

Le Doppler Transcrânien en Réanimation Pédiatrique : Principes, Indications et Algorithmes Décisionnels

Zayani. S ⁽¹⁾, Thabet. F ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Université de Monastir, Faculté de Médecine de Monastir, Service de Pédiatrie, CHU Fattouma Bourguiba, Monastir, Tunisie

RESUME

Le Doppler transcrânien (DTC) occupe aujourd'hui une place croissante dans le neuromonitoring multimodal en réanimation pédiatrique. Non invasif, dénué d'irradiation, reproductible et réalisable au lit du malade, il permet une évaluation dynamique de l'hémodynamique cérébrale. Au-delà de ses indications historiques validées – dépistage du risque d'accident vasculaire cérébral dans la drépanocytose et surveillance du vasospasme – son utilisation s'étend désormais à de multiples situations neuro-critiques aiguës. Cette mise au point rappelle les bases physiques et techniques indispensables à une acquisition fiable, propose des repères pratiques d'interprétation intégrant les principaux facteurs confondants, et présente des algorithmes décisionnels visant à intégrer le DTC de façon rationnelle à la stratégie quotidienne de neuroprotection.

Mots clés : Doppler transcrânien ; Soins intensifs pédiatriques ; Monitoring physiologique ; Neuroprotection ; Algorithmes

ABSTRACT

Transcranial Doppler ultrasound (TCD) is playing an increasingly important role in multimodal neuromonitoring in pediatric intensive care. Noninvasive, radiation-free, reproducible, and readily performed at the bedside, it enables a dynamic assessment of cerebral hemodynamics. Beyond its well-established historical indications—screening for stroke risk in sickle cell disease and surveillance for vasospasm—TCD is now being applied across a broad range of acute neurocritical conditions. This narrative review summarizes the essential physical and technical principles required for reliable acquisition, provides practical interpretation landmarks that account for key confounding factors, and proposes bedside decision-making algorithms to support the rational integration of TCD into daily neuroprotective management.

INTRODUCTION

La prise en charge du patient pédiatrique en situation neuro-critique a connu un changement de paradigme majeur au cours de la dernière décennie, évoluant d'une surveillance clinique isolée vers une stratégie de « neuromonitoring multimodal » intégrée [1, 2]. Au sein de cet arsenal thérapeutique, le Doppler Transcrânien (DTC) occupe une place prépondérante. Outil non invasif, dénué d'irradiation, reproductible et réalisable au lit du malade, il offre une fenêtre d'observation en temps réel sur l'hémodynamique cérébrale [3, 4].

Si son utilisation est historiquement validée dans le dépistage de la vasculopathie drépanocytaire [5] et le vasospasme post-traumatique [6], son champ d'application s'est considérablement élargi. Le DTC

s'avère aujourd'hui un outil très intéressant dans la surveillance des patients cérébrolésés aigus, permettant de phénotyper les désordres de l'autorégulation cérébrale [4, 7]. Il a également démontré une utilité croissante dans le monitoring des encéphalopathies métaboliques ou toxiques, notamment l'encéphalopathie hépatique, où les altérations des vitesses et des résistances vasculaires précèdent souvent les manifestations cliniques d'œdème cérébral ou d'hypertension intracrânienne [8, 9].

La pertinence clinique du DTC dépasse le cadre théorique pour impacter directement la stratégie thérapeutique. Une étude multicentrique récente, menée au sein des réanimations pédiatriques francophones, a objectivé que l'intégration des données du DTC modifiait la prise en charge médicale dans 86 % des

Auteur Correspondant :

Dr Seyfeddine Zayani

Email: zayani.seyfeddine@gmail.com

situations neuro-critiques non traumatiques [10]. Ce constat souligne la nécessité pour le réanimateur de maîtriser cet outil.

Cette mise au point a pour objectif de fournir un guide pratique et didactique à l'usage du réanimateur pédiatre. Elle synthétise les principes physiques fondamentaux du DTC, présente les valeurs physiologiques normatives et propose des algorithmes décisionnels visant à intégrer de manière rationnelle le DTC dans la stratégie quotidienne de neuroprotection.

PRINCIPES PHYSIQUES

Le DTC repose sur l'effet Doppler appliqué à l'hémodynamique cérébrale : une onde ultrasonore émise par la sonde à une fréquence connue (f_t) est réfléchiée par les érythrocytes en mouvement. Le changement de fréquence entre l'onde émise et l'onde reçue (décalage Doppler ou Doppler shift, (f_d)) est directement proportionnel à la vitesse des globules rouges. Cette relation est régie par l'équation fondamentale suivante [11] : $v = \frac{c \times f_d}{2 \times f_t \times \cos(\theta)}$

Où :

v : la vitesse du flux sanguin.

c : la célérité des ultrasons dans les tissus biologiques (constante 1540~m/s).

f_d : Le décalage de fréquence mesuré.

f_t : la fréquence d'émission de la sonde.

θ : l'angle d'insonation entre le faisceau ultrasonore et l'axe du vaisseau.

Contrairement à l'échographie vasculaire périphérique, où le vaisseau est visualisé longitudinalement permettant une correction d'angle précise, les artères intracrâniennes sont sinueuses et insonées "en aveugle" ou via une fenêtre étroite. En pratique, il est impossible de déterminer l'angle d'insonation entre le faisceau ultrasonore et l'axe du vaisseau exact avec certitude. La convention standard est donc de ne pas appliquer de correction d'angle et de supposer que le faisceau est parfaitement aligné avec le flux, soit $\theta \approx 0^\circ$ [12]. Puisque $\cos(0)=1$, cette hypothèse permet de simplifier l'équation. Cependant, elle implique une conséquence importante à considérer pour l'interprétation : toute déviation angulaire significative par rapport à l'axe du vaisseau entraîne une diminution du décalage de fréquence mesuré $f_{d'}$, et donc ($v_{\text{mesurée}} = v_{\text{réelle}} \times \cos(\theta)$). Par exemple, une erreur d'angle de 30° induit une sous-estimation de 13 %, et à 60° , la vitesse mesurée est réduite de moitié. L'opérateur doit donc rechercher systématiquement le signal le plus intense et la vélocité la plus élevée pour s'assurer qu'il est au plus proche de l'alignement optimal ($\theta=0$). (Figure 1)

