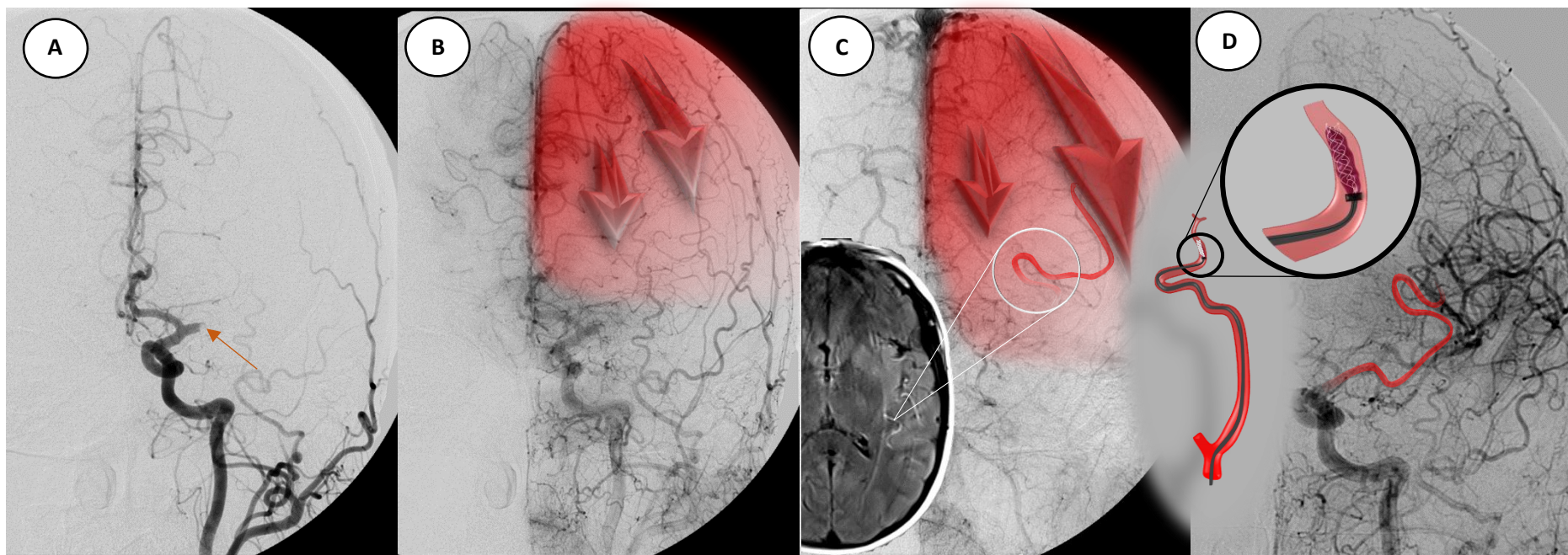


Figure 10: Angiographie avec repères visuels illustrant le concept de collatéralité (les cartouches illustrent les différents temps angiographiques, respectivement : injection de produit de contraste et acquisition au temps artériel précoce (A), temps artériel tardif (B), temps veineux (C), temps angiographique artériel intermédiaire entre A et B (D)) :

A : Opacification au temps artériel précoce par un cathéter situé dans l'artère carotide commune gauche. L'artère cérébrale antérieure est bien opacifiée, l'artère cérébrale moyenne est obstruée par un thrombus dès sa portion M1 (flèche orange), son lit d'aval n'est pas visible.

B : Sur une acquisition un peu plus tardive, toujours à un temps artériel avec opacification graduelle du réseau leptoméningé situé entre le territoire de l'ACA et de l'ACM, dans un sens crânio-caudal.

C : Sur une acquisition au temps veineux habituel, opacification rétrograde d'une branche M2 distale par un flux provenant de l'ACA. Ce vaisseau est montré en regard de la séquence T2-FLAIR objectivant un FHV de cette même branche M2 où le sang circule lentement.

