

Monitoring de la saturation tissulaire en oxygène en périopératoire de la chirurgie pédiatrique et néonatale

Corinne Lejus-Bourdeau¹, Christophe Dadure², Ariane De Windt¹

¹ Service d'anesthésie réanimation chirurgicale Hôtel Dieu, Hôpital Mère Enfant, CHU Nantes, Place Alexis Ricordeau, 44093 cedex, France

² Service d'anesthésie et réanimation Lapeyronie, CHU Lapeyronie, 375, avenue du Doyen Gaston-Giraud, 34295 Montpellier cedex, France

POINTS ESSENTIELS

1. La saturation tissulaire en oxygène (StO₂) mesurée à l'aide de la technique NIRS est la somme de la saturation des différents compartiments sanguins présents dans le volume d'échantillonnage, avec environ 75% du signal d'origine veineuse, 20% artérielle et 5% capillaire.
2. La mesure de la StO₂ prétend apprécier l'adéquation entre le transport et la consommation locale d'O₂.
3. Sa mesure fait l'objet de multiples approximations, biais et facteurs de variations.
4. Une valeur absolue de StO₂ doit être interprétée avec précaution, la pertinence clinique des variations étant probablement plus grande.
5. En chirurgie cardiaque pédiatrique, une baisse de la saturation tissulaire cérébrale (ScO₂) per et postopératoire prolongée est associée à une augmentation de la morbi-mortalité et de la durée de séjour en réanimation.
6. Une diminution de 20% de la valeur de base de ScO₂ ou une valeur absolue < 50% impose une intervention thérapeutique guidée par un algorithme.
7. La ScO₂ peut être considérée comme une approximation de la SvO₂
8. L'association du monitoring cérébral et somatique a pour objectif de détecter précocement modifications de répartition du flux sanguin systémique.
9. Chez le jeune nourrisson sous anesthésie générale, une hypotension profonde est associée à un risque très élevé de chute de ScO₂.

10. Si le monitoring des StO_2 en néonatalogie fait l'objet d'une recherche extensive, sa place en chirurgie générale dans le monitoring du nouveau-né et du nourrisson reste à préciser.

1. Introduction

Le concept de mesure de saturation tissulaire en oxygène (StO_2) par spectroscopie de trans-illumination ou NIRS (*Near-infrared spectroscopy*), possible du fait la transparence des tissus aux rayons proches de l'infra-rouge, est introduit en 1977. La littérature pédiatrique, est surtout focalisée sur le monitoring de la saturation cérébrale (ScO_2), décrit chez le nourrisson prématuré dès 1985 avant même la commercialisation des premiers appareils au début des années 90. D'autres indications possibles émergent, en dehors du champ de la chirurgie cardiaque, en particulier chez le nouveau-né.

2. Principes de la mesure

La lumière visible est rapidement absorbée mais les photons du spectre proche infrarouge (700 - 1300 nm), traversent les tissus (y compris l'os) sur plusieurs centimètres. D'après la loi de Beer-Lambert, l'absorption lumineuse d'un chromophore est proportionnelle à sa concentration, à son coefficient d'extinction spécifique et à son trajet optique. Dans ce spectre, les principaux chromophores sont l'hémoglobine (Hb) oxydée et réduite, la bilirubine, la myoglobine et le cytochrome oxydase. Les pics d'absorption de l'Hb réduite et oxydée sont respectivement de 758 nm et 929 nm. Au minimum, deux longueurs d'onde sont nécessaires pour mesurer la concentration relative de 2 chromophores. La concentration de l'oxy peut être estimée à l'aide du ratio de l'absorption lumineuse de l'oxyHb et de l'Hb totale. L'association de longueurs d'onde supplémentaires ou la spectroscopie à bande large améliore la précision de la mesure.

Le dispositif comporte deux capteurs écartés d'environ 3 cm, placés aux angles fronto-temporaux sus-orbitaires du crâne. Chaque capteur comporte un émetteur d'ondes lumineuses, un capteur proximal et un distal. Deux longueurs d'onde lumineuse sont émises par deux diodes, placées côte à côte. Le trajet des photons entre la source et le détecteur est elliptique dit « en banane » et atteint la profondeur du tiers de la distance qui les sépare. Plus les optodes sont rapprochées, plus elles explorent le tissu superficiel. L'intensité du signal est inversement proportionnelle au carré de la distance parcourue par les photons, Le détecteur proximal ou superficiel reçoit le signal du tissu périphérique et le détecteur profond ou distal, celui des tissus périphériques et profonds. La StO_2 spécifique du tissu situé à une profondeur de 1 à 2

cm, est obtenue en soustrayant la valeur proximale de la valeur distale du signal. Le signal est actualisé toutes les 2 à 5 secondes.

3. Aspects techniques

Les caractéristiques des moniteurs varient selon le constructeur. Les optodes de l'INVOS 5100 (Somanetics/Covidien Medtronic) émettent deux longueurs d'onde (730 et 810 nm) avec 2 récepteurs situés à 3 et 4 cm des émetteurs. Le Fore-Sight™ (Cas medical System) et l'EQUANOX™ (Nonon Medical Inc) utilisent 4 à 5 longueurs d'onde, pour atténuer la contamination carotidienne. Les appareils CerOx (Ornim Medical), Tos-96™ (Tostec) et NIRO™ (Hamamatsu Photonics) ne sont pas distribués en France. Ce dernier donne un index d'oxygénation tissulaire. Selon le type de matériel, la source de lumière est émise par une LED (light-emitting diode) (Invos™ et Equanox™) ou un laser (Fore-sight™, Niro-300 et CerOx). la distance entre l'émetteur et le récepteur sont variables (30 et 40 mm pour l'Invos™, 15 et 50 mm pour le Fore-Sight™). Pour l'Invos™, la profondeur de pénétration est d'environ 1,7 cm. Le capteur frontal, recouvert d'écran opaque à la lumière, est placé sous la ligne d'implantation des cheveux, latéralement et 2 à 3 cm au-dessus de l'arcade sourcilière pour éviter respectivement les sinus longitudinal supérieur et sinus frontal et monitorer le cortex cérébral perfusés par les artères cérébrales antérieures et moyennes. La circonférence de la tête des nouveau-nés et des enfants permet une plus grande profondeur de pénétration. L'algorithme des capteurs pédiatrique et néonatal tient compte de la faible épaisseur du crâne et les caractéristiques du trajet optique.