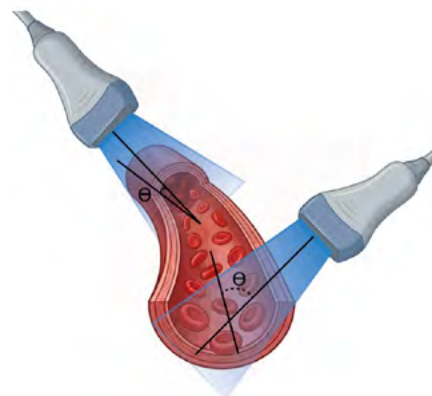


Figure 1 : Influence de l'angle d'insonation θ sur la précision de la mesure des vitesses de flux sanguin.

L'angle d'insonation θ est formé par l'intersection du faisceau ultrasonore et l'axe longitudinal du vaisseau. En Doppler transcrânien, l'impossibilité de visualiser directement le trajet sinueux des artères impose la convention d'un alignement parfait ($\theta \approx 0^\circ$, soit $\cos(0)=1$). Comme illustré, toute déviation par rapport à cet axe idéal entraîne une sous-estimation mathématique de la vitesse réelle

REALISATION PRATIQUE

Matériel et Paramètres

L'examen requiert un échographe équipé d'un module Doppler pulsé et couleur. Le choix de la sonde est déterminant : une sonde sectorielle (Phased-Array) de basse fréquence (2 à 2,5 MHz) est nécessaire pour permettre aux ultrasons de traverser la barrière osseuse de la voûte crânienne tout en minimisant l'atténuation du signal [13].

Description des Fenêtres Acoustiques

Fenêtre Temporale (La voie de référence) : La sonde est positionnée sur l'écaille temporale, au-dessus de l'arcade zygomatique, entre le tragus et le bord externe de l'orbite.

Cible : Elle permet l'insonation du Polygone de Willis. Repérage : L'Artère Cérébrale Moyenne (ACM) est le vaisseau le plus aisément repérable. Elle se traduit par un flux se dirigeant vers la sonde (codé conventionnellement en rouge), situé à une profondeur typique de 30 à 60 mm selon l'âge de l'enfant [13]. (Figure 2)

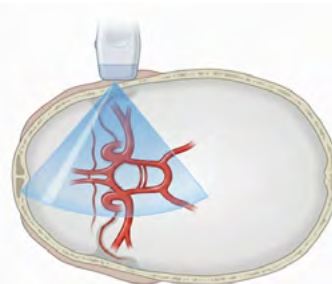


Figure 2 : Fenêtre acoustique temporale et repérage anatomique de l'artère cérébrale moyenne (ACM).

Insonation du polygone de Willis via l'écaille temporale. L'ACM est identifiée à une profondeur de 30 à 60 mm avec un flux codé conventionnellement en rouge (vers la sonde).

Fenêtre Transfontanellaire : Exploitable tant que la fontanelle antérieure reste ouverte. La sonde est placée directement sur la fontanelle, sans pression excessive. (Figure 3)

Intérêt : Elle offre une vue panoramique des structures médianes et permet une insonation idéale de l'Artère Cérébrale Antérieure (ACA) sur la ligne médiane. Elle permet également le calcul de l'Index de Résistance (IR) pour le dépistage des complications ischémo-hémorragiques néonatales.



Figure 3 : Fenêtre transfontanellaire chez le nourrisson.

Vue panoramique des structures médianes permettant l'insonation de l'artère cérébrale antérieure (ACA).

Fenêtre Sous-occipitale (Transforaminale) : L'examen se réalise patient en décubitus dorsal avec la tête fléchie vers le thorax, ou en décubitus latéral. La sonde est placée à la racine de la nuque, centrée sur le foramen magnum, le faisceau dirigé vers la racine du nez. (Figure 4)

Cible : Elle explore la circulation postérieure, notamment la confluence des artères vertébrales et le Tronc Basilaire. Le flux physiologique s'éloigne de la sonde (codé en bleu).

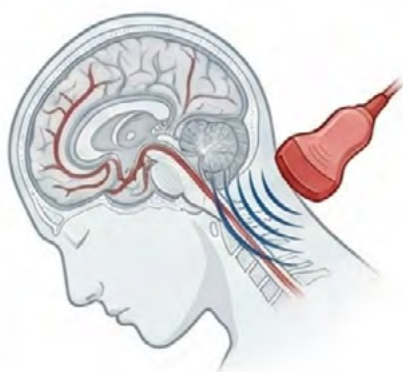


Figure 4 : Fenêtre sous-occipitale (transforaminale).

Exploration de la circulation postérieure (tronc basilaire et artères vertébrales) via le foramen magnum, avec un flux physiologique s'éloignant de la sonde (codé en bleu).

Les indices hémodynamiques

Au-delà des vitesses absolues, l'analyse spectrale du DTC permet de dériver des indices hémodynamiques décrivant la pulsatilité du flux et, indirectement, l'état des résistances vasculaires cérébrales. Ces indices reposent sur des rapports de vitesses et sont donc peu sensibles aux variations d'angle d'insonation, ce qui les rend particulièrement utiles pour le suivi longitudinal au lit du malade [4]. Les deux indices les plus utilisés en pratique clinique sont (Figure 5) :

Indice de pulsatilité (IP, Gosling) : $IP = (Vs - Vd) / Vm$

Indice de résistance (IR, Pourcelot) : $IR = (Vs - Vd) / Vs$

Où Vs est la vitesse systolique, Vd la vitesse télédiastolique et Vm la vitesse moyenne.

