

Formation Médicale Continue

RUBRIQUE PILOTÉE PAR JEAN-CLAUDE SABY ET MICHEL FÉSOLOWICZ

—

P25

Standards de qualité pour la pratique du doppler et de l'écho-doppler transcrânien

Responsable coordonnateur : Muriel SPRYNGER

Jean-Michel BAUD, François BECKER, Carine BOULON, Geneviève KERCRET, Jean-Noël POGGI, Jean-Claude SABY, Muriel SPRYNGER

Travail initié par François BECKER

Standards de qualité pour la pratique du doppler et de l'écho-doppler transcrânien

RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL DES ARTÈRES CERVICO-ENCÉPHALIQUES
DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE MÉDECINE VASCULAIRE

Responsable coordonnateur : Muriel SPRYNGER (*msprynger@chu.ulg.ac.be*),

Rédacteurs : Jean-Michel BAUD, François BECKER, Carine BOULON, Geneviève KERCRET, Jean-Noël POGGI, Jean-Claude SABY, Muriel SPRYNGER

Illustrations : Jean-Michel BAUD, Michel DAUZAT, Geneviève KERCRET, Jean-Noël POGGI, Muriel SPRYNGER

1. INDICATIONS DE L'ÉCHO-DOPPLER TRANSCRÂNIEN (EDTC) (VOIR ANNEXE 5)

EDTC EN URGENCE OU SEMI-URGENCE

- Surveillance du vasospasme en cas d'hémorragie sous-arachnoïdienne (HSA) entre le 3e et le 6e jour.
- Accident ischémique cérébral aigu (AIT, minor-stroke, stroke) :
- Dissection carotidienne ou vertébrale :
- Traumatisme crânien grave
- Mort cérébrale ou arrêt circulatoire cérébral
- Monitoring per-opératoire

EDTC EN SITUATION CHRONIQUE

- Evaluation et suivi du retentissement hémodynamique des sténoses ou occlusions carotidiennes et analyse des voies de suppléance

- Dépistage et suivi des lésions en tandem
- Dépistage des sténoses intracrâniennes
- Quantification des sténoses intracrâniennes >50%
- Pathologie vertébro-basilaire : lésions des artères vertébrales (AV) et du tronc basilaire (TB), analyse des hémodétournements vertébro-sous-claviers
- Détection de micro-embolies (MES) ou high intensity signals (HITS) à partir d'un foramen ovale perméable (FOP) ou d'une plaque instable carotidienne ou aortique
- Evaluation de la réserve vasomotrice cérébrale (RVC)
- Suivi des drépanocytoses homozygotes
- Fistules artério-veineuses (FAV) dures, fistules carotido-caverneuses, angiomes intracérébraux, fistules méningées
- Suivi des malformations artério-veineuses (MAV) intracrâniennes
- Surveillance des anévrysmes intracrâniens

2. OBJECTIFS DIAGNOSTIQUES ET NIVEAUX D'EXAMEN DE L'EDTC

La méthodologie de l'EDTC en fonction des indications spécifiques est décrite au Chapitre 4.

EXAMEN DE NIVEAU 1

Il s'agit d'un examen ciblé simplifié. Son objectif est de répondre à une question simple et précise.

- L'enregistrement comparatif des flux sylviens en complément de l'écho-Doppler cervico-encéphalique, quelle que soit l'indication de l'examen (sténose carotidienne > 50%, de dépistage de sténose intracrânienne, de suivi post-opératoire, d'hémorragie cérébrale...) à condition qu'il soit de qualité satisfaisante et que les signaux soient symétriques. Dans le cas contraire, il requiert une expertise (niveau 3).
- L'enregistrement du flux Doppler à l'origine du tronc basilaire en cas d'hémodétournement vertébro-sous-clavier à condition que la confluence des artères vertébrales soit bien visualisée.

EXAMEN DE NIVEAU 2 (VOIR CHAPITRE 3) (EXAMEN STANDARD DE RÉFÉRENCE)

Il correspond à l'examen diagnostique standard complet du polygone de Willis (voir annexe 1) et des suppléances éventuelles à l'état basal. Il nécessite l'examen préalable des artères du polygone de Willis à destinée cervico-encéphalique (ACE).

EXAMEN DE NIVEAU 3

Il s'agit d'un examen nécessitant une haute expertise et venant en complémentarité des autres techniques d'imagerie.

- Évaluation et quantification des lésions des artères intracrâniennes
- Utilisation de produit de contraste (PdC, Sonovue®)
- Utilisation de manoeuvres dynamiques
- Exploration des malformations artério-veineuses (MAV)
- Drépanocytose
- Exploration de la VRC
- Recherche de "Micro Emboli Signals" (MES ou micro-embolies cérébraux) ou de "High Intensity Transient Signals" (HITS) par monitoring et analyse humaine.

3. TECHNIQUE ET MÉTHODOLOGIE DE L'EDTC STANDARD DE RÉFÉRENCE (NIVEAU 2)

MÉTHODOLOGIE DE L'EDTC

Le Doppler transcrânien (DTC) peut être réalisé "à l'aveugle", uniquement guidé par la morphologie du flux, son sens et la profondeur du volume d'échantillon.

Le DTC peut aussi être utilisé en monitoring, à la recherche de micro-embolies (MES) (voir chapitre 4, examen de niveau 1). Souvent, le DTC est couplé à une échographie (EDTC) (voir annexe 2). Il doit toujours être précédé d'un écho-Duplex des ACE sauf éventuellement en cas de drépanocytose. Contrairement aux fontanelles du nouveau-né et du nourrisson, le crâne est peu perméable aux ultrasons sauf au niveau de certaines régions appelées "fenêtres". Les 3 fenêtres couramment utilisées sont les fenêtres orbitaire, temporale et occipitale (voir annexe 3).

INSTALLATION DU PATIENT ET DE L'EXAMINATEUR

La position du médecin dépend de ses habitudes et des fenêtres étudiées :

- Pour les fenêtres temporale et trans-orbitaire, le patient est placé en decubitus dorsal et le médecin se place à sa tête ou à son côté. La sonde est posée sur la tempe.
- Pour la fenêtre sous-occipitale, le patient est soit assis, tête fléchie, face ou dos au médecin soit couché en decubitus latéral, tête fléchie en avant pour permettre à la sonde d'accéder à la région sous-occipitale. Il peut être aussi couché sur le ventre.

MATÉRIEL ET TECHNIQUE D'EXAMEN

On utilise une sonde cardiaque "phased array" 1 à 2 MHz, en mode B, couplée à de basses fréquences en Doppler pulsé et couleur, pour les fenêtres temporale et sous-occipitale. Si le siphon carotidien n'est pas abordable par la fenêtre temporale, on utilisera la fenêtre orbitaire, en réduisant la puissance acoustique du Doppler à 10% du niveau habituel en raison du risque théorique de cataracte (effet observé chez l'animal). L'examen consiste à repérer les structures parenchymateuses principales en mode B, puis les artères intracrâniennes en Doppler couleur (voir annexe 2) et à y placer un échantillon d'une longueur de 5 à 12 mm pour y enregistrer des tirs successifs sur toute la longueur du vaisseau en Doppler pulsé avec un angle incident (angle θ) minimal. (voir annexe 3). L'analyse du signal Doppler porte sur le sens, la vitesse et la morphologie du flux (voir Annexe 3) : Vitesse Systolique Maximale (VSM), Vitesse Télé-Diastolique (VTD), Moyenne des Vitesses Maximales (moyVmax), la mesure de l'Index de Résistance (IR). Comme l'IR, l'Index de Pulsatilité (IP) donne une évaluation de la résistance périphérique. Il est surtout utilisé dans les services de réanimation. La réalisation de tests dynamiques ou médicamenteux est parfois nécessaire (étude de vicariance, vol sous-clavier, évaluation de la VRC) (niveau 3). L'injection de PdC peut être utile en cas de visualisation insuffisante des artères (niveau 3). (Voir Annexe 4)

VAISSEAUX À EXPLORER (VOIR ANNEXE 1 ET 2)

L'examen de niveau 2 doit inclure au minimum l'enregistrement des profils de vitesse recueillis en Doppler Pulsé (Pulsed Wave Doppler- PW) dans l'artère

carotide interne (ACI) terminale, le segment proximal (M1) des artères cérébrales moyennes (ACM), les siphons carotidiens (SC), le segment proximal (A1) des artères cérébrales antérieures (ACA), le segment pré-communicant (P1) des artères cérébrales postérieures (ACP), les segments V4 des artères vertébrales et à l'origine du TB. (voir annexe 5)

Si possible, l'examen sera complété par l'enregistrement des segments M2 des ACM, le segment post-communicant (P2) des ACP. Dans certaines situations pathologiques, on étudiera les flux dans l'ACoA et/ou les ACoP. L'enregistrement du flux dans les artères ophtalmiques (AO) n'est généralement pas indispensable, mais il peut être utile en cas d'impossibilité d'enregistrement du flux dans l'ACM. Dans ce cas, l'injection de produit de contraste (PdC) ultrasonore (Sonovue[®]) peut aider à visualiser les vaisseaux intra-crâniens. Il s'agit alors d'un examen de niveau 3. (voir annexe 4)

L'étude de la VRC est un complément utile à l'évaluation du retentissement hémodynamique d'une lésion carotidienne et de la capacité d'adaptation de la circulation intra-crânienne (niveau 3). (voir annexe 5)

4. TECHNIQUE ET MÉTHODOLOGIE DE L'EDTC EN FONCTION DES INDICATIONS SPECIFIQUES

Le contexte clinique et l'écho-Doppler des ACE peuvent conduire à adapter la méthodologie afin de répondre au mieux à la problématique spécifique du patient. L'examen peut aussi être limité par un manque d'accessibilité de certaines fenêtres acoustiques (en particulier de la fenêtre temporale) (voir annexe 3). Cette limitation devra être notifiée dans le compte rendu de l'examen. Si nécessaire, on aura recours à l'injection de PdC.

EXAMEN DE NIVEAU 1 : EXAMEN CIBLÉ (VOIR ANNEXE 4)

- Acquisition et analyse du flux dans l'ACM (M1) par la fenêtre temporale en cas de sténose carotidienne > 70% (selon NASCET) et/ou à la phase aiguë d'un AIC. Le signal Doppler est analysé et comparé au flux controlatéral (voir Annexe 5). En l'absence de lésion significative, il est symétrique (VSM et IR). En cas de flux anormal, on procédera à un examen de niveau 2.
- Acquisition et analyse du flux dans les artères vertébrales (V4) et dans la portion proximale du tronc basilaire (TB) dans le cadre de l'évaluation du retentissement d'une sténose d'artère sous-clavière ("vol sous-clavier" ou hémodétournement vertébro-sous-clavier) ou de lésions significatives des artères vertébrales. Le signal Doppler est analysé et comparé au flux controlatéral (voir Annexe 5). Si le flux est anormal ou si le confluent des artères vertébrales n'est pas détecté (normalement situé à une profondeur minimale de 80 mm), il faudra alors réaliser un examen de niveau 2.

- Détection de micro-embolies (MES) ou HITS (High Intensity Transient Signal) par monitoring et analyse informatique (en cas d'analyse humaine, il s'agit d'un examen de niveau 3). (voir Annexe 5).
- Traumatismes crâniens sévères : l'EDTC peut détecter au lit du patient les répercussions hémodynamiques d'une augmentation de la pression intra-crânienne (HyperTension IntraCrânienne-HTIC) après un traumatisme crânien sévère (voir annexe 5). Si nécessaire, on aura recours au PdC.
- Diagnostic et surveillance du vasospasme en cas d'hémorragie sous-arachnoïdienne (HSA) (voir annexe 5).
- Arrêt circulatoire cérébral : mort cérébrale (MC), chez l'adulte et l'enfant de plus de 6 mois, le DTC permet de planifier au mieux la demande de scanner cérébral, mais il ne suffit pas pour poser le diagnostic de MC. (voir Annexe 5).
- Syndrome d'hyperperfusion : il se traduit par une augmentation très importante des vitesses intracrâniennes après une revascularisation par chirurgie (TEA) ou stenting. Un monitoring per-opératoire du flux sylvien par DTC pourrait identifier les individus à risque.

EXAMEN DE NIVEAU 2

EXAMEN STANDARD DE RÉFÉRENCE

- La méthodologie est décrite au chapitre 3 (Technique et méthodologie de l'EDTC). Cet examen permet d'évaluer le retentissement des lésions carotidiennes, vertébrales ou sous-clavières (maladie athéromateuse, dysplasie fibro-musculaire et dissection artérielle). (voir annexe 5)
- En cas de qualité insuffisante de la fenêtre temporale, on peut avoir recours à l'injection de PdC (Sonovue[®]) pour visualiser les vaisseaux intra-crâniens. Il s'agit alors d'un examen de niveau 3. (voir annexe 4)
- L'étude de la VRC est un complément utile à l'évaluation du retentissement hémodynamique d'une lésion carotidienne et de la capacité d'adaptation de la circulation intracrânienne (niveau 3). (voir annexe 5)

EXAMEN DE NIVEAU 3 - INDICATIONS PARTICULIÈRES ET TECHNIQUES SPÉCIFIQUES

Ces examens sont décrits de façon détaillée dans l'annexe 5.