D : À la suite de la procédure de thrombectomie mécanique, à un temps d'acquisition angiographique intermédiaire entre A et B, il existe maintenant une bonne opacification antérograde de cette même branche M2 distale par un flux issu de l'ACM reperméabilisée.

POUR ALLER PLUS LOIN

La détection des hyperintensités vasculaires sur la séquence FLAIR nécessite la réalisation de séquences bidimensionnelles (51).

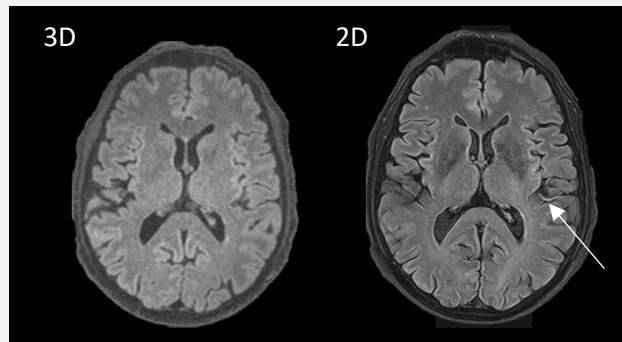


Figure 11: Séquences 3D FLAIR (FHV non visible) et 2D FLAIR (FHV marqué d'une flèche blanche)

En effet, la séquence T2-FLAIR 2D est une séquence de spin-echo avec TE long et comportant une impulsion d'inversion-récupération pour l'élimination du signal du LCS. Normalement, les vaisseaux apparaissent en hyposignal sur les séquences 2D FLAIR car la circulation rapide du sang élimine les protons sanguins du plan de coupe avant l'application du pulse de 180° . Les vaisseaux au sein desquels la circulation du sang est ralentie subissent peu cet effet, le contraste dépendant alors du T1 et du T2 du sang, expliquant l'hypersignal observé dans le cadre des FHV. Par contraste, les séquences 3D FLAIR emploient des pulses de radiofréquence sans spécificité spatiale associés à de longs trains d'échos, qui expliqueraient la suppression du signal des vaisseaux à flux lent, par le déphasage additionnel des spins qu'elles engendrent.

Vu, le Directeur de Thèse

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'G' followed by a series of loops and a long horizontal stroke.

**Vu, le Doyen
De la Faculté de Médecine de Tours
Tours, le**

LEFEVRE Valentin

56 pages - 1 tableau – 11 figures

Résumé :

Cette thèse a consisté en l'élaboration d'un ouvrage correspondant à une méthode d'auto-apprentissage de l'imagerie de l'accident vasculaire ischémique (AVC) aigu, destinée au corps médical intervenant dans sa prise en charge.

Le livre a pour but d'enseigner l'imagerie de l'AVC aux non-radiologues et de réaliser une mise à jour des connaissances des radiologues et neuroradiologues. Une liste de notions relatives à l'imagerie de l'AVC ischémique aigu de l'enfant et de l'adulte a d'abord été élaborée en s'appuyant sur des ouvrages et articles de référence. Toutes ces notions ont ensuite été incluses et développées au sein de 21 dossiers clinico-radiologiques de difficulté croissante comportant chacun un énoncé et des questions de différents types (dossiers progressifs, QCM, QROC etc.).

Au total, plus de 150 figures et diagrammes originaux ont été élaborés. Ils illustrent plus de 200 pages de contenu relatif à la neuroradiologie. L'ouvrage s'appuie sur plus de 200 références bibliographiques et comporte également un glossaire, un index alphabétique, un index thématique et une table des matières. Il contient également un atlas radio-anatomique original complet et des considérations embryologiques.

Mots clés : Stroke; Imaging; Method; Pedagogy; Self-learning; Neuroradiology

Jury :

Président du Jury : Professeur Laurent BRUNEREAU

Directeur de thèse : Professeur Jean-Philippe COTTIER

Membres du Jury : Professeur Baptiste MOREL

Docteur Marie GAUDRON

Docteur Nabil EL GANI

Date de soutenance : 08/09/2023