En pédiatrie, au-delà de la période néonatale, les valeurs normatives de l'IP se situent classiquement entre 0,7 et 1,1 [14], bien qu'une plage élargie de 0,6 à 1,3 soit admise dans certains contextes cliniques comme les méningites bactériennes [4]. La vitesse du flux sanguin cérébral (Vm) augmente pendant l'enfance, atteint un pic vers l'âge de 6 ans, puis diminue lentement pour revenir aux valeurs adultes. Chez l'enfant, il est donc essentiel de comparer les valeurs mesurées aux valeurs normatives publiées pour l'âge [3]. La vitesse du flux sanguin cérébral mesurée est considérée comme anormale si sa valeur est supérieure ou inférieure à deux écarts-types par rapport aux données normatives publiées [15].

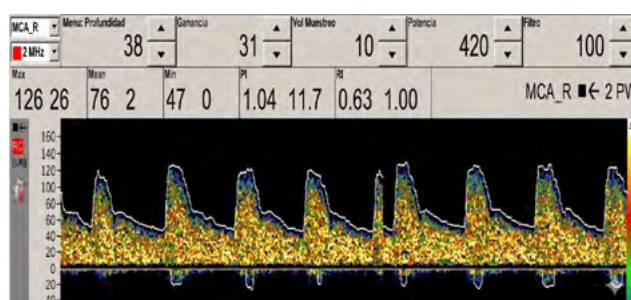


Figure 5 : Spectre Doppler pulsé de l'artère cérébrale moyenne droite

Analyse spectrale du signal de l'artère cérébrale moyenne (ACM). Visualisation des vitesses systolique (Vs), télédiastolique (Vd) et moyenne (Vm). Le calcul des indices de pulsatilité (IP) et de résistance (IR) permet de s'affranchir partiellement des variations de l'angle d'insonation.

L'IR physiologique est quant à lui établi à $0,55 \pm 15\%$, soit une fourchette de 0,47 à 0,63 [14]. Ces indices reflètent la compliance vasculaire et les résistances distales : leur élévation est un marqueur précoce d'altération de la perfusion cérébrale.

Des variations de la Vm par rapport aux données normatives pour l'âge ont été associées à l'évolution de diverses pathologies observées chez les enfants gravement malades. L'interprétation des données de DTC est d'autant plus pertinente que l'interprète évalue également l'état physiologique actuel du patient. La fièvre augmente la demande métabolique cérébrale et est donc associée à une Vm élevée. Parmi les autres affections associées à une hyperémie

(Vm élevée), on peut citer l'anémie, l'hypertension, une pression partielle de dioxyde de carbone élevée et les convulsions. À l'inverse, le choc et l'hypocapnie sont associés à une diminution de la Vm. Les médicaments sédatifs, fréquemment utilisés en soins intensifs, ont été associés à une réduction de la Vm en l'absence de pathologie intracrânienne [17].

Dans le traumatisme crânien sévère, un IP supérieur à 1,30 à la phase aiguë est fortement corrélé à une pression intracrânienne supérieure à 20 mmHg et constitue un facteur prédictif indépendant de mauvais pronostic neurologique [4, 14]. De même, au cours du sepsis sévère, l'augmentation des résistances cérébrovasculaires est associée à une mortalité accrue, avec des valeurs médianes d'IP à 1,33 et d'IR à 0,75 chez les non-survivants, contre respectivement 0,99 et 0,61 chez les survivants [4]. Toutefois, l'interprétation de ces valeurs doit impérativement intégrer les variables physiologiques systémiques, notamment la PaCO₂ et l'hématocrite, car l'IP ne peut se substituer formellement au monitoring invasif de la pression intracrânienne en dehors des premières 24 heures post-agression [4].

ALGORITHME : Lecture standardisée du DTC en 3 profils

L'intégration du DTC à la stratégie de neuroprotection repose sur un phénotypage rapide permettant de passer d'une mesure chiffrée à une action thérapeutique ciblée.

1. Repères normatifs et seuils d'alerte

- **Indice de Pulsatilité (IP)** : 0,7–1,1 (physiologique) ; une plage de 0,6–1,3 est tolérée selon le contexte.
- **Indice de Résistance (IR)** : 0,47–0,63.
- **Vitesse Moyenne (Vm)** : Anormale si déviation > 2 DS par rapport aux normes d'âge.
- **Seuil critique de perfusion** : Vitesse télédiastolique (Vd) < 20–25 cm/s.

2. Logigramme Décisionnel (Phénotype → Action)

Étape 1 : Évaluation de la Vm (Débit global)

- **Vm ↑ (> 2 DS)** : Orientation vers un profil de "Haut Débit" (Hyperémie ou Vasospasme).
- **Vm ↓ (< 2 DS)** : Orientation vers un profil de "Bas Débit" (Hypoperfusion / Oligémie).
- **Vm Normale** : Passer directement à l'analyse de l'IP et de la diastole.

Étape 2 : Analyse de l'IP et de la Diastole (Vd)

• Profil HYPERÉMIE (Vm ↑ + IP < 1,0) Figure 6 :

- Interprétation : Vasodilatation excessive dépassant les besoins métaboliques.
- Actions : Corriger les facteurs favorisants (fièvre, hypercapnie, agitation, crises convulsives, anémie). Viser la normocapnie et optimiser la sédation-analgésie.

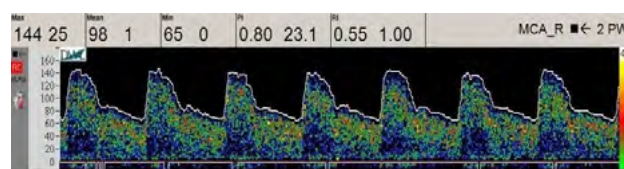


Figure 6 : Profil HYPERÉMIE (Vm ↑ + IP < 1,0) au niveau de l'artère cérébrale moyenne [16]

• Profil HYPOPERFUSION / OLIGÉMIE (Vm ↓ + IP ↑ ± Vd ↓) Figure 7 :

- Interprétation : Risque ischémique imminent par baisse de la perfusion cérébrale.
- Actions : **Contre-indiquer l'hyperventilation.** Augmenter la Pression de Perfusion Cérébrale (PPC) en optimisant la PAM (amines), la volémie et l'hémoglobine.