- AIC à la phase aiguë : le DTC et l'EDTC permettent d'identifier des patients à risque d'aggravation fonctionnelle dans les 24 heures, notamment en cas d'occlusion ou de sténose intracrânienne et de déficit neurologique modéré spontanément régressif (Rankin 1-2- NIH) en moins de 6 heures.⁹ Chez ces patients à risque, on maintiendra le decubitus strict, un remplissage vasculaire et une PA suffisants. Lorsqu'il sera autorisé, le lever sera

réalisé progressivement sous contrôle tensionnel. Il est souvent utile d'avoir recours à l'injection de PdC (niveau 3). (voir annexe 4)

- Il est parfois difficile d'affirmer l'occlusion d'une artère intra-crânienne. De plus, contrairement à l'occlusion chronique, l'occlusion aiguë est un phénomène dynamique (voir paragraphe ci-dessous "reperfusion après AIC").
- Reperfusion après AIC avec ou sans traitement fibrinolytique : 2/3 des occlusions ou subocclusions emboliques intra-crâniennes se délitent spontanément en moins d'une semaine. Généralement, la récupération fonctionnelle est meilleure si la normalisation du DTC est précoce (< 6 h). Pourtant certains patients s'aggravent malgré un DTC normal dans les 6 heures, peut-être en raison de lésions de reperfusion (reperfusion injury).¹⁰ En cas d'infarctus sylvien, la normalisation des vitesses dans l'ACM à 48 h est un facteur de bon pronostic. Par contre, le pronostic de récupération est mauvais en cas d'asymétrie de vitesse > 20% ou si la vitesse moyenne est < 40 cm/s.¹¹ Le flux Doppler est donc sujet à des variations dans le temps (score de COGIF - annexe 5).
- Sténose intracrânienne : une sténose intracrânienne est caractérisée par une élévation localisée de la vitesse.
- Bilan de suppléances et manœuvres de compression : ces manœuvres permettent d'apprécier le degré de retentissement hémodynamique en aval d'une sténose ou d'une occlusion et d'évaluer le risque cérébral en cas de bas-débit.
- Insuffisance vertébro-basilaire : l'EDTC étudie les segments V4 des artères vertébrales et la partie proximale du TB. Il ne peut détecter que les sténoses $\geq 60^\circ$. Outre l'évaluation des répercussions hémodynamiques des lésions des artères vertébrales (dans leur portion cervicale et intracrânienne) et de la portion proximale du TB, l'EDTC couplé à la manœuvre d'hyperhémie du membre supérieur trouve une indication particulièrement intéressante dans l'exploration des hémodétournements vertébro-sous-claviers en complément de l'ED des TSA.
- Recherche de shunt droit-gauche (notamment en cas de FOP¹²) : la sensibilité du test est d'environ 95%), meilleure si l'enregistrement est bilatéral. Sa spécificité est de 78%), car contrairement à l'ETO, il ne permet pas de préciser si le shunt est intra- ou extra-cardiaque. Par contre, l'EDTC est beaucoup mieux toléré que l'ETO et permet une réalisation plus efficace de la manœuvre de Valsalva. La technique est sans risque et ne nécessite pas de sédation. L'analyse est semi-quantitative. Elle permet aussi d'assurer le suivi après fermeture du shunt.
- Évaluation de la réserve vasomotrice cérébrale (RVC) (vasoréactivité cérébrale-VRC) sous acétazolamide (Diamox[®]), CO₂ ou lors d'une manœuvre d'apnée : la VRC représente la capacité de maintien

d'un débit cérébral satisfaisant lors de variations hémodynamiques. En cas de sténose serrée ou d'occlusion carotidienne unilatérale, le jeu des collatéralités peut parfois réussir à maintenir un flux Doppler symétrique dans les 2 ACM. Toutefois si la pression de perfusion est critique, la perfusion cérébrale est maintenue au prix d'une exploitation quasi-maximale des capacités d'auto-régulation du débit intra-crânien (vasodilatation).

En l'absence de sténose serrée ou d'occlusion en amont, la VRC est identique quelle que soit l'artère étudiée. En cas de sténose serrée ou d'occlusion d'ACI avec collatéralité insuffisante, la VRC est altérée du côté de la lésion. En cas d'occlusion carotide bilatérale, l'altération de la VCR peut être bilatérale. Le test de VRC identifie un sous-groupe à haut risque neurologique en cas de baisse de la pression de perfusion, quelle qu'en soit la cause (hypotension artérielle, arythmie cardiaque soutenue, chirurgie, occlusion carotidienne...).

La perte de VRC est un facteur de risque de syndrome de reperfusion a minima après une chirurgie ou un stenting de carotide et un facteur de mauvais pronostic en cas d'hémorragie intra-crânienne sévère.

- Drépanocytose : l'EDTC détecte l'artériopathie drépanocytaire avant l'apparition de la sténose et permet un traitement préventif! Il est donc devenu un examen de référence dans la prévention des AIC chez les enfants drépanocytaires. L'HAS¹³, la NIH, la Société Nord-Américaine de Neurologie, la Société Nord-Américaine de Radiologie, la Société Européenne de Neurologie et d'autres recommandent une surveillance annuelle ou semestrielle des enfants drépanocytaires homozygotes (HbSS) à partir de l'âge de 2 ans (18 mois selon certains).
- Malformations artério-veineuses (MAV) intra-crâniennes : l'EDTC peut aider au diagnostic et à la surveillance des diverses MAV à condition que leur taille soit > 4 cm et qu'elles soient responsables de modifications hémodynamiques significatives. Le monitoring Doppler est souvent utile lors du traitement endovasculaire.
- Fistules carotido-caverneuses (FCC) : elles peuvent être traumatiques ou spontanées, à haut ou bas-débit. Leur présence est fortement suspectée en cas de baisse importante des IR et d'accélération considérable des vitesses dans les artères carotides internes ou externes. Le diagnostic sera confirmé par l'examen trans-orbitaire : mosaïque de flux bi-directionnels à haute vitesse ("cri de la mouette") et dilatation de la veine ophtalmique dont le flux est artérialisé.
- Fistules artério-veineuses (FAV) dures : leur présence sera suspectée par la présence d'un hyperdébit et une diminution de l'IR dans l'artère CE cervicale (diagnostic différentiel : maladie de Basedow, sténose serrée d'artère CE, internalisation du flux d'artère CE due à une sténose serrée ou à une occlusion de l'ACI ipsilatérale).

- Anévrismes intra-crâniens : le dépistage des anévrismes intra-crâniens par EDTC est illusoire, mais une découverte fortuite est possible. L'EDTC peut aussi être utile dans le cadre de la surveillance des anévrismes.

5. COMPTE RENDU DE L'EXAMEN

Le compte rendu d'examen doit renseigner tous les éléments suivants :

RENSEIGNEMENTS ADMINISTRATIFS

- Nom, prénom, date de naissance du patient
- Nom du médecin prescripteur et du ou des médecins référents
- Nom du médecin ayant réalisé l'examen
- Marque, modèle, date de mise en service du matériel écho-Doppler
- Date (et heure) de l'examen
- En cas d'examen "en urgence", préciser la date et l'heure de l'accident, la date et l'heure de la demande (cf référentiel AIT)

RENSEIGNEMENTS MÉDICAUX

- Antécédents médicaux et chirurgicaux importants
- Histoire actuelle de la maladie et séméiologie neurovasculaire présente
- Examens déjà réalisés
- Indication et objectifs de l'examen EDTC
- Conclusion de l'ED des axes cervico-encéphaliques couplé à l'EDTC

DESCRIPTION DE L'EDTC ET DE SES LIMITES ÉVENTUELLES

- Motif de l'examen, contexte clinique
- Type d'examen réalisé : niveau 1, 2, 3 - indication particulière éventuelle (à préciser)
- Synthèse diagnostique de l'écho-Doppler des ACE.
- Description des fenêtres utilisées, des vaisseaux intra-crâniens analysés et des données hémodynamiques recueillies
- Notification, le cas échéant, des manœuvres utilisées (test d'hyperhémie du membre supérieur, apnée, injection de PdC ultrasonore, injection de bolus de LP ou glucosé, compression carotidienne...)
- Notification, le cas échéant, des facteurs limitant la fiabilité et l'exhaustivité de l'examen
- Vaisseaux ou segments de vaisseaux non explorés

SYNTHÈSE DIAGNOSTIQUE

- Interprétation des données de l'examen EDTC
- Comparaison, le cas échéant, avec les résultats d'examens antérieurs
- Implication clinique des résultats de l'examen EDTC réalisé

ICONOGRAPHIE

Le compte rendu doit être accompagné d'une documentation illustrant les principaux vaisseaux et flux étudiés ainsi qu'une documentation complémentaire de tous les éléments pathologiques diagnostiqués avec au minimum pour les examens de niveau 2 :

- Les images en mode B + Doppler couleur de la terminaison de l'ACI, des ACM (M1, voire M2), des ACP (P1, voire P2), de la portion terminale des artères vertébrales (V4) et de l'origine du TB
- Les images du profil de vitesse du flux enregistré dans ces mêmes artères avec visualisation du tir Doppler, de la longueur de l'échantillon, de la correction d'angle ainsi que de la morphologie du flux (sens du flux, temps d'ascension systolique, VSM)

Cette iconographie devra être complétée :

- Systématiquement par l'imagerie correspondant à l'ED cervical réalisé en complément à l'EDTC
- Le cas échéant par une imagerie détaillée de toutes les lésions mises en évidence sur les différents vaisseaux examinés ou de tous les flux enregistrés dans des artères ou portions d'artères impliquées dans l'hémodynamique de la pathologie (ACM en A1, SC, ACoA, ACoP, AO...)

6. ASSURANCE QUALITE

FORMATION ET PRATIQUE

La pratique de l'ED cervical doit être acquise. Une formation initiale à la pratique de l'EDTC est requise de même qu'un volume d'activité supérieur à 100 examens (niveau 2). Une formation spécifique est nécessaire dans certaines indications particulières (neurochirurgie, MAV, drépanocytose...).

PROCÉDURES GÉNÉRALES D'ÉVALUATION

Aussi souvent que possible, les données de l'examen EDTC doivent être corrélées à celles des examens radiologiques (CT-scan, IRM, artériographie intra-artérielle) ou de la chirurgie.

AUTO-ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DE L'EXAMEN EDTC RÉALISÉ CHEZ UN PATIENT DONNÉ

Les motifs d'un examen plus limité que l'examen de référence doivent être notifiés. Les vaisseaux ou segments de vaisseaux non explorés doivent être notifiés également. Les limitations et les causes d'erreurs de l'EDTC doivent être reconnues et notifiées, tant pour l'analyse morphologique (défaut d'échogénicité, mouvements incontrôlés du patient...) qu'hémodynamique (bas débit cardiaque, sténose valvulaire cardiaque, sténose artérielle supra-aortique, arythmie cardiaque...).

ANNEXES

ANNEXE 1 : BASES ANATOMIQUES

POLYgone DE WILLIS : le polygone de Willis réunit les 2 ACI et les 2 artères vertébrales via le TB (Figure 1). Son anatomie est très variable. De sa fonctionnalité dépendent les potentialités de suppléance.

Le SC : son trajet sinueux est situé dans un plan à peu près sagittal. Par la fenêtre trans-orbitaire, le SC est accessible à une profondeur de 6 à 7 cm. Dans C3, le flux est dirigé vers la sonde. C'est l'inverse dans C2 (Figure 2). Par la fenêtre temporale, en obliquant la sonde vers le haut, on visualise la terminaison de l'ACI et sa division en A1 et M1 (Figure 3). En obliquant vers le bas, on peut visualiser le segment C2, et souvent C3 du SC.

L'AO : sa portion distale est située au bord interne du nerf à une profondeur de 3 à 5 cm. Le flux est normalement dirigé vers la sonde (Figure 4). L'AO peut être étudiée avec une sonde "phased array" de basse fréquence (voir précautions, Annexe 2) ou avec une sonde linéaire de haute fréquence.

Figure 1 : Polygone de Willis

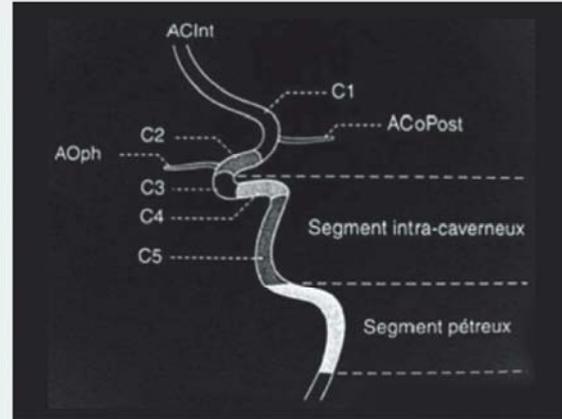
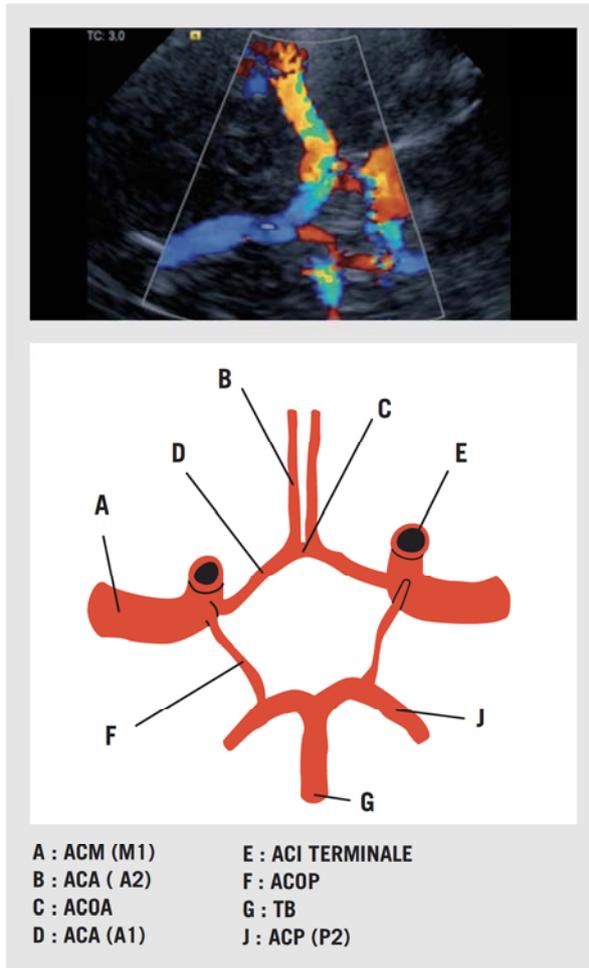