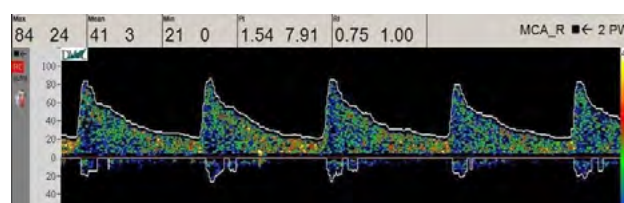


Figure 7 : Profil Hypoperfusion cérébrale (Vm ↓ + IP ↑ ± Vd ↓) [16]

• ALERTE HTIC / PPC CRITIQUE (IP > 1,4) :

- Action immédiate : Mise en œuvre des mesures d'urgence (osmothérapie, drainage du LCR, escalade thérapeutique). Une Vd < 20–25 cm/s dans ce contexte est un marqueur de gravité majeure.

Étape 3 : Distinction Hyperémie vs Vasospasme (si Vm ↑)

• Profil HYPERÉMIE (Vm ↑ + IP < 1,0) Figure 6 :

- Calculer le **Ratio de Lindegaard** (Vm ACM / Vm Carotide Interne extra crânienne) :
 - **Ratio < 3** : Compatible avec l'hyperémie.
 - **Ratio > 3** : Suggère un rétrécissement artériel (vasospasme).

PRINCIPALES INDICATIONS EN RÉANIMATION Le Traumatisé Crânien Grave

La gestion du traumatisme crânien grave pédiatrique a évolué d'une approche centrée uniquement sur le seuil de pression intracrânienne (PIC) vers une stratégie de « neuromonitoring multimodal » visant à individualiser la pression de perfusion cérébrale (PPC) [18]. Dans ce contexte, le DTC permet un phénotypage hémodynamique non invasif au lit du malade, essentiel pour guider la thérapeutique. Bien que le monitoring invasif de la PIC reste le standard, le DTC offre une estimation non invasive indirecte de la PPC en temps réel. La morphologie du spectre Doppler se modifie précocement en cas de baisse de la PPC : on observe une amputation progressive de la vitesse diastolique tandis que la vitesse systolique reste conservée, voire augmentée [19]. Une vélocité diastolique inférieure à 20–25

cm/s est un marqueur de gravité associé à un mauvais pronostic neurologique [4].

L'apport majeur du DTC réside dans sa capacité à distinguer deux mécanismes physiopathologiques opposés d'hypertension intracrânienne, indiscernables par le seul monitoring de la PIC [14, 18] :

L'Hypérémie : Caractérisée par des vitesses élevées (Vitesse Moyenne > 2 déviations standards) avec un IP bas ou normal (< 1,0). Elle reflète une vasodilatation excessive dépassant les besoins métaboliques. L'Oligémie (Hypoperfusion) : Caractérisée par des vitesses basses et un IP élevé. Elle signale un risque ischémique imminent. Cette distinction est cruciale car elle dicte des stratégies thérapeutiques divergentes : l'hypérémie peut bénéficier d'une hyperventilation modérée ou d'une sédation approfondie, tandis que l'oligémie impose une augmentation de la PPC (vasopresseurs) et contre-indique l'hyperventilation [18].

Gestion de l'HTIC : L'IP est l'indicateur clé des résistances vasculaires distales. Il existe une corrélation positive entre l'IP et la PIC, bien que la linéarité de cette relation puisse être altérée par la compliance vasculaire propre du patient [20]. Les recommandations internationales (ESPNIC) et la littérature récente s'accordent sur les seuils suivants :

Un IP < 1,0 est considéré comme normal chez l'enfant hors période néonatale.

Un IP > 1,2 - 1,4 doit faire suspecter une HTIC significative ou une baisse critique de la PPC, nécessitant une intervention thérapeutique immédiate (osmothérapie, drainage du LCR) [4, 20].

Les Infections du SNC (Méningites / Encéphalites)

Les infections neuroméningées sévères s'accompagnent fréquemment de désordres hémodynamiques complexes, associant inflammation, œdème cérébral et vasculopathie [4]. Le DTC s'est révélé être un outil de surveillance pertinent pour détecter ces complications "silencieuses" avant l'apparition de signes cliniques irréversibles [21, 22].

Les anomalies au DTC sont fréquentes en réanimation pédiatrique lors d'infections du SNC et ne se résument pas au seul vasospasme. Dans une cohorte rétrospective de 20 enfants atteints d'infection du SNC, l'élévation des vitesses moyennes était le profil le plus courant, dominé par une hyperémie (60% des examens), alors que le vasospasme était rare (6%) et qu'une hypoperfusion (au moins un vaisseau) était retrouvée dans 17% des examens, avec des profils mixtes possibles [22]. Cette hétérogénéité renforce l'intérêt d'une interprétation intégrant les vitesses, les indices de résistance et le contexte clinique/ventilatoire (température, PaCO₂, sédation), plutôt qu'une lecture univoque « vitesse élevée = vasospasme ».

Une accélération des vitesses peut traduire soit une hyperémie (fièvre, hypercapnie, perte d'autorégulation), soit un rétrécissement artériel (vasculopathie/vascularite/vasospasme) [19]. Pour affiner ce diagnostic différentiel, le ratio de Lindegaard (Vm ACM / Vm carotide interne extra crânienne) [23] est cou-

ramment utilisé : un ratio <3 est interprété comme compatible avec une hyperémie, tandis qu'un ratio >3 suggère un rétrécissement artériel, avec une aggravation progressive du ratio considérée comme évocatrice d'un rétrécissement croissant [19, 21]. Dans la pratique pédiatrique, ces seuils restent pragmatiques et doivent être confrontés à la cohérence globale du profil Doppler (IP, diastole), aux données cliniques et aux facteurs confondants [24].