Figure 2 : Schema du SC

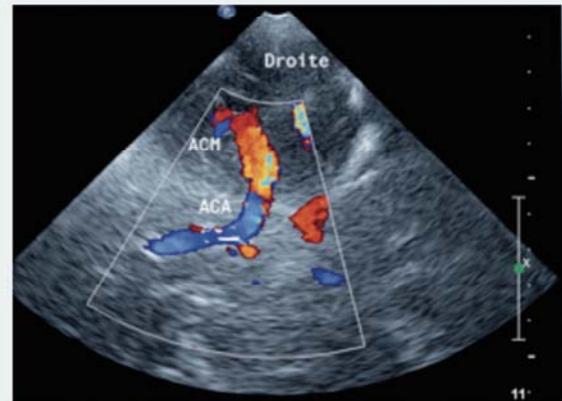


Figure 3 : Terminaison de l'ACI et sa division en A1 et M1 (Echo-Doppler couleur) (G Kercret)

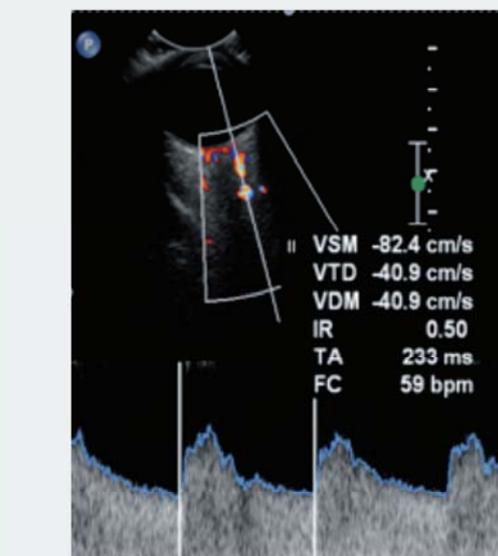


Figure 4 : Flux Doppler dans l'artère ophtalmique (G Kercret)

L'ACM : Elle est la plus volumineuse des artères intracrâniennes. Elle prolonge l'ACI et elle est divisée en 4 segments (classification de Fischer). Le segment M1 épouse la convexité du cerveau et mesure en moyenne 16 mm. Il est souvent bien visualisé (Figure 5). A une profondeur d'environ 40 mm, M1 se divise en 2 ou plus souvent 3 branches (M2). Le flux de M1 est codé en rouge, car dirigé vers la sonde.

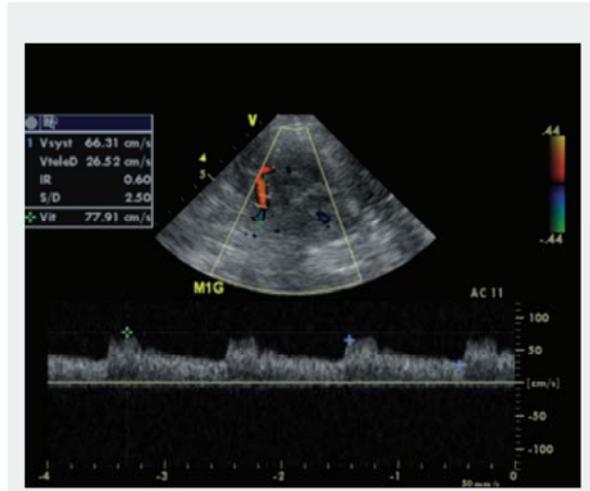


Figure 5 : Artère cérébrale moyenne (M1) (M. Sprynger)

L'ACA : Elle est divisée en 4 segments. Seuls les 2 premiers (A1 et A2) sont accessibles à l'EDTC. L'ACA est l'objet de nombreuses variations anatomiques. A2 débute après l'AcoA qui réunit les 2 ACA. Elle peut être double (Figure 11). Dans le segment A1 ipsilatéral, le flux est codé en bleu (fuyant la sonde) (Figure 6). En raison de son calibre (diamètre 1-3 mm et longueur 1-3 mm), l'ACoA n'est généralement visualisée que lorsqu'elle sert de voie de suppléance ou lors de manœuvres de compression.

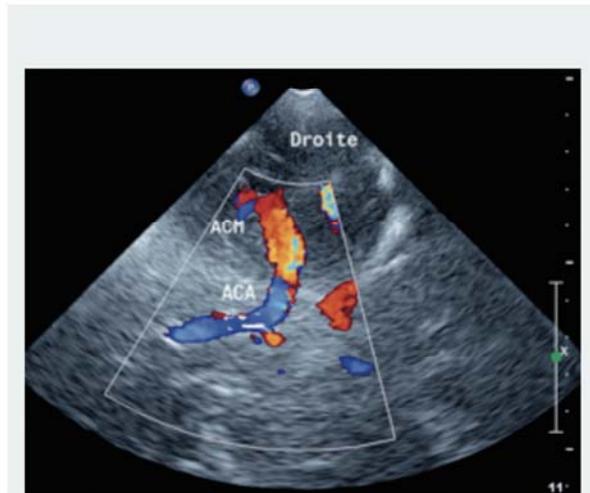


Figure 6 : Artère cérébrale antérieure (A1 et A2) (G Kercret)

L'ACP : Elle est divisée en 4 segments (P1 est le court segment situé avant l'AcoP- P2 est le segment post-communicant) (Figure 7). P1 et la portion proximale de P2 sont codés en rouge (Figure 18) - la portion distale de P2 est codée en bleu (Figure 8). L'ACP s'enroule autour des pédoncules cérébraux. Parfois le segment P1 est absent et l'ACP est directement alimentée par l'ACI ipsilatérale via l'AcoP. On parle alors de "polygone fœtal". Cette variante anatomique, souvent unilatérale, peut expliquer le passage d'embolies carotidiennes dans le territoire de l'ACP. Dans ce cas, l'AcoP est souvent de calibre équivalent aux autres artères intracrâniennes. L'AcoP n'est pas toujours visible, surtout chez les personnes âgées. Elle peut être absente. Son flux est lent et souvent dirigé vers le territoire basilaire, mais il peut être bidirectionnel.

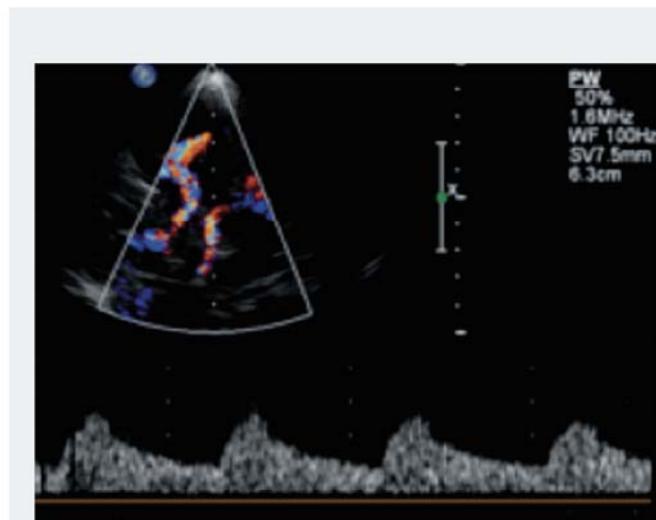


Figure 7 : Artère cérébrale postérieure (P1) (M. Sprynger)

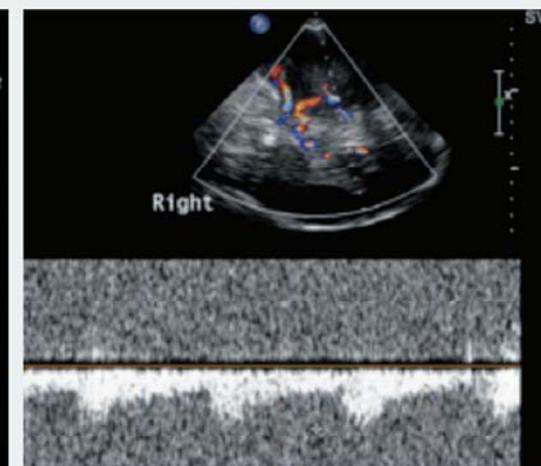


Figure 8 : Artère cérébrale postérieure (portion distale de P2) (M. Sprynger)

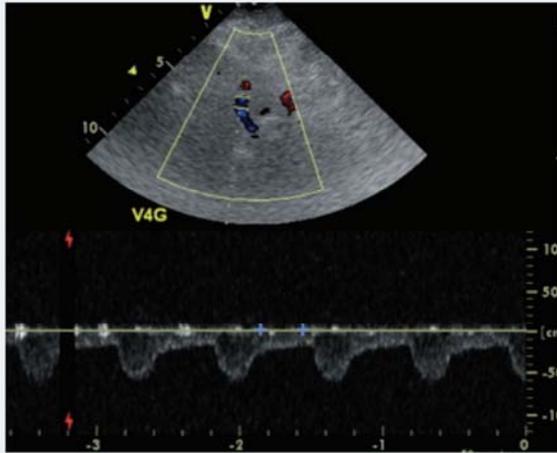


Figure 9 : Echo-Doppler couleur de l'artère vertébrale gauche (V4) (M. Sprynger)

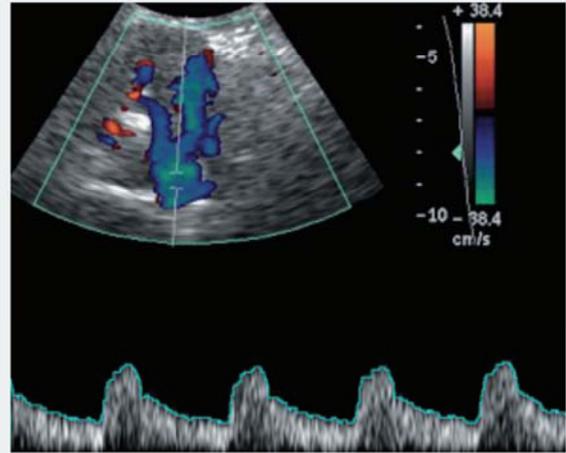


Figure 10 : Echo-Doppler couleur enregistré dans le tronc basilaire (G Kerret)

L'artère vertébrale est visible en V4. Son calibre est corrélé au calibre de l'artère vertébrale cervicale (V2). Le flux en V4 s'éloigne de la sonde et est codé en bleu (Figure 9). Les flux dans les artères cérébelleuses postéro-inférieures (PICA) sont dirigés en sens inverse et codés en rouge.

En cas d'hypoplasie de l'artère vertébrale en V2, sa terminaison se fait souvent en PICA et n'alimente pas le TB. L'IR mesuré en V2 ipsilatéral est alors augmenté par rapport au flux controlatéral.

Le TB commence au confluent des 2 vertébrales, à une profondeur d'environ 80 mm (Figure 10). Il est plus sinueux chez la personne âgée. Son flux est codé en bleu. L'artère cérébelleuse moyenne naît de la portion proximale du TB.

Les variantes anatomiques du polygone de Willis sont fréquentes et celui-ci n'est complet que dans 1/4 des cas. Les variantes les plus fréquentes sont l'hypoplasie ou l'absence d'une AcoP, de A1 et le "polygone fœtal". (voir figure 11 ci-dessous)

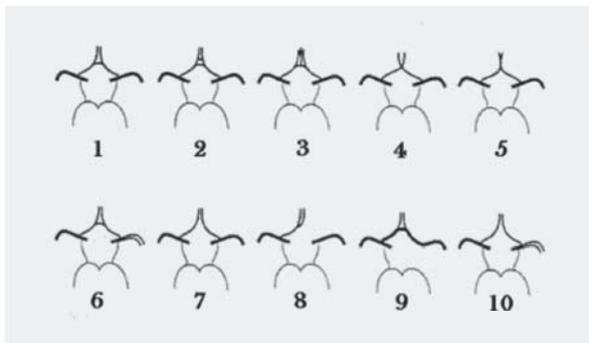


Figure 11 : Principales variantes anatomiques du polygone de Willis

ANNEXE 2 : BASES TECHNIQUES

MATÉRIEL

Le Doppler pulsé est la technique de référence pour le Doppler transcrânien. Il peut être réalisé à l'aveugle, guidé par la morphologie du flux, son sens et la profondeur du volume d'échantillon (DTC). Actuellement, le DTC est généralement couplé à une échographie (EDTC), ce qui permet de mieux localiser le site d'enregistrement. Il permet l'enregistrement et l'analyse simultanée du flux en temps réel. L'affichage de l'angle de tir Doppler (voir Annexe 3) permet une mesure objective des vitesses circulatoires.

Repérage des structures parenchymateuses et des artères en fonction de la fenêtre utilisée : la profondeur et la vitesse du flux des artères intra-crâniennes sont détaillées dans le Tableau 1. Des tableaux de référence peuvent être consultés dans l'article de Tegeler et al¹⁴. Avec l'âge, les vitesses diminuent et l'IP augmente. Chez la femme, les vitesses sont supérieures et l'IP inférieur à ceux de l'homme.

ARTERE	PROFONDEUR	moyVmax
M2	30-45 mm	< 80 cm/s
M1	45-65 mm	< 80 cm/s
A1	60-80 mm	< 80 cm/s
A2	45-65 mm	< 80 cm/s
SC	60-80 mm	< 70 cm/s
AO	40-60 mm	Variable
ACP	60-70 mm	< 60 cm/s
TB	80-120 mm	< 60 cm/s
V4	60-80 mm	< 50 cm/s

Tableau 1 : Profondeur et moyenne de Vmax (pour un angle d'incidence 0°)

FENÊTRE TEMPORALE

La sonde est placée sur la tempe du patient, en avant du tragus de l'oreille. En coupe transversale, mode B, sonde perpendiculaire au plan cutané, une structure peu échogène en "ailes de papillon" apparaît de part et d'autre de la ligne médiane (Figure 12). Il s'agit des 2 pédoncules cérébraux en avant desquels sont situées les méninges de la vallée sylvienne (Figure 13), hyperéchogène et battante. Les ACM sont visualisées en angulant légèrement la sonde vers le haut. L'ACM (M1) est parallèle à la petite aile du sphénoïde (Figure 14). Le segment M1 et les branches M2 sont codés en rouge (flux dirigé vers la sonde) (Figure 15). L'ACM contralatérale (M1) est codée en bleu (flux fuyant la sonde).

Par la fenêtre temporale, en obliquant la sonde vers le haut, on visualise la terminaison de l'ACI et sa division en A1 et M1 (Figure 16). En obliquant vers le bas, on peut visualiser le segment C2, et souvent C3 du SC.

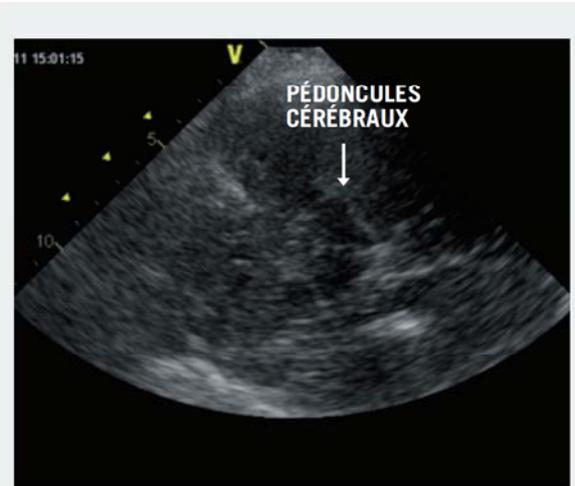


Figure 12 : Pédoncules cérébraux (échographie 2D) (M. Sprynger)

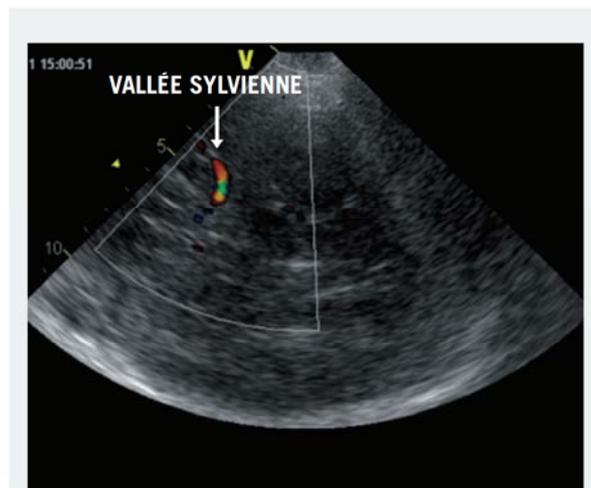


Figure 13 : Vallée sylvienne (M. Sprynger)

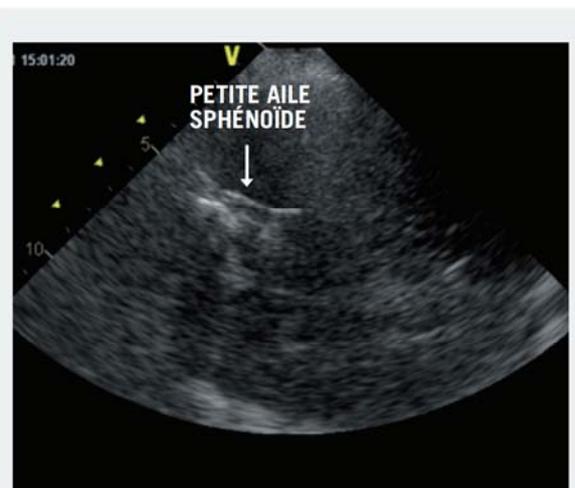


Figure 14 : Petite aile du sphénoïde



Figure 15 : Enregistrement du flux dans M1 par voie temporale (M Sprynger)

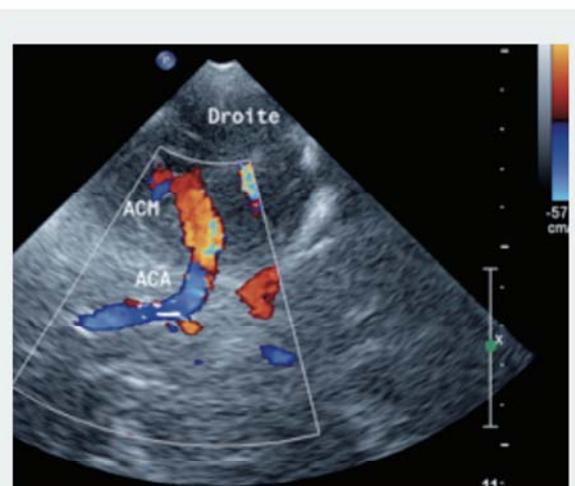


Figure 16 : Terminaison de l'ACI et sa division en A1 et M1 (Echo-Doppler couleur) (G Kercret)

Le segment A1 de l'ACA est plus difficile à capter et décrit une courbe concave dans le sillon inter-hémisphérique. Le segment A1 ipsilatéral est codé en bleu (Figure 17) et le segment controlatéral, en rouge. Le segment A2 apparaît souvent comme unique en raison de la faible résolution spatiale du codage couleur. Il est situé sur la ligne médiane. L'AcoA est difficile à visualiser sauf en cas d'hyperdébit (se traduisant par une accélération du flux) dû à une vicariance chez un patient présentant une sténose serrée ou une occlusion artérielle en amont ou lors d'une manœuvre de compression (Figure 18).

En angulant légèrement la sonde vers le bas, on peut individualiser le SC, l'ACP (P1 et P2) et l'ACoP. Les ACP contournent les pédoncules cérébraux. Le segment pré-communicant (P1) et la portion proximale de P2 (segment post-communicant) homolatéraux apparaissent en rouge (Figure 19). Le segment P2 distal ipsilatéral (Figure 20) et le segment P1 controlatéral apparaissent en bleu.

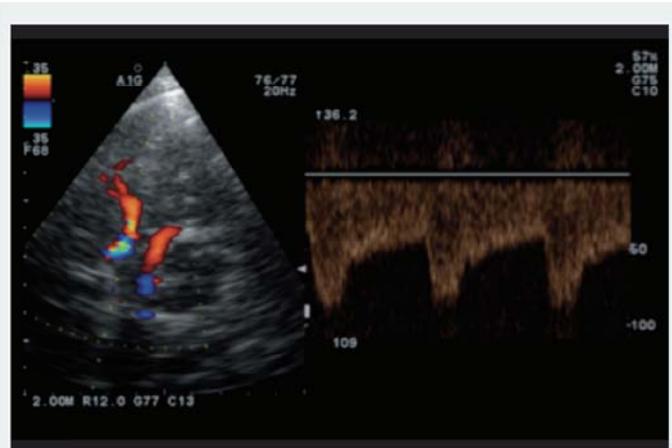


Figure 17 : Artère cérébrale antérieure (A1) (M. Sprynger)

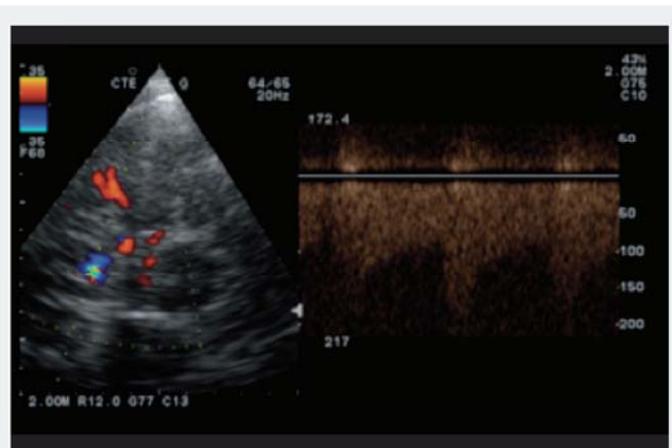


Figure 18 : Suppléance par la communicante antérieure (M. Sprynger)

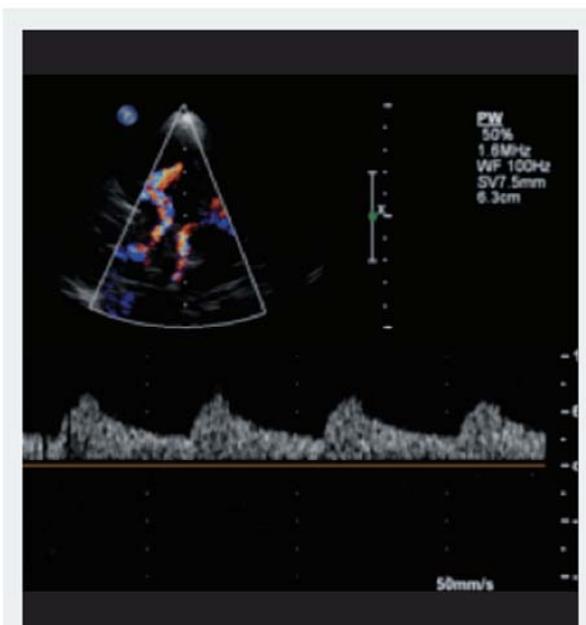


Figure 19 : Artère cérébrale postérieure (portion proximale de P2) (M. Sprynger)

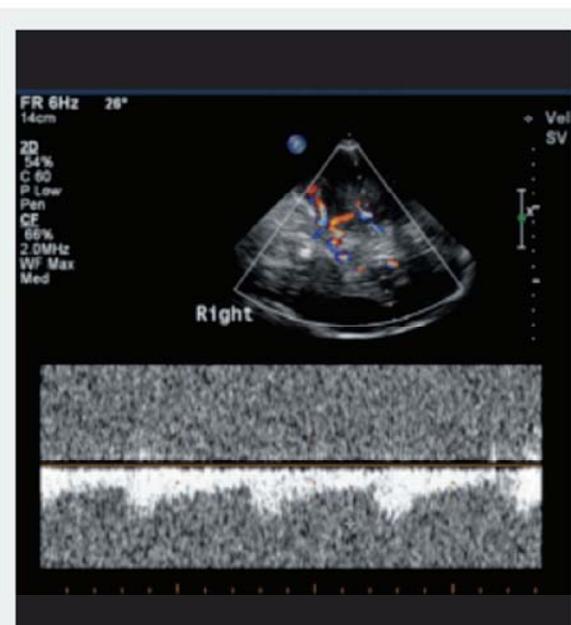


Figure 20 : Artère cérébrale postérieure (portion distale de P2) (M. Sprynger)

En orientant la sonde progressivement vers le bas à partir de la terminaison de l'ACI, il est souvent possible de visualiser les segments C1, C2 et C3 du SC (Figure 21). Les ACoP apparaissent souvent en bleu (flux dirigé du système carotidien vers le système vertébro-basilaire). Pour visualiser les artères communicantes, les manœuvres de compression peuvent être utiles. (voir Annexe 5). La fin du TB peut parfois être aussi visualisée.

FENÊTRE TRANS-ORBITAIRE

En raison de risques théoriques de cataracte induite (prouvés chez l'animal uniquement), cette voie d'abord n'est plus utilisée systématiquement surtout si la fenêtre temporale est de bonne qualité et permet l'étude du SC (C1, C2 et C3). Si l'examen transorbitaire est réalisé, il doit être bref, en limitant la puissance à 10% du niveau habituel (critères de la FDA : "spatial peak temporal average (SPTA) intensity" 17 mW/cm² et index mécanique 0,28). La portion distale de l'artère ophtalmique est située au bord interne du nerf à une profondeur de 3 à 5 cm (Figure 22). Le flux est normalement dirigé vers la sonde. Le SC (segments parasellaire, supra-clinoïdien et genou)

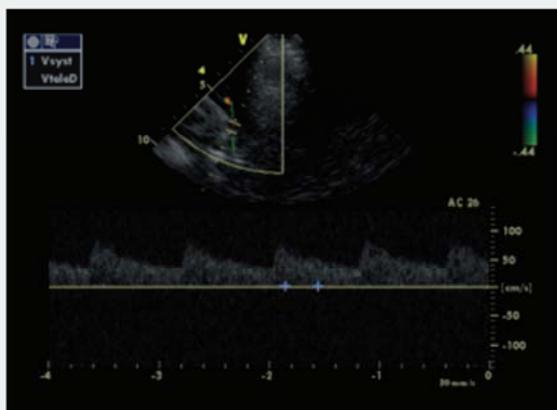


Figure 21 : Siphon carotidien (M. Sprynger)

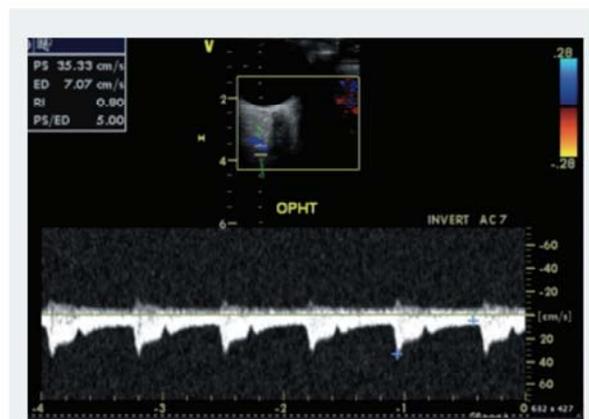


Figure 22 : Artère ophtalmique (M. Sprynger)

peut aussi être visualisé avec la sonde phased-array. Il est situé à une profondeur d'environ 60 mm (Figure 23).