Au-delà du diagnostic, la littérature pédiatrique suggère également une valeur pronostique des profils Doppler. Dans une cohorte rétrospective de réanimation pédiatrique incluant diverses infections du SNC, la présence d'un profil d'hypoperfusion sur au moins un vaisseau était associée à une augmentation des morbidités acquises en réanimation et de la mortalité [22].

Dans la méningite bactérienne prospective, tous les enfants ayant un DTC initial normal avaient une issue neurologique favorable à la sortie, alors que les profils dits « à haut risque » (haut débit avec IP bas ou bas débit) étaient significativement associés à une issue défavorable [21]. Ces résultats appuient l'intérêt d'un monitoring répété pour identifier précocement les enfants à risque et guider une stratégie de neuroprotection individualisée, même si la preuve d'un bénéfice causal d'une intervention guidée par DTC reste à consolider [21, 22].

Enfin, en conditions réelles de soins intensifs, des auteurs rapportent l'utilisation du DTC pour sécuriser certaines décisions thérapeutiques (par exemple, une hyperventilation chez des patients suspectés d'hypertension intracrânienne, en surveillant le risque d'ischémie) et pour contribuer à l'ajustement hémodynamique (orientation de la stratégie tensionnelle) au cours de l'évolution [3, 4, 22]. Ces usages doivent être envisagés comme un appui au raisonnement clinique, en complément des autres modalités de neuromonitoring disponibles.

Dépistage du vasospasme

Chez l'adulte, le dépistage du vasospasme cérébral après hémorragie sous-arachnoïdienne anévrysmale (HSA) est un élément central de la prévention de l'ischémie cérébrale retardée. Dans ce contexte, le DTC permet une détection précoce, parfois avant l'expression clinique [25], et son utilisation pour la surveillance du vasospasme artériel est recommandée par l'American Heart Association (classe IIa) [26]. Les critères Doppler adultes sont bien établis, reposant principalement sur la vitesse moyenne dans l'ACM et le rapport de Lindegaard [27].

Chez l'enfant, l'interprétation est plus complexe en raison de vitesses circulatoires de base plus élevées, ce qui limite l'extrapolation directe des seuils adultes. En l'absence de critères standardisés, l'incidence réelle du vasospasme cérébral pédiatrique demeure mal définie et probablement sous-estimée. Dans la littérature pédiatrique, les

critères les plus souvent rapportés associent une vitesse moyenne dans l'ACM ≥ 2 écarts-types au-dessus des normes pour l'âge et un rapport de Lindegaard ≥ 3 [17, 28, 29].

Ainsi, la validation de critères diagnostiques pédiatriques fondés sur le DTC, en concordance avec l'angiographie et l'imagerie neurovasculaire, reste nécessaire. Bien que le dépistage systématique après HSA ne soit pas encore intégré aux recommandations pédiatriques de neuro-réanimation, plusieurs études suggèrent un risque élevé de vasospasme chez l'enfant [30-32]. Sa portée pronostique reste toutefois encore insuffisamment définie.

DTC et encéphalopathie hépatique

Dans l'encéphalopathie hépatique compliquant l'insuffisance hépatique aiguë pédiatrique (IHAP), le risque d'œdème cérébral et d'hypertension intracrânienne est majeur, alors même que l'examen neurologique peut être peu contributif (sédation, ventilation, troubles métaboliques) et que l'accès à un monitoring invasif n'est pas toujours souhaitable ou réalisable ; les recommandations de prise en charge de l'IHAP soulignent ainsi l'importance d'une surveillance neurologique adaptée au risque et intégrée à une stratégie de neuroprotection multimodale [33]. Les données pédiatriques concernant l'apport du DTC dans ce contexte, bien que limitées, sont encourageantes : dans une série d'enfants atteints d'insuffisance hépatique aiguë avec encéphalopathie sévère, le DTC a permis de dépister des flux anormaux selon des références liées à l'âge et, chez les enfants en attente de transplantation qui sont décédés, il existait une vitesse télédiastolique plus basse et un IP plus élevé que chez les survivants, suggérant un profil plus « résistif » compatible avec une perfusion cérébrale menacée [8]. Ces observations rejoignent des données antérieures chez l'adulte en insuffisance hépatique fulminante décrivant une prédominance de profils d'hypoperfusion avec vitesses moyennes diminuées et IP augmenté, et mettant en garde contre l'hyperventilation « empirique » susceptible d'aggraver la perfusion cérébrale lorsqu'un bas débit est présent [34]. En pratique, dans l'encéphalopathie hépatique, l'intérêt du DTC réside probablement davantage dans l'identification de profils hémodynamiques cérébraux et dans leur évolution sous traitement que dans l'interprétation d'un seuil isolé. Une telle approche, plus dynamique, pourrait permettre de détecter plus précocement une dégradation cérébrale potentiellement réversible et de mieux guider la surveillance des formes graves [35].