FENÊTRE SOUS-OCCIPITALE (FORAMINALE)

La sonde est placée transversalement sous l'écaille occipitale, le patient ayant la nuque fléchie. Elle est dirigée vers la racine du nez, faisant apparaître la jonction bulbo-médullaire, qui est cylindrique. Sauf contre-indication à la mobilisation du patient, cet examen sera réalisé sur un patient assis (faisant face ou tournant le dos à l'examineur) ou en decubitus ventral (front appliqué sur la table d'examen). L'examen peut aussi être réalisé en decubitus latéral. En Doppler couleur, cette fenêtre permet de visualiser les segments intra-crâniens des artères vertébrales (V4) et la portion proximale du TB à une profondeur de 80 à 120 mm, avec un flux qui fuit la sonde. En l'absence de sinuosités, ces artères sont codées en bleu (Figure 24). Il est souvent possible de visualiser aussi les artères cérébelleuses postéro-inférieures (PICA), qui se dirigent vers la sonde et sont codées en rouge.

FENÊTRE FRONTALE

Cette fenêtre n'est pas de pratique courante. Elle nécessite l'utilisation de PdC.



Figure 23 : Siphon carotidien (M. Sprynger)

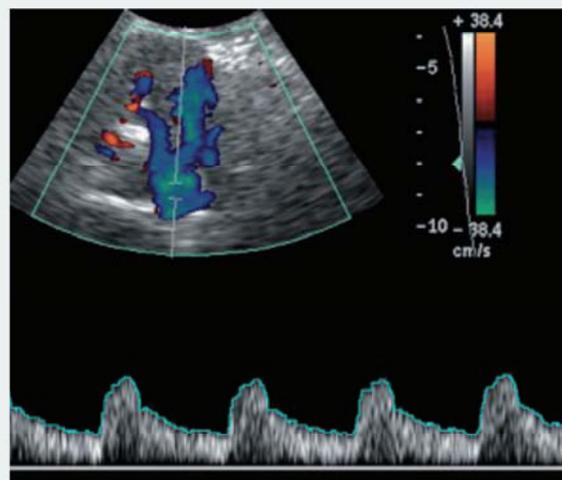


Figure 24 : Confluent vertébro-basilaire (V4 gauche et droite, origine du TB) (G Kercret)

ANNEXE 3 : GLOSSAIRE COMMENTÉ

ANGLE D'INCIDENCE (THÊTA)

angle d'incidence du faisceau d'ultrasons sur le vaisseau (schéma ci-dessous). Afin de réduire les erreurs de mesure de vitesse du flux, cet angle doit être $< 60^\circ$, puisque l'angle intervient par son cosinus dans le calcul de vitesse. En Doppler transcrânien, l'orientation des principales artères permet généralement de travailler avec un angle compris 0 et 30° . Celui-ci sera réduit au minimum (si possible 0°).

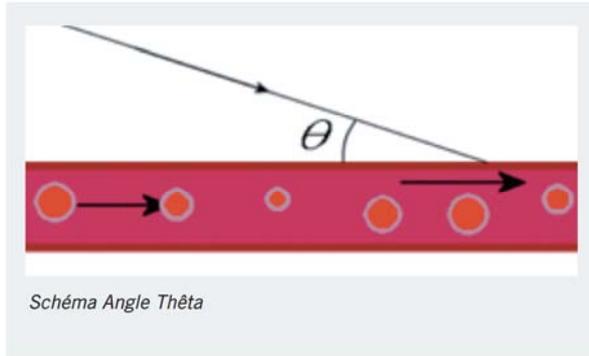


Schéma Angle Thêta

FENÊTRES D'EXPLORATION

- Fenêtre temporale qui explore les ACM, ACA et ACP, le SC et les ACoA et ACoP
- Fenêtre sous-occipitale ou foraminale qui explore la portion terminale des artères vertébrales (V4) et l'origine du tronc basilaire (TB) au travers du foramen magnum.
- Fenêtre trans-orbitaire qui explore l'AO et le SC.
- Fenêtre frontale qui est rarement utilisée et nécessite l'injection de PdC.

Dans 10 à 15% des cas, la fenêtre temporale est inaccessible au Doppler. Le problème est généralement bilatéral. En cas de difficulté, l'EDTC peut être couplé à une injection de PdC.

PARAMÈTRES DE VITESSES ¹⁵

- Vitesse ou Vitesse Systolique Maximale (VSM) - Vitesse Maximale Systolique (VMS) : pic de vitesse en systole (Peak Systolic Velocity – PSV).
- Vitesse TéléDiastolique (VTD) : vitesse diastolique maximale mesurée en toute fin de diastole (End-Diastolic Velocity – EDV)
- Vitesses moyennes : les abréviations utilisées dans la littérature française et anglo-saxonne sont parfois équivoques :
 - Vitesse moyenne : vitesse moyennée sur la section du vaisseau à un moment donné du cycle cardiaque
 - Moyenne des vitesses maximales (moyVmax) : TAMX (Time Averaged Mean of the maXimal velocities - Gautier C, Deklunder G), TAMV (Time Averaged mean of the Maximal Velocities), TAMM (Time Averaged Mean of the Maximal velocities - Alexandrov - drépanocytose, études STOP 1 et 2, Adams).

La moyVmax est utilisée dans le calcul de l'index de pulsativité de Gosling et le ratio d'Aaslid (voir ci-dessous) et afin de réduire les variations inter-individuelles, elle est parfois aussi utilisée pour l'analyse du signal Doppler notamment dans l'ACM et pour le diagnostic des sténoses intracrâniennes. (voir annexe 5). La vitesse du flux intra-crânien est maximale à l'âge de 6 ans (moyVmax 100 cm/s), puis diminue chaque année de 0,75 cm/s pour atteindre 40 cm/s à 75 ans. Chez la femme, la vitesse est supérieure de 3 à 5%. La différence homme/femme s'atténue avec l'âge. ¹⁶ Les variations individuelles peuvent toutefois être importantes.

- Moyenne des vitesses moyennes instantanées (moyVmoy) : TAV (Time Averaged Velocity) ou TAMm (Time Averaged Mean of the mean velocities) (Gautier C, Deklunder G), utilisée pour le calcul de débit.

- Temps d'Ascension Systolique (TAS) : temps qui sépare le début de la courbe systolique du point de sa valeur maximale

- Index de résistance de Pourcelot :

$$IR = \frac{VSM - VTDSM}{VSM}$$

- Index de pulsativité de GOSLING :

$$IP = \frac{VSM - VTDSM}{moyVmax}$$

- AASLID ratio :

$$Aaslid = \frac{moyVmax\ ACM}{moyVmax\ ACI\ homolatérale}$$

ANNEXE 4 : UTILISATION DE PdC : SONOVUE[®]

INDICATIONS

- en cas d'échogénicité insuffisante d'une fenêtre acoustique
- meilleur accès au territoire postérieur
- dans le cadre d'un suivi si les examens antérieurs ont utilisé du PdC (risque de surestimation des vitesses de 10 à 20% en cas d'utilisation de PdC)
- recherche ou suivi d'anévrisme, de MAV

CONTRE-INDICATIONS

- Hypersensibilité à l'hexafluorure de soufre ou à l'un des autres composants du Sonovue[®]
- Syndrome coronarien aigu récent, cardiopathie ischémique instable, insuffisance cardiaque aiguë, insuffisance cardiaque stade III ou IV, troubles du rythme sévère
- Shunt droit-gauche
- HTA pulmonaire sévère (PA pulmonaire > 90 mm Hg)
- HTA systémique non contrôlée
- Syndrome de détresse respiratoire
- Grossesse ou allaitement
- Âge < 18 ans

MÉTHODOLOGIE : 2,4 ML SOIT ½ FLACON

- Injection iv lente pour renforcement et cartographie en mode couleur ou puissance ou Bolus + rinçage pour une approche morphologique
- Le gain acoustique et l'index mécanique doivent être réduits au maximum juste après l'injection puis augmentés progressivement au cours de l'examen afin d'éviter une saturation du flux couleur liée au réhaussement. Ce réglage permet en outre de conserver plus longtemps les microbulles et d'obtenir un ré-haussement de bonne qualité et fiable durant plusieurs minutes (5 à 10 minutes).

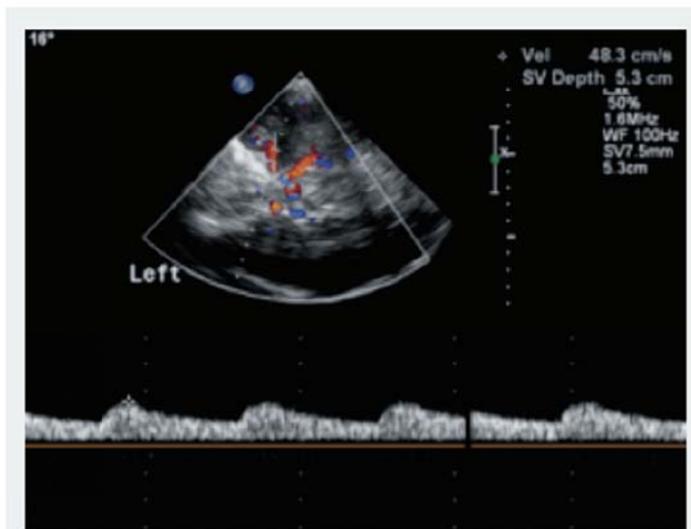


Figure 25 : Amortissement du flux Doppler en M1 (M. Sprynger)

ANNEXE 5 : DESCRIPTIF LÉSIONNEL

Bilan du retentissement des lésions des ACE (en cas de maladie athéromateuse, dysplasie fibro-musculaire ou dissection artérielle) : le retentissement hémodynamique d'une sténose serrée ou d'une occlusion carotidienne ou vertébrale peut être évalué par EDTC. La morphologie du flux intra-crânien tient compte de la participation du polygone de Willis.

Dans le territoire carotidien, c'est l'ACM qui est la plus accessible, c'est donc elle qui sera surtout étudiée. Le retentissement hémodynamique d'une lésion cervicale se traduira par un amortissement du flux avec diminution de la VSM, allongement du TAS et diminution de l'IR (Figure 25). Afin de réduire les variations inter-individuelles, certains utilisent la moyenne des vitesses maximales (moyVmax) enregistrée dans le segment M1

proximal avec un angle d'incidence minimal (si possible égal à 0). On la compare à la moyVmax (Annexe 3) enregistrée dans le segment M1 proximal controlatéral (ou à la moyVmax observée chez les sujets normaux d'une même tranche d'âge en cas de sténose cervicale bilatérale). Une asymétrie de vitesse > 30% est considérée comme significative.

Un allongement isolé du TAS en M1 témoigne d'une compensation suboptimale mais de bonne qualité. (tableau 2)

En cas d'asymétrie significative du flux en M1, on recherchera la cause d'une suppléance inefficace (polygone incomplet, sténose intra-crânienne, lésion cervicale sur un autre axe) par l'enregistrement de toutes les artères du polygone sur toute leur longueur accessible afin de détecter une variante anatomique ou une sténose éventuelle et de préciser le sens circulatoire dans les différents segments y compris les artères communicantes. On recherchera une 2e lésion sur le même axe, notamment dans le SC ("lésion en tandem").

VSM	TAS	IR	COMPENSATION
Symétrique	Normal	Symétrique	Absence de retentissement ou excellente suppléance
Symétrique	Allongé		Bonne compensation
< 2/3 VMS controlatérale			Compensation moyenne
< 1/3 VMS controlatérale	Allongé	Abaissé	Compensation médiocre

Tableau 2 : Evaluation du retentissement hémodynamique d'une lésion cervicale par enregistrement DTC en M1



Figure 26 :
Mise en jeu
de l'ACoA (schema)



Figure 28 :
Occlusion d'ACI
et mise en jeu
de l'ACoP ipsilatérale
(schema)



Figure 27 : Occlusion d'ACI gauche avec inversion du flux dans l'A1 ipsilatérale (G Kercret)



Figure 29 : Polygone fœtal avec amortissement du flux en P2 lors de la compression de l'ACI ipsilatérale (M. Dauzat)

En cas de sténose serrée ou d'occlusion de l'ACI (Figure 26), la mise en jeu de l'ACoA se traduit par une inversion du flux dans le segment A1 ipsilatéral à la lésion (flux positif rouge) (Figure 27) et par une accélération du flux dans les 2 segments A1 et dans l'ACoA (vitesse A1 > vitesse ACM ipsilatérale) avec apparition de turbulences. La mise en jeu de l'ACoP ipsilatérale, quant à elle, se traduit par une accélération du flux dans le segment P1 ipsilatéral et par une inversion du flux dans l'ACoP (flux dirigé de l'arrière vers l'avant) (Figure 28). En cas de "polygone fœtal", l'ACP est vascularisée par l'ACI. Une lésion de l'ACI ipsilatérale peut alors être à l'origine d'un AIC dans le territoire sylvien, mais aussi cérébral postérieur ipsilatéral. La compression de l'ACI ipsilatérale amortit le flux en P2-P3 (Figure 29). (voir ci-dessous "manœuvres de compression"). L'AO est une branche du SC. En cas de sténose serrée ou d'occlusion de l'ACI ipsilatérale en amont du SC, la pression diminue dans l'AO qui peut alors être alimentée ainsi que le SC par le réseau de l'artère CE. On enregistre une inversion du flux dans l'AO (Figure 30).

Pour des raisons évidentes, les ACE participant à la collatéralité devront être étudiées avec soin. L'ensemble des données fournies par un examen minutieux, si possible couplé à une étude de la réactivité vasomotrice (voir ci-après), permettra de

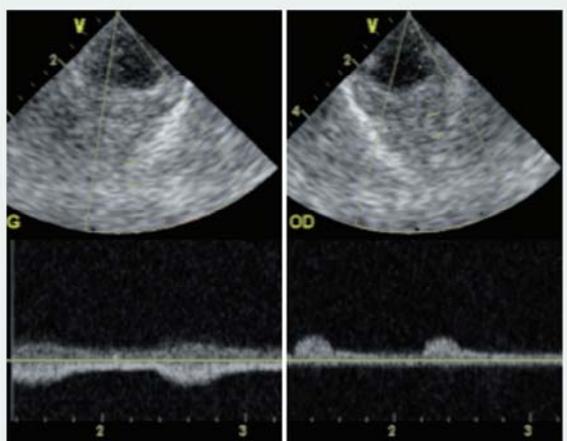


Figure 30 : Occlusion d'ACI gauche avec inversion du flux ophthalmique ipsilatéral (M Sprynger)

mieux évaluer le risque ischémique d'une sténose cervicale en cas d'aggravation de la lésion (occlusion par exemple) ou de variation hémodynamique (hypotension artérielle, trouble du rythme cardiaque, chirurgie par exemple). La recherche de micro-embolies (MES-HITS) peut apporter des informations sur le risque embolique de la lésion (voir ci-après). Une diminution de la VSM dans l'ACM sans allongement

du TAS et en l'absence de lésion carotidienne intra- ou extra-crânienne ou de lésion du tronc de l'ACM doit faire suspecter l'occlusion de plusieurs branches distales de l'ACM.¹⁷ Selon Ogata et al, si la VTD est <25cm/s et le rapport télédiastolique (end-diastolic ratio : VTD ACM controlatérale/VTD ACM ipsilatérale) ≥2.7, l'ACM est occluse. Si la VTD est <25 cm/s et le rapport télédiastolique <2.7, il s'agit d'une occlusion de branche.¹⁸ Les études portent sur de petites populations.

BILAN DE SUPPLÉANCE ET MANŒUVRES DE COMPRESSION

Elles permettent de détecter les artères communicantes et d'évaluer le potentiel de collatéralité du patient (Figure 31). En raison du risque d'embolisation à partir d'une plaque carotidienne lors de la manœuvre de compression, celle-ci sera appliquée au niveau de la portion proximale de l'ACC, après avoir exclu par écho-Doppler couleur, la présence d'une plaque à risque au site de compression.

- Présence de l'ACoA : la compression de l'artère carotide commune (ACC) ipsilatérale crée une inversion et une accélération du flux en A1. La compression de l'ACC controlatérale crée une accélération du flux en A1 sans inversion du flux.
- Présence de l'ACoP : si l'artère cérébrale postérieure (ACP) supplée le territoire carotidien, la compression de l'ACC ipsilatérale provoque une accélération de l'ACP en P1 et une inversion du flux dans l'ACoP sauf si l'ACoA permet de maintenir le gradient de pression en faveur du territoire sylvien. Une fois sur deux, l'ACoP n'existe que d'un côté.
- Polygone foetal : une fois sur dix l'ACP prend son origine dans l'ACI ("carotide foetale"). Dans ce cas, la compression de l'ACC ipsilatérale induit une réduction de la vitesse en P2.
- Pour évaluer l'efficacité de la suppléance, on peut enregistrer le flux dans l'ACM lors de la compression de l'ACC ipsilatérale :
 - Le flux reste stable ou augmente en cas de très bonne suppléance
 - Le flux s'effondre si la suppléance est inefficace
 - Si le flux diminue sans s'effondrer, on considère que si la VSM chute de 50%, l'occlusion de l'ACI sera mal tolérée.

Ces manœuvres évaluent le risque de bas débit lors de modifications hémodynamiques, mais évidemment pas le risque embolique.

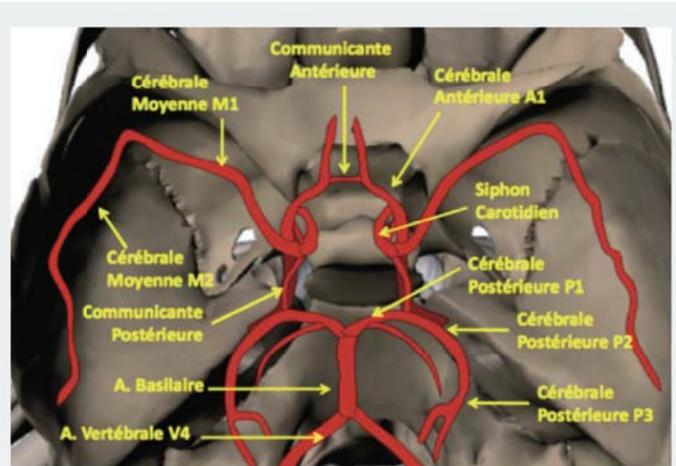


Figure 31 : Schéma anatomique du polygone de Willis et des artères qui en dépendent.

COGIF grade	Hemodynamic pattern	Example
1	No flow	
2	Low flow velocities without diastolic flow	
3	Low flow velocities with diastolic flow	
4	Established perfusion:	
	a) flow velocities equal to contralateral side	
	b) high focal flow velocities (i.e. stenosis)	
	c) high segmental flow velocities (hyperperfusion)	

Tableau 3 : Score de COGIF

REPERFUSION SPONTANÉE OU APRÈS THROMBOLYSE

L'EDTC éventuellement couplé à une injection de PdC permet de surveiller la reperfusion spontanée ou après thrombolyse et peut être d'une grande aide en cas de détérioration clinique du patient. A l'instar des coronarographistes et du score TIMI, Demchuk et al.¹⁹ ont proposé le score TIBI (Thrombolysis In Brain Ischemia) basé sur l'étude du flux Doppler en aval d'une occlusion d'ACM (M1) ou du TB avant et après thrombolyse (0 = absence de flux- 5 = flux normal). En raison de la difficulté et de la relative subjectivité de ce score, surtout entre score 1 et 3, le score de COGIF (Grading Intracranial Flow Obstruction) a été proposé (Tableau 3) :

- 1 = absence de flux : occlusion de M1 (diagnostic différentiel : fenêtre anéchogène, occlusion de l'ACI terminale)
- 2 = flux de butée et 3 = flux continu modeste : recanalisation partielle de M1 ou de l'ACI terminale, occlusion distale de M1 ou de ses branches
- 4 = perfusion
 - flux normal
 - flux sténotique : accélération focale
 - flux accéléré sur toute la longueur de M1 : hyperperfusion²⁰

Des travaux récents ont aussi montré que l'application prolongée d'ultrasons potentialise l'effet de la thrombolyse (effet thérapeutique des ultrasons).

EDTC VERTÉBRO-BASILAIRE

Il permet d'étudier les segments V4 des artères vertébrales et la partie proximale du TB. Il ne peut détecter que les sténoses $\geq 60^\circ$. Cet examen comporte quelques pièges dont il faut être conscient :

- La présence de boucles sur le trajet de V4 peut être responsable d'une "pseudo-accélération" du flux Doppler pouvant en imposer pour une sténose
- Une sténose du TB peut être trop distale pour être enregistrée
- L'absence de signal sur le trajet présumé du TB peut correspondre à une occlusion du TB, mais aussi à une absence de fenêtre acoustique postérieure ou à une anomalie du trajet du TB
- La non-perception du flux en V4 correspond à une agénésie ou à une occlusion de V4
- L'inversion du flux en V4 est due à une occlusion ou subocclusion vertébrale en amont (V3).

Outre l'évaluation des répercussions hémodynamiques des lésions des artères vertébrales (dans leur portion cervicale et intracrânienne) et de la portion proximale du TB, l'EDTC trouve une indication particulièrement intéressante dans l'exploration des hémodétournements vertébro-sous-claviers en complément de l'ED des ACE. Il est alors couplé à une manœuvre d'hyperhémie du membre supérieur, manœuvre utile dans la décision de revasculariser une artère sous-clavière (voir ci-dessous).

TEST D'HYPERHÉMIE DU MEMBRE SUPÉRIEUR

L'exploration d'un hémodétournement vertébro-sous-clavier dû à une sténose d'artère sous-clavière pré-vertébrale comprend l'enregistrement des 2 artères vertébrales en V4 et du TB.

Le test d'hyperhémie du membre supérieur consiste à comprimer par brassard pendant 1 à 2 minutes, l'artère humérale ipsilatérale en demandant au patient d'effectuer des mouvements d'ouverture et fermeture de la main. Au relâchement du brassard, le vol vertébral s'accroît dans l'artère vertébrale ipsilatérale (V2, V3 et V4). Le flux peut aussi être enregistré en P1 ipsilatéral et à l'origine du TB afin d'évaluer les répercussions hémodynamiques intracrâniennes d'un hémodétournement vertébro-sous-clavier. C'est le vol dans le TB qui devra être pris en compte avant de proposer éventuellement une revascularisation de l'artère sous-clavière voleuse. (Figures 32 et 33, enregistrées chez 2 patients différents).

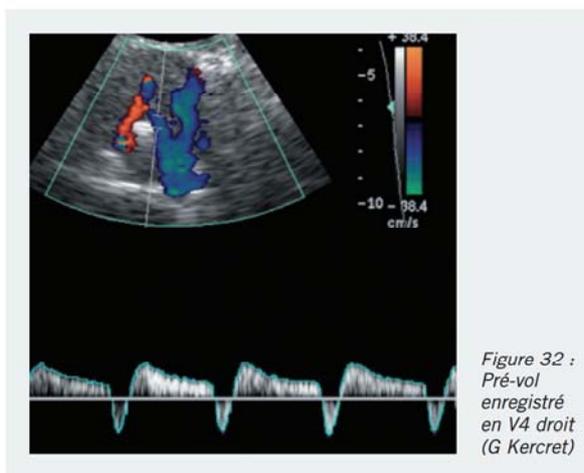


Figure 32 : Pré-vol enregistré en V4 droit (G Kercret)

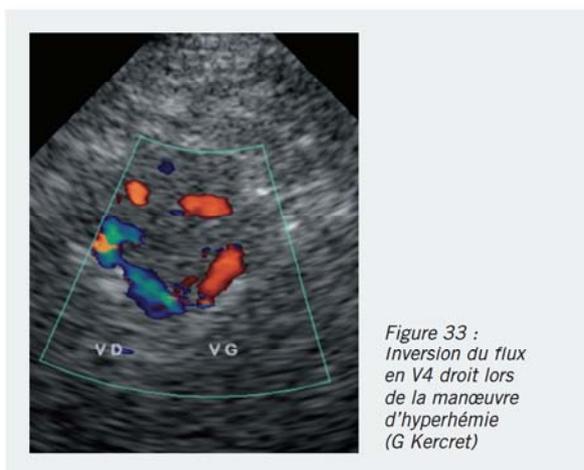


Figure 33 : Inversion du flux en V4 droit lors de la manœuvre d'hyperhémie (G Kercret)

SURVEILLANCE DU VASOSPASME EN CAS D'HSA

Le vasospasme, localisé ou diffus, apparaît entre le 3e et le 6e jour et se traduit par une accélération du flux Doppler. L'EDTC permet donc de le détecter, d'en évaluer la sévérité, de suivre son évolution et d'évaluer la réponse au traitement. (Tableau 4). Selon Lindegaard,²¹ une moyVmax ≥ 200 cm/s dans l'ACM correspond à un vasospasme sévère (diamètre résiduel < 1 mm).

Tronc d'ACM	moyVmax
Vasospasme discret	80-130 cm/s
Vasospasme modéré	130-200 cm/s
Vasospasme sévère	> 200 cm/s
SC	
Vasospasme discret	> 90 cm/s
Vasospasme significatif	> 130 cm/s
ACA	
Vasospasme discret	> 80 cm/s
Vasospasme significatif	> 130 cm/s

Tableau 4 - Vasospasme – Critères de vitesse (d'après Gautier C et Deklunder G)

Afin de distinguer vasospasme et hyperhémie cérébrale (tous 2 à l'origine d'une augmentation des vitesses), il est recommandé de calculer l'indice d'Aaslid (ratio de Lindegaard) : moyVmaxACM/moyVmaxACI cervicale ipsilatérale) (Tableaux 5 et 6).

INDICE D'AASLID	INTERPRETATION
1,7 ± 0,4	Normal
< 3	Hyperhémie
3-6	vasospasme modéré
> 6	vasospasme sévère

Tableau 5 : INDICE D'AASLID

VMOY DANS L'ACM	INDEX D'AASLID	DIAGNOSTIC
< 120 cm/s	< 3	Pas de vasospasme
> 120 cm/s	3-6	Vasospasme modéré
> 200 cm/s	> 6	Vasospasme important

Tableau 6 : Critères de vasospasme dans l'ACM (d'après Alexandrov A et Neumyer M)

Toutefois, le facteur prédictif le plus important de survenue d'un déficit ischémique différé c'est l'augmentation quotidienne de la moyVmax (probabilité de 60% si l'augmentation quotidienne de la vitesse atteint 50 cm/s). (Tableau 7).