DTC et drépanocytose

Chez l'enfant atteint de drépanocytose majeure (HbSS), l'accident vasculaire cérébral (AVC) ischémique constitue une complication redoutée, survenant classiquement au cours de l'enfance et de

l'adolescence et grevée de séquelles neurocognitives durables. Historiquement, en l'absence de stratégie préventive, le risque cumulé d'AVC clinique au cours de l'enfance a été estimé autour de 10% avant l'âge adulte [36]. Dans ce contexte, le DTC s'est imposé comme l'outil de dépistage non invasif de référence, en identifiant un phénotype de haut risque caractérisé par une augmentation des vitesses de flux dans les gros troncs intracrâniens, en particulier l'ACM et la carotide interne, reflet d'une vasculopathie sténosante progressive pouvant précéder l'événement clinique [5]. Le tournant majeur a été l'essai STOP, qui a démontré que, chez les enfants présentant des vitesses élevées au DTC, l'instauration de transfusions chroniques réduisait de manière majeure le risque d'un premier AVC par rapport à la prise en charge standard [5]. Cette démonstration a conduit à intégrer le DTC dans les recommandations internationales, avec un dépistage annuel généralement proposé entre 2 et 16 ans chez les enfants HbSS, afin de repérer précocement les sujets à très haut risque et d'initier une prévention primaire adaptée [5, 36]. En pratique, la valeur du DTC en drépanocytose repose moins sur une mesure isolée que sur une démarche structurée associant une standardisation de l'examen, une interprétation en fonction de l'âge et du contexte hémodynamique, et une articulation avec une filière de prise en charge (confirmation, discussion transfusionnelle, alternatives selon les cas), l'objectif étant de réduire le fardeau des AVC évitables et de sécuriser la trajectoire neurodéveloppementale de ces enfants.

DTC et mort encéphalique

Le DTC est un examen complémentaire reconnu pouvant contribuer à la confirmation de la mort encéphalique en objectivant un arrêt circulatoire cérébral (ACC). Sans évaluer directement la fonction du tronc cérébral, il met en évidence des profils hémodynamiques caractéristiques lorsque la pression intracrânienne abolit le flux net antérograde, notamment le flux oscillant, les spikes systoliques brefs et l'absence de signal de flux intracrânien [37-39] (Figure 8). Son utilisation requiert une approche standardisée, avec parfois répétition de l'examen pour confirmer la persistance du patron d'ACC [38, 40]. Les synthèses disponibles rapportent une bonne précision diagnostique, tout en soulignant certaines limites techniques et le risque de faux négatifs, ce qui impose une interprétation dans le cadre strict des standards de détermination de la mort encéphalique [37, 41]. En pédiatrie, les données confirment sa faisabilité, mais aussi l'hétérogénéité des pratiques, justifiant une intégration multimodale et une standardisation locale [42, 43].

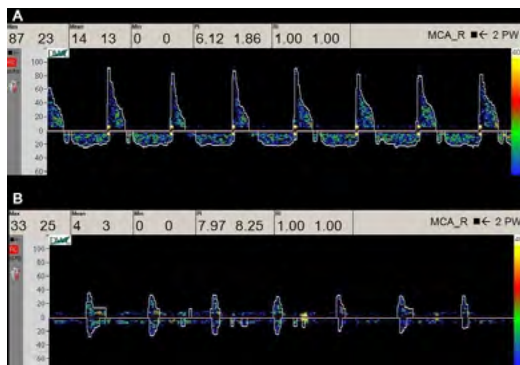


Figure 8 : Profils Doppler de l'arrêt circulatoire cérébral [16]

(A) Flux réverbérant ou oscillant (flux net nul). (B) Spikes systoliques brefs traduisant une résistance intracrânienne extrême.

Limites du DTC

Compte tenu de l'utilisation croissante du DTC en réanimation pédiatrique, il est important que le réanimateur pédiatre soit conscient de ses limites. La validité des données issues du DTC dépend de l'opérateur, qui doit maîtriser l'anatomie et la physiologie cérébrovasculaires influençant les résultats du DTC, ainsi que l'état physiologique actuel du patient. La littérature actuelle concernant l'utilisation du DTC chez les enfants gravement malades est souvent limitée par la petite taille des échantillons, l'hétérogénéité des populations de patients et les interprétations variables des données DTC. La standardisation de l'examen DTC a déjà été décrite et sera essentielle pour tout travail ultérieur [3].

CONCLUSION

En réanimation pédiatrique, le principal intérêt du Doppler transcrânien n'est pas de donner une valeur unique, mais de permettre une évaluation répétée et fonctionnelle de l'hémodynamique cérébrale au lit du patient. En identifiant des profils tels que l'hyperémie, l'hypoperfusion ou le rétrécissement artériel, il peut contribuer à affiner le raisonnement physiopathologique, à renforcer la détection précoce des situations à risque et à orienter une stratégie de neuroprotection plus individualisée. Son intérêt est particulièrement intéressant lorsqu'il est intégré à une approche multimodale et interprété en fonction de l'âge, de la PaCO_2 , de l'état hémodynamique, de la sédation et du contexte clinique global. Si certaines indications disposent déjà d'un socle de preuves robuste, d'autres nécessitent encore des validations prospectives en pédiatrie. L'enjeu n'est donc plus seulement de promouvoir l'usage du DTC, mais de standardiser son acquisition, son interprétation et son intégration dans les parcours décisionnels de neuro-réanimation.

ORCID :

Seyfeddine Zayani : 0000-0001-7585-1860

Farah Thabet : 0000-0003-4824-5691

Déclarations de financements et de conflits

d'intérêt : Aucun

REFERENCES :

- [1] Erklauer JC, Lai YC. The state of the field of pediatric multimodality neuromonitoring. *Neurocrit Care*. 2024;40(3):1160-1170. doi:10.1007/s12028-023-01858-3.
- [2] Laws JC, Jordan LC, Pagano LM, Wellons JC 3rd, Wolf MS. Multimodal neurologic monitoring in children with acute brain injury. *Pediatr Neurol*. 2022;129:62-71. doi:10.1016/j.pediatrneurol.2022.01.006.
- [3] O'Brien NF, Reuter-Rice K, Wainwright MS, Kaplan SL, Appavu B, Erklauer JC, et al. Practice recommendations for transcranial Doppler ultrasonography in critically ill children in the pediatric intensive care unit: a multidisciplinary expert consensus statement. *J Pediatr Intensive Care*. 2021;10(2):133-142. doi:10.1055/s-0040-1715128.
- [4] Lovett ME, O'Brien NF. Transcranial Doppler ultrasound, a review for the pediatric intensivist. *Children (Basel)*. 2022 May 16;9(5):727. doi:10.3390/children9050727.
- [5] Adams RJ, McKie VC, Hsu L, Files B, Vichinsky E, Pegelow C, et al. Prevention of a first stroke by transfusions in children with sickle cell anemia and abnormal results on transcranial Doppler ultrasonography. *N Engl J Med*. 1998 Jul 2;339(1):5-11. doi:10.1056/NEJM199807023390102.
- [6] O'Brien NF, Maa T, Yeates KO. The epidemiology of vasospasm in children with moderate-to-severe traumatic brain injury. *Crit Care Med*. 2015 Mar;43(3):674-685. doi:10.1097/CCM.0000000000000745.
- [7] Millet A, Evain JN, Desrumaux A, Francony G, Bouzat P, Mortamet G. Clinical applications of transcranial Doppler in non-trauma critically ill children: a scoping review. *Childs Nerv Syst*. 2021 Sep;37(9):2759-2768. doi:10.1007/s00381-021-05282-w.
- [8] Cousin VL, Charbel R, Ghali N, Marais C, Tissières P. Transcranial Doppler ultrasonography in children with acute liver failure and severe hepatic encephalopathy. *Pediatr Crit Care Med*. 2022 Aug 1;23(8):e382-e385. doi:10.1097/PCC.0000000000002962.
- [9] Singla R, Alexander EC, Khan P, Freedman B, Elseidy R, Sheshadri S, et al. Utility of transcranial Doppler and reversed jugular venous saturations for neuromonitoring in children with acute liver failure. *Eur J Pediatr*. 2025 Dec 24;185(1):39. doi:10.1007/s00431-025-06697-2.
- [10] Rollet-Cohen V, Sachs P, Léger PL, Merchaoui Z, Rambaud J, Berteloot L, et al. Transcranial Doppler use in non-traumatic critically ill children: a multicentre descriptive study. *Front Pediatr*. 2021 Jul 2;9:609175. doi:10.3389/fped.2021.609175.

- [11] Bathala L, Mehndiratta MM, Sharma VK. Transcranial doppler: technique and common findings (Part 1). *Ann Indian Acad Neurol*. 2013 Apr;16(2):174-179. doi:10.4103/0972-2327.112460.
- [12] Krejza J, Mariak Z, Babikian VL. Importance of angle correction in the measurement of blood flow velocity with transcranial Doppler sonography. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2001 Oct;22(9):1743-1747.
- [13] Purkayastha S, Sorond F. Transcranial Doppler ultrasound: technique and application. *Semin Neurol*. 2012 Sep;32(4):411-420. doi:10.1055/s-0032-1331812.
- [14] Verlhac S. Transcranial Doppler in children. *Pediatr Radiol*. 2011 May;41(Suppl 1):S153-S165. doi:10.1007/s00247-011-2038-y.
- [15] Bode H, Wais U. Age dependence of flow velocities in basal cerebral arteries. *Arch Dis Child*. 1988 Jun;63(6):606-611. doi:10.1136/adsc.63.6.606.
- [16] O'Brien NF. Reference values for cerebral blood flow velocities in critically ill, sedated children. *Childs Nerv Syst*. 2015 Dec;31(12):2269-2276. doi:10.1007/s00381-015-2873-5.
- [17] Appavu B, Burrows BT, Foldes S, Adelson PD. Approaches to multimodality monitoring in pediatric traumatic brain injury. *Front Neurol*. 2019;10:1261. doi:10.3389/fneur.2019.01261.
- [18] LaRovere KL, O'Brien NF. Transcranial Doppler sonography in pediatric neurocritical care: a review of clinical applications and case illustrations in the pediatric intensive care unit. *J Ultrasound Med*. 2015 Dec;34(12):2121-2132. doi:10.7863/ultra.15.02016.
- [19] Singh Y, Tissot C, Fraga MV, Yousef N, Cortes RG, Lopez J, et al. International evidence-based guidelines on Point of Care Ultrasound (POCUS) for critically ill neonates and children issued by the POCUS Working Group of the European Society of Paediatric and Neonatal Intensive Care (ESPNIC). *Crit Care*. 2020 Feb 24;24(1):65. doi:10.1186/s13054-020-2787-9.
- [20] Fonseca Y, Tshimanga T, Ray S, Malhotra H, Pongo J, Bodi Mabila J, et al. Transcranial Doppler ultrasonographic evaluation of cerebrovascular abnormalities in children with acute bacterial meningitis. *Front Neurol*. 2021;11:558857. doi:10.3389/fneur.2020.558857.
- [21] Ducharme-Crevier L, Mills MG, Mehta PM, Smith CM, Wainwright MS. Use of transcranial Doppler for management of central nervous system infections in critically ill children. *Pediatr Neurol*. 2016 Dec;65:52-58.e2. doi:10.1016/j.pediatrneurol.2016.08.027.
- [22] D'Andrea A, Conte M, Cavallaro M, Scarafile R, Riegler L, Cocchia R, et al. Transcranial Doppler ultrasonography: from methodology to major clinical applications. *World J Cardiol*. 2016 Jul 26;8(7):383-400. doi:10.4330/wjcv.8.i7.383.
- [23] Patel ND, Wainwright MS, Moore A, Suz P, Muangman S, Vavilala MS. Establishing normal Lindegaard Ratio in healthy children 10-16 years of age. *Childs Nerv Syst*. 2024 Sep;40(9):2829-2833. doi:10.1007/s00381-024-06467-9.
- [24] Sharma S, Lubrica RJ, Song M, Vandse R, Boling W, Pillai P. The role of transcranial Doppler in cerebral vasospasm: a literature review. *Acta Neurochir Suppl*. 2020;127:201-205. doi:10.1007/978-3-030-04615-6_32.
- [25] Connolly ES Jr, Rabinstein AA, Carhuapoma JR, Derdeyn CP, Dion J, Higashida RT, et al. Guidelines for the management of aneurysmal subarachnoid hemorrhage: a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke*. 2012 Jun;43(6):1711-1737. doi:10.1161/STR.0b013e3182587839.
- [26] Mastantuono JM, Combescure C, Elia N, Tramèr MR, Lysakowski C. Transcranial Doppler in the diagnosis of cerebral vasospasm: an updated meta-analysis. *Crit Care Med*. 2018 Oct;46(10):1665-1672. doi:10.1097/CCM.00000000000003297.
- [27] Samagh N, Bhagat H, Jangra K. Monitoring cerebral vasospasm: how much can we rely on transcranial Doppler. *J Anaesthesiol Clin Pharmacol*. 2019;35(1):12-18. doi:10.4103/joacp.JOACP_192_17.
- [28] O'Brien NF, Maa T, Moore-Clingenpeel M, Rosenberg N, Yeates KO. Relationships between cerebral flow velocities and neurodevelopmental outcomes in children with moderate to severe traumatic brain injury. *Childs Nerv Syst*. 2018 Apr;34(4):663-672. doi:10.1007/s00381-017-3693-6.
- [29] Reuter-Rice K, Regier M, Bennett E, Laskowitz D. The effect of the relationship of APOE polymorphisms and cerebral vasospasm on functional outcomes in children with traumatic brain injury. *Biol Res Nurs*. 2018 Oct;20(5):566-576. doi:10.1177/1099800418785982.
- [30] Ostergaard JR, Voldby B. Intracranial arterial aneurysms in children and adolescents. *J Neurosurg*. 1983 Jun;58(6):832-837. doi:10.3171/jns.1983.58.6.0832.
- [31] Moftakhar P, Cooke DL, Fullerton HJ, Ko NU, Amans MR, Narvid JA, et al. Extent of collateralization predicting symptomatic cerebral vasospasm among pediatric patients: correlations among angiography, transcranial Doppler ultrasonography, and clinical findings.