PARAMETRES	VALEURS
Vitesse	Apparition précoce d'une moyVmax ≥ 180 cm/s Augmentation rapide journalière (> 20% ou + > 65 cm/s) de la moyVmax du 3e au 7e jour Ratio moyVmax ACM/
Ratio	moyVmax CI ≥ 6
Pulsatilité	Pulsatilité Apparition rapide d'une haute résistance IP ≥ 1,2 (hydrocéphalie, vasospasme)

Tableau 7 : Critères prédictifs d'évolution péjorative en cas de vasospasme (d'après Alexandrov A et Neumyer M)

REMARQUES

- Exceptionnellement, le spasme est uniquement distal et ne pourra pas être mesuré directement, mais il se traduira par une augmentation des résistances d'amont.
- En raison de son anatomie, l'ACA est moins accessible au DTC et la rupture de micro-anévrysmes de A1 ou de l'ACoA peut occasionner des spasmes limités à l'A2 distale, inaccessibles au DTC. Le TB et les V4 sont plus accessibles. A ce niveau, on peut évoquer un spasme quand la moyVmax est > 80 cm/s pour V4 et 95 cm/s pour le TB.
- Il n'est pas rare que les HSA graves s'accompagnent d'hypertension intra-crânienne (HTIC). Dans ce cas,

l'augmentation de pression intra-crânienne (PIC) réduit la vitesse dans les artères intra-crâniennes. Pour détecter ce risque de "faux positif", il est important de mesurer l'IR de Pourcelot. Si l'IR est > 0,6, les vitesses ne reflètent plus le vasospasme. S'il est < 0,5, les vitesses reflètent le vasospasme.

- Il existe d'autres étiologies rares au vasospasme (artérite...).

ARRÊT CIRCULATOIRE CÉRÉBRAL ET MORT CÉRÉBRALE

L'élévation importante de la pression intracrânienne (PIC) réduit la vitesse télédiastolique dans les vaisseaux intra-crâniens, parfois jusqu'à l'arrêt circulatoire complet (Figure 34). Si la PIC est proche de la pression artérielle diastolique (PAd), le flux diastolique diminue, puis s'annule. Si la PIC continue à augmenter, le flux diastolique s'inverse, puis à son tour, le flux systolique diminue et s'annule dans les artères cervicales et intracrâniennes.

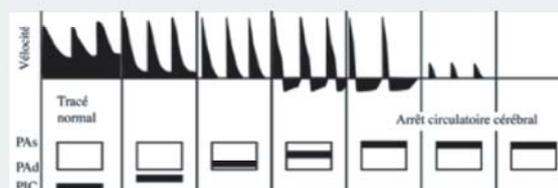


Figure 34 : Evolution du profil de flux en cas d'arrêt circulatoire cérébral.

Toutefois, un arrêt circulatoire cérébral n'est pas synonyme de mort cérébrale (MC), car il peut être réversible en cas d'augmentation brutale et brève de la PIC. Le DTC aidera à planifier au mieux la demande de scanner cérébral, mais ne permettra pas d'affirmer le diagnostic de MC ! Il peut être utilisé chez l'adulte et l'enfant de plus de 6 mois.

Sur base de la littérature, A. Alexandrov propose les critères suivants en cas de suspicion d'arrêt circulatoire cérébral :

- Flux télédiastolique + dans l'ACM ou le TB : pas d'arrêt circulatoire cérébral
- Absence de flux télédiastolique : arrêt circulatoire cérébral incertain
- Inversion minimale du flux télédiastolique : arrêt circulatoire possible (continuer le monitoring)
- Flux pendulaire (bi-directionnel) : arrêt circulatoire cérébral probable (à confirmer dans les 2 ACM à 50-60 mm de profondeur et dans le TB à 80-90 mm de profondeur, puis monitorer pendant 30 minutes pour éviter les faux positifs, en évitant d'interroger les bifurcations).

STÉNOSE INTRA-CRÂNIENNE

Une sténose intracrânienne peut être suspectée en Doppler couleur ou en Doppler puissance, surtout lors de l'injection de PdC. En Doppler pulsé, elle est caractérisée par une élévation segmentaire de la vitesse avec ou sans turbulences. En cas de sténose serrée, on observe un amortissement de la vélocimétrie et une démodulation du flux d'aval. Les critères Doppler déterminant une sténose intra-crânienne $\geq 50\%$ sont une moyVmax ≥ 80 cm/s et une différence de vitesse $\geq 30\%$ par rapport au contrôle controlatéral (sensibilité 86%- spécificité 99%) sans autre étiologie. D'autres critères sont retenus pour une sténose $\geq 50\%$: moyVmax ≥ 100 cm/s et rapport de vitesse intra- et pré-sténotique ≥ 2 ²². On peut aussi utiliser la VSM après correction angulaire (Tableau 8).

ARTÈRE	VITESSE SYSTOLIQUE MAXIMALE	
	Sténose < 50%	Sténose $\geq 50\%$
ACA	≥ 120 cm/s	≥ 155 cm/s
ACM	≥ 155 cm/s	≥ 220 cm/s
ACP	≥ 100 cm/s	≥ 145 cm/s
TB	≥ 100 cm/s	≥ 140 cm/s
AV	≥ 90 cm/s	≥ 120 cm/s

Tableau 8 : Sténose intra-crânienne - Critères de vitesse (VSM) (d'après Baumgartner RW, Mattle HP et Schroth G)²³

Pour les sténoses du siphon carotidien, on utilise souvent la moyVmax (>120 cm/s).

Les sténoses distales correspondent souvent à des lésions emboliques. Elles disparaîtront spontanément. Lors de la reperméabilisation spontanée ou après thrombolyse, on peut enregistrer une augmentation transitoire des vitesses, due à l'hyperhémie secondaire,²⁴ mais contrairement à une sténose, cette accélération sera diffuse, sans turbulence et transitoire.²⁵ (voir Score de COGIF – Annexe 5).

Il existe aussi d'autres causes d'accélération du flux : flux de suppléance, vasospasme, reperfusion. Le diagnostic différentiel est important.

OCCLUSION D'ARTÈRE INTRA-CRÂNIENNE

En l'absence de visualisation de l'ACM alors que les repères anatomiques sont bien visibles en mode B et les autres artères intra-crâniennes bien visibles en Doppler couleur, il faut suspecter une occlusion de l'ACM proximale. L'injection de PdC peut souvent aider. Le diagnostic est encore plus difficile en cas d'occlusion distale, qui peut se traduire par une diminution inexpliquée de la vélocité dans l'ACM sans allongement du TAS, mais réduction de l'IR.

DÉTECTION DES MICRO-EMBOLES (MES) OU HITS (HIGH INTENSITY TRANSIENT SIGNALS)

Il s'agit de signaux d'intensité élevée (min 6 dB de plus que le flux sanguin), de brillance élevée sur le tracé Doppler et de courte durée (40 à 100 ms). Ils sont asymptomatiques, indépendants du rythme cardiaque et bien audibles (Figure 35). Les emboles peuvent être gazeux ou solides (débris de plaque athéromateuse, thrombus, graisse...). Ils peuvent être enregistrés "par hasard" lors d'un examen de routine ou "comptabilisés" lors d'un monitoring (analyse informatique et humaine). Ils constituent des "marqueurs de risque" d'AIC lors d'un pontage aorto-coronaire, d'une TEA ou d'un stenting carotidien ou en cas de sténose carotidienne. Il est donc important de pouvoir les reconnaître.

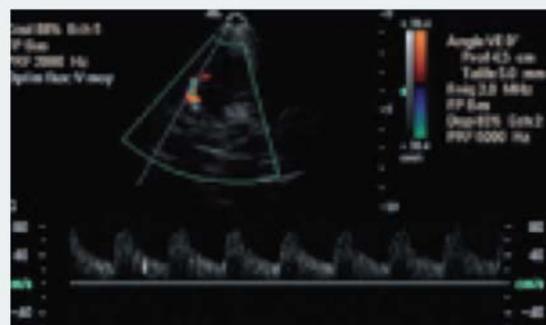


Figure 35 : Sténose d'ACI avec HITS (M Dautat)

En cas de plaque carotidienne ou aortique instable, la recherche de HITS nécessite un temps d'enregistrement prolongé (environ 1 h en cas de sténose carotidienne voire plus longtemps : 3 à 5 heures avec le Holter-Transcranien) et donc, généralement, un matériel adapté de type "monitoring". En cas de sténose carotidienne critique asymptomatique, l'enregistrement de plus de 2 MES/h dans l'ACM correspond à un risque neurologique accru.

RECHERCHE DE SHUNT DROIT-GAUCHE (NOTAMMENT EN CAS DE FOP¹¹)

La procédure consiste à injecter dans une veine du pli du coude (basilique ou céphalique), un bolus de 9 cc de LP mélangé à 1 cc d'air aspiré au travers d'un filtre bactérien (ou un bolus de 10 cc de LP) et préalablement "agité" par le transfert rapide (10 "va-et-vient") entre 2 seringues reliées par un robinet à 3 voies. L'utilisation

du SONOVUE[®] n'est pas autorisée dans cette indication. En cas de shunt intra- ou extra-cardiaque droit-gauche, les microbulles ainsi produites seront enregistrées sous formes HITS dans les ACM (Figure 36). Si l'épreuve est négative, on refera l'injection lors d'une manœuvre de Valsalva de 10" (injection 5" après le début de la manœuvre). L'efficacité du Valsalva est vérifiée par l'augmentation de la vitesse du flux.²⁶ L'enregistrement durera au moins 20". L'importance du shunt est évaluée en fonction du nombre de microbulles détectées :

- 0 : pas de shunt
- 1-10 : shunt minime
- 11-25 : shunt modéré
- pas de comptage possible : "curtain" (rideau) : shunt massif

Après un AIC, l'enregistrement de plus de 10 microbulles est prédictif de récurrence. La sensibilité de ce test est excellente surtout si l'enregistrement est bilatéral. Contrairement à l'échocardiogramme-trans-œsophagien (ETO), il ne permet pas de préciser si le shunt est intra- ou extra-cardiaque, mais son grand avantage par rapport à l'ETO est sa meilleure tolérance, une meilleure collaboration du patient et l'absence de risque et de sédation. Cet examen permet aussi d'assurer le suivi après fermeture du FOP.

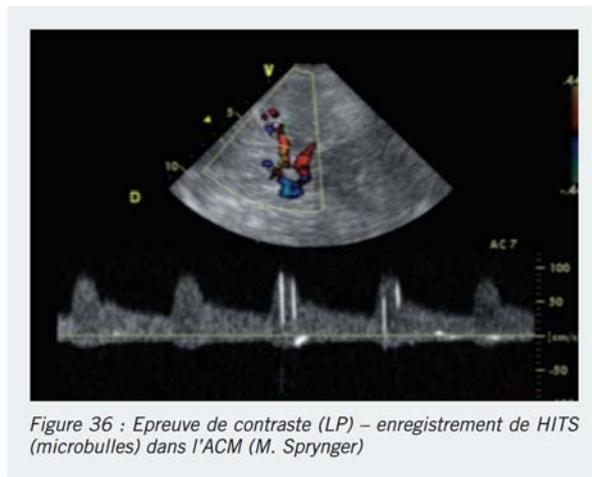


Figure 36 : Épreuve de contraste (LP) – enregistrement de HITS (microbulles) dans l'ACM (M. Sprynger)

TRAUMATISME CRÂNIEN

L'EDTC peut détecter au lit du patient et de façon non invasive, les répercussions hémodynamiques d'une augmentation de la PIC après un traumatisme crânien sévère. Si nécessaire, on aura recours au PdC.

Puisque la vitesse télédiastolique est la plus sensible aux variations de PIC, le critère le plus utilisé en réanimation est l'IP (voir annexe 3) dans les ACM et ACI terminales.

L'IP diminue proportionnellement à la pression de perfusion cérébrale (PPC). Sa valeur normale est $1 \pm 0,2$. L'EDTC peut s'intégrer aux examens cliniques et para-cliniques, mais ne pourra pas remplacer la mise en place d'une PIC.

Certains pièges doivent être évités :

- En cas de craniectomie de décompression, le flux diastolique persiste dans la majorité des cas.
- Le flux diastolique est abaissé en cas d'insuffisance aortique sévère ou en présence d'une contre-pulsation aortique.

EVALUATION DE LA RÉSERVE VASOMOTRICE CÉRÉBRO-VASCULAIRE (VASORÉACTIVITÉ CÉRÉBRALE- VRC)

Le test de VRC est un outil d'évaluation de la capacité adaptative résiduelle des vaisseaux intracrâniens à maintenir un débit cérébral satisfaisant lors de variations de la pression artérielle ou de la pression de perfusion cérébrale. La VRC peut être altérée par l'âge, l'HTA ou le diabète. Dans ce cas, l'altération est souvent diffuse (ACM, TB). La VRC peut aussi être altérée du fait d'une sténose ou d'une occlusion artérielle en amont. Une méta-analyse récente a montré que chez les porteurs de sténose $\geq 70\%$ ou d'occlusion d'ACI cervicale, le risque d'AIC ou d'AIT à 1 an était accru en cas d'altération de la VCR (OR 3,96- IC 2,6-6,04).²⁷ L'étude de la VRC devrait donc être couplée à l'évaluation des sténoses d'ACI $\geq 70\%$ afin de mieux évaluer leur risque neurologique.

Breath Holding Test (BHT)²⁸ : l'examen doit être réalisé dans le calme, sur un patient couché yeux fermés depuis une dizaine de minutes. On mesure la VSM, la VTD, la moyVmax et l'IR sur 3 à 5 systoles à l'état basal. Ensuite, on demande au patient de tenir l'apnée pendant 20 à 30" en évitant d'inspirer profondément avant et après l'apnée. Cette manœuvre fait apparaître une hypercapnie. Lorsque le plateau est atteint (augmentation progressive de la VSM, de la VTD, de la moyVmax et diminution de l'IR), on mesure la variation des paramètres du flux (Figure 37). On calcule le Breath Holding Index (BHI) : $BHI = \% \text{ d'augmentation de moyVmax (moyVmax maximale - moyVmax basale / moyVmax basale)}$ divisé par le temps de suspension respiratoire exprimé en secondes. Le BHI normal est égal à $1,42 \pm 0,13$ (Markus 1992) et $1,20 \pm 0,6$ (Widder 2001). Sous suspension respiratoire, la VTD est multipliée par 1,45, la moyVmax par 1,39 et la VSM par 1,27 chez des individus de 26 ans d'âge moyen (Settakis 2002).

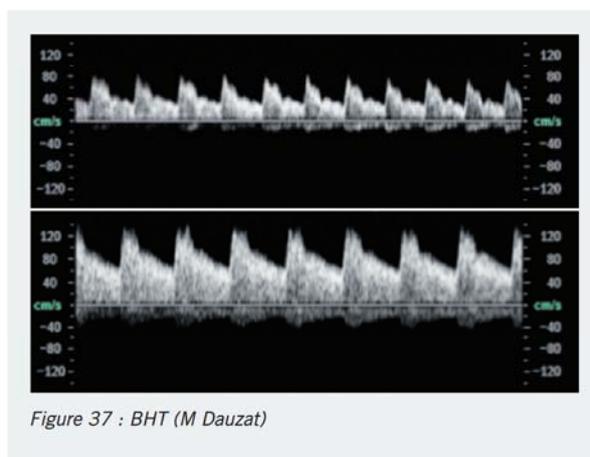


Figure 37 : BHT (M. Dauzat)

On peut aussi induire une vasoconstriction par hyperventilation (inspiration-expiration profondes et rapides pendant 15 à 20") et hypocapnie. Ce test est actuellement reconnu comme un bon test de première intention. La chute de moyVmax se situe normalement entre 35 et 50%. Une réduction de 15% est considérée comme valeur-seuil²⁹.

En cas de doute, la VRC peut éventuellement être étudiée par inhalation de Carbogène (5% CO₂, 95% O₂) ou par le test de stimulation au Diamox^o (acétazolamide). On préférera le 1e test au 2e en raison de l'effet vasoconstricteur de l'acétazolamide sur le polygone de Willis.

DRÉPANOCYTOSE

Depuis les études STOP 1 et 2, l'EDTC est devenu un examen de référence dans la prévention des AIC chez les enfants drépanocytaires. L'HAS¹⁵, la NIH, la Société Nord-Américaine de Neurologie, la Société Nord-Américaine de Radiologie, la Société Européenne de Neurologie et d'autres recommandent donc une surveillance annuelle ou semestrielle de ces enfants à partir de l'âge de 2 ans (18 mois selon certains).

Le signal Doppler doit être enregistré dans les ACI distales, sur toute la longueur accessible des ACM, à l'origine des ACP ainsi qu'à l'origine du TB, avec un angle d'incidence égal à 0. Certains (S. Verlhac) recommandent d'enregistrer également le flux dans l'ACI parapharyngée en plaçant la sonde sous la mandibule. Afin d'éviter des faux positifs, on prendra soin de ne pas réaliser d'EDTC lorsque l'enfant est hospitalisé pour un autre motif ou en cas d'infection, d'hyperthermie, d'hypoxie ou d'hypercapnie, par exemple.

Si la moyVmax est > 200 cm/s (valeur normale < 170 cm/s), STOP propose de contrôler 2 semaines plus tard et de ne transfuser que si la moyVmax reste > 200 cm/s. Toutefois, afin de mettre immédiatement l'enfant à l'abri d'un AIC, on peut transfuser d'emblée et continuer à suivre l'enfant en EDTC (attitude française).

Si la moyVmax reste >170 cm/s, l'enfant entrera dans un programme transfusionnel à long terme (objectif thérapeutique sera un taux d'HbS < 30% et moyVmax < 170 cm/s) avec recherche de donneur familial génétique pour greffe de moelle osseuse (France).

Si la moyVmax est < 170 cm/s, le contrôle sera fixé à 1 an. Entre 170 et 199 cm/s, le contrôle sera fixé à 3 mois (risque intermédiaire). Si l'examen est incomplet, on pourra recourir à l'injection de PdC ou à l'ARM (examen qui nécessite une sédation chez le jeune enfant).

Si l'EDTC se normalise à long terme et si l'IRM est normale, en l'absence de survenue d'AIC, on peut proposer un traitement par hydroxyurée (Hydrea).

LEXIQUE DES ACRONYMES

A1, A2 : Segments de l'artère cérébrale antérieure
ACA : Artère Cérébrale Antérieure (A1,A2)
ACE : Artères Cervicales à destinée Encéphalique
ACI : Artère Carotide Interne
ACoA : Artère Communicante Antérieure
ACoP : Artère Communicante Postérieure
ACM : Artère Cérébrale Moyenne (M1,M2,M3)
ACP : Artère Cérébrale Postérieure (P1,P2,P3)
AIT : Accident Ischémique Transitoire
AO : Artère Ophtalmique
AV : Artère(s) vertébrale(s)
BHT : Breath Holding Test
DTC : Doppler TransCrânien
EDTC : Echo-Doppler TransCrânien
ETO : Echocardiogramme Trans-Oesophagien
FAV : Fistule Artério-Veineuse
FCC : Fistule Carotido-Caverneuse
FOP : Foramen Ovale Perméable
HITS : High Intensity Transient Signal (micro-embole, MES)
HSA : Hémorragie Sous-Arachnoïdienne
HTIC : HyperTension IntraCrânienne
IP : Index de Pulsatilité (Gosling)
IR : Index de Résistance
IRM : Imagerie par résonance Magnétique Nucléaire
M1, M2, M3 : Segments de l'artère cérébrale moyenne
MAV : Malformation Artério-Veineuse
MC : Mort Cérébrale
MES : MicroEmbolie Signal (micro-embole, HITS)
MoyVmax : Moyenne des Vitesses maximales (TAMX, Time Averaged Mean of the maXimal velocities; TAMM, Time Averaged Mean of the Maximal velocities)
MoyVmoy : Moyenne des Vitesses moyennes instantanées (TAV, Time Averaged Velocity; TAMm, Time Averaged Mean of the mean velocities)
P1 : Segment pré-communicant de l'artère cérébrale postérieure
PAd : Pression Artérielle diastolique
PIc : Pression Intra-Crânienne
PICA : Artères cérébelleuses postéro-inférieures
PdC : Produit de Contraste
PPC : Pression de Perfusion Cérébrale
PW : Doppler Pulsé (Pulsed Wave Doppler)
RVC : Réserve vasomotrice cérébrale
SC : Siphon Carotidien
TAMM : Time Averaged Mean of the Maximal velocities (maximales (TAMX, Time Averaged Mean of the maXimal velocities; MoyVmax, Moyenne des Vitesses maximales)
TAMX : Time Averaged Mean of the maXimal velocities (MoyVmax, moyenne des vitesses maximales; TAMM, Time Averaged Mean of the Maximal velocities)
TAS : Temps d'Ascension Systolique
TAV : Time Averaged Velocity (MoyVmoy : Moyenne des Vitesses moyennes instantanées; TAMm, Time Averaged Mean of the mean velocities)
TAMm : Time Averaged Mean of the mean velocities (TAV : Time Averaged Velocity; MoyVmoy : Moyenne des Vitesses moyennes instantanées)
TB : Tronc basilaire
TEA : ThromboEndArtérectomie
TSA : Troncs Supra-Aortiques
V1, V2, V3, V4 : segments de l'artère vertébrale
VRC : VasoRéactivité Cérébrale
VSM : Vitesse Systolique Maximale (PSV-Peak Systolic Velocity)
VTD : Vitesse TéléDiastolique (EDV- End Diastolic Velocity)

REFERENCES

1. Kchouk, Boespflug, Demolis, Doppler transcrânien, collection Abrégés, Masson, 1996
 2. Cerebrovascular Ultrasound in Stroke Prevention and Treatment, edited by A. Alexandrov, Blackwell Publishing, 2007
 3. Deklunder G, Gautier C, Echodoppler transcrânien, techniques et indications, Formation Médicale Continue, Lettre du Médecin Vasculaire, N°12, sept. 2010
 4. Sadik JC, Riquier V et al, Echo-Doppler transcrânien : mise au point, J Radiol 2001; 82:821-31
 5. Gautier C, Deklunder G, Echodoppler transcrânien, Méthodologie et Applications cliniques, Sauramps Medical, 2010
 6. Deklunder G, Gautier C, Echo-Doppler Transcrânien- Techniques et Indications- La Lettre du Médecin Vasculaire- N°12- Sept 2010
 7. Domingo V, Niclot P, Touboul P-J ; Intérêt du doppler transcrânien à la phase aiguë de l'ischémie cérébrale- STV- vol 14- N°1, 18-25, Janvier 2002, Mini-revues.
 8. Ackerstaff R, Cerebral Circulation Monitoring in Carotid Endarterectomy and Carotid Artery Stenting, Handbook on Neurovascular Ultrasound, Karger, 2006
 9. Alexandrov A, Felberg R, Damchuk A et al, Deterioration following spontaneous improvement ; Stroke 2000 ;31 :915-9.
 10. Ringelstein EB, Biniek R, Weiler C et al, Type and extent of hemispheric brain infarctus and clinical outcome in early and delayed middle cerebral artery recanalization ; Neurology 1992, 142 : 289-98
 11. Ni XS, Horner S, Fazekas F, Niederkorn K. Serial transcranial Doppler sonography in ischemic strokes in middle cerebral artery territory. J Neuroimaging 1994 ;4 :232-6
 12. Nedeltchev K, Mattle H, Contrast Enhanced Transcranial Doppler Ultrasound for Diagnosis of PFO, Handbook on Neurovascular Ultrasound, Karger, 2006
 13. HAS, Recommandations pour la pratique clinique- Prise en charge de la drépanocytose chez l'enfant et l'adolescent- Septembre 2005
 14. Tegeler Ch, Crutchfield K, Katsnelson M et al, Transcranial Doppler Velocities in a Large, Healthy Population ; Journal of Neuroimaging, vol XX N° X 2012
 15. Baud J-M, Becker F, Exploration des artères carotides extra et intra-crâniennes. Traité de Médecine Vasculaire. Tome 1 ; p 413, Elsevier-Masson, 2010.
 16. Ter Minassian A, Doppler transcrânien
 17. Zanette E, Fieschi C, Bozzao L et al., Comparison of cerebral angiography and TCD sonography in acute stroke ; Stroke 1989 ;20 :899-903
 18. Ogata T, Kimura M, Ikeno K et al., Transcranial Color-Coded Real-Time Sonographic Criteria for Occlusion of the Middle Cerebral Artery in Acute Ischemic Stroke ; American Journal of Neuroradiology 2004, 25 :1680-1684
 19. Demchuk A, Burgin S, Christou I et al. Thrombolysis in Brain Ischemia (TIBI) transcranial Doppler flow grades predict clinical severity, early recovery and mortality in patients treated with intravenous tissue plasminogen activator. Stroke 2001 ;32 :89-98
 20. Nedelmann M, Stolz E, Gerriets T et al. Consensus Recommendations for Transcranial Color-Coded Duplex Sonography for the Assessment of Intracranial Arteries in Clinical Trials on Acute Stroke- Stroke 2009, 40 :3238-3244
 21. Lindegaard KF, Nornes H, Bakke SJ et al., Cerebral vasospasm after subarachnoid haemorrhage investigated by means of transcranial Doppler ultrasound. Acta Neurochir (Wien) 1988; 42 (Suppl): P80-84
 22. Felberg A, Christou I et al., Demchuk A, Malkoff M, Alexandrov A, Screening for Intracranial Stenosis With Transcranial Doppler : The Accuracy of Mean Flow Velocity Thresholds, Journal of Neuroimaging, Vol 12, N°1, January 2002
 23. Baumgartner RW, Mattle HP, Schroth G, Assessment of > 50% and < 50% intracranial stenoses by transcranial color-coded duplex sonography. Stroke 1999;30:87-92
 24. Ni XS, Horner S, Fayekas F, Niederkorn K ; Serial transcranial doppler sonography in ischemic strokes in middle cerebral artery territory ; J Neuroimaging 1994 ;4 :232-6
 25. Burgin W, Malkoff M, Felberg R et al Transcranial doppler ultrasounds criteria for recanalization after thrombolysis for middle cerebral artery stroke ; Stroke 2000 ;31 :1128-32
 26. Anzola GP, Zavarize P, Morandi E et al., Transcranial Doppler and risk of recurrence in patients with stroke and patent foramen ovale ; Eur J Neurol. 2003 ;10(2) :129-35
 27. Ajay Gupta A, Chaen JL, Hartman M et al. ; Cerebrovascular Reserve and Stroke Risk in Patients With Carotid Stenosis or Occlusion. A Systematic Review and Meta-Analysis. Stroke 2012 (Nov) ;43 :2884-91.
 28. Becker F, Vasoréactivité cérébrale; GTace-nv, mai 2009/juillet 2009
 29. Herzig R, Hlustinik P, Skoloudik D, Assessment of the cerebral vasomotor reactivity in internal carotid artery occlusion using a transcranial Doppler sonography and functional MRI.
-