- J Neurosurg Pediatr. 2015 Mar;15(3):282-290. doi:10.3171/2014.9.PEDS14313.
- [32] Garg K, Singh PK, Sharma BS, Chandra PS, Suri A, Singh M, et al. Pediatric intracranial aneurysms—our experience and review of literature. Childs Nerv Syst. 2014 May;30(5):873-883. doi:10.1007/s00381-013-2336-9.
 - [33] Squires JE, Alonso EM, Ibrahim SH, Kasper V, Kehar M, Martinez M, et al. North American Society for Pediatric Gastroenterology, Hepatology, and Nutrition position paper on the diagnosis and management of pediatric acute liver failure. J Pediatr Gastroenterol Nutr. 2022 Jan;74(1):138-158. doi:10.1097/MPG.0000000000003268.
 - [34] Abdo A, López O, Fernández A, Santos J, Castillo J, Castellanos R, et al. Transcranial Doppler sonography in fulminant hepatic failure. Transplant Proc. 2003 Aug;35(5):1859-1860. doi:10.1016/S0041-1345(03)00592-X.
 - [35] Picard B, Sigaut S, Roux O, Abback PS, Choinier PM, Hachouf M, et al. Evaluation of transcranial Doppler use in patients with acute liver failure listed for emergency liver transplantation. Clin Transplant. 2023 Jun;37(6):e14975. doi:10.1111/ctr.14975.
 - [36] Reeves SL, Madden B, Freed GL, Dombkowski KJ. Transcranial Doppler screening among children and adolescents with sickle cell anemia. JAMA Pediatr. 2016 Jun 1;170(6):550-556. doi:10.1001/jamapediatrics.2015.4859.
 - [37] Chang JJ, Tsvigoulis G, Katsanos AH, Malkoff MD, Alexandrov AV. Diagnostic accuracy of transcranial Doppler for brain death confirmation: systematic review and meta-analysis. AJNR Am J Neuroradiol. 2016 Mar;37(3):408-414. doi:10.3174/ajnr.A4548.
 - [38] Lewis A, Kirschen MP, Greer D. The 2023 AAN/AAP/CNS/SCCM pediatric and adult brain death/death by neurologic criteria consensus practice guideline: a comparison with the 2010 and 2011 guidelines. Neurol Clin Pract. 2023 Dec;13(6):e200189. doi:10.1212/CPJ.000000000000200189.
 - [39] Ducrocq X, Hassler W, Moritake K, Newell DW, von Reutern GM, Shiogai T, et al. Consensus opinion on diagnosis of cerebral circulatory arrest using Doppler-sonography: Task Force Group on cerebral death of the Neurosonology Research Group of the World Federation of Neurology. J Neurol Sci. 1998 Aug 14;159(2):145-150. doi:10.1016/S0022-510X(98)00158-0.
 - [40] Segura T, Calleja S, Irimia P, Tembl JI. Recommendations for the use of transcranial Doppler ultrasonography to determine the existence of cerebral circulatory arrest as diagnostic support for brain death. Rev Neurosci. 2009;20(3-4):251-259. doi:10.1515/revneuro.2009.20.3-4.251.
 - [41] de Freitas GR, André C. Sensitivity of transcranial Doppler for confirming brain death: a prospective study of 270 cases. Acta Neurol Scand. 2006 Jun;113(6):426-432. doi:10.1111/j.1600-0404.2006.00645.x.
 - [42] Kirkham FJ, Levin SD, Padayachee TS, Kyme MC, Neville BG, Gosling RG. Transcranial pulsed Doppler ultrasound findings in brain stem death. J Neurol Neurosurg Psychiatry. 1987 Nov;50(11):1504-1513. doi:10.1136/jnnp.50.11.1504.
 - [43] Rodriguez RA, Cornel G, Alghofaili F, Hutchison J, Nathan HJ. Transcranial Doppler during suspected brain death in children: potential limitation in patients with cardiac "shunt". Pediatr Crit Care Med. 2002 Apr;3(2):153-157. doi:10.1097/00130478-200204000-00012.