4. Biais liés à la mesure

La longueur du trajet optique influence l'absorption et fait l'objet d'une grande variabilité interindividuelle du fait de réflexion et de réfraction des photons dans les couches tissulaires (peau, os, méninges, liquide céphalo-rachidien, œdème, hématome) en fonction de leur épaisseur ou leur volume. Pour surmonter cette difficulté, les fabricants utilisent différentes techniques (modélisations informatiques, simulations) pour estimer la distance traversée par l'onde lumineuse. Les algorithmes pour optimiser la pertinence de la mesure sont spécifiques de chaque appareil et ne sont habituellement pas publiés. La myélinisation incomplète du jeune enfant raccourcit le trajet optique et l'anémie l'allonge. D'autres algorithmes de soustraction minimisent l'absorption du tissu superficiel (estimé à 15%) de celle du tissu profond, de façon à obtenir la ScO₂ du cortex frontal superficiel.

Le signal est susceptible d'être altéré par une source de lumière intense, le mouvement, une mauvaise adhésion des capteurs dû à la sudation ou une concentration élevée d'autres chromophores (mélanine ou bilirubine conjuguée). La couleur de la peau aurait peu d'effet compte-tenu de la localisation superficielle du pigment. En cas d'atrophie corticale, le faisceau de protons peut être trop court pour atteindre le cortex. Les effets sur la ScO_2 de la vasoconstriction cutanée induite par noradrénaline sont plus importants que ceux induits par une diminution du débit cardiaque (Q_c) ou des modifications de la $PaCO_2$. Des modifications de l'oxygénation cutanée peuvent faire varier la ScO_2 de 17%. Des facteurs anatomiques (anomalies du cuir chevelu ou des structures sous-durales, kyste osseux frontal) interfèrent avec la mesure. La technique est très sensible à la contamination du signal par la circulation extra-crânienne. On admet comme postulat que la composition relative des composants artériels et veineux (respectivement 30 et 70%) est fixe. Cependant ce ratio varie significativement non seulement entre les sujets, mais aussi chez un même sujet, en particulier avec les modifications de $PaCO_2$. Ceci explique des variations inter-individuelles autour de 10% des valeurs de base. L'ouverture de shunts artério-veineux, la constitution d'hématomes, l'hémodilution ou des modifications de la distance entre le capteur et la source lumineuse par un œdème tissulaire, influencent la mesure sans nécessairement modifier l'oxygénation tissulaire. Les spectres d'absorption de l'oxyhémoglobine et de l'oxymyoglobine sont superposables. En pratique, cela pose rarement problème car la concentration de la myoglobine cérébrale est constante et pratiquement toujours plus entièrement saturée. Les variations de NIRS sont donc imputables à l'Hb.

5. Signification des valeurs

5.1. Valeurs normales.

En normoxie, la ScO_2 oscille entre 60 et 80% avec de grandes variations interindividuelles selon l'âge, le sexe et le matériel utilisé. Chez l'enfant sain, une $ScO_2 > 70%$ est considérée comme normale. Chez le nouveau-né normal pendant la première semaine de vie, la valeur moyenne est de $77 \pm 8\%$, la SrO_2 $86 \pm 8\%$ et la différence SrO_2 (saturation rénale) – ScO_2 $9 \pm 9\%$. Les mesures somatiques sont l'objet de très grandes variabilités.

5.2. Valeurs pathologiques.

Chez l'animal, une ScO_2 de 35-45% correspond à une réduction de 50% du flux sanguin cérébral. En dessous de 45%, on observe une déplétion neuronale en ATP et un métabolisme anaérobie. Les lésions ischémiques apparaissent à 40% et la mort neuronale à 30%. Ces

données concordent avec les études cliniques pédiatriques qui documentent un mauvais pronostic neurologique après CEC et des anomalies IRM, pour une $ScO_2 < 40-50\%$ de façon prolongée (>180 min) en normothermie. La prévention des erreurs thérapeutiques par interprétation erronée de valeurs absolues [1] repose surtout sur l'analyse des variations par rapport à la valeur de base individuelle. Le monitoring est mis en place avant l'induction anesthésique. Une diminution de 20% de la valeur de base ou une valeur absolue $< 50\%$ impose une intervention thérapeutique [2]. Une chute rapide est probablement un critère de gravité. Une légère asymétrie entre les 2 hémisphères est physiologique mais une différence $>10\%$ est pathologique.

5.3. Rationnel physiologique: au-delà de l'oxygénation cérébrale.

Les oxymètres tissulaires ne comportent pas de pléthysmographe et ne peuvent différencier le sang artériel et veineux. La ScO_2 est la sommation de la saturation des différents compartiments sanguins présents dans le volume d'échantillonnage, avec environ 75% du signal d'origine veineuse, 20% artérielle et 5% capillaire. Sa valeur, très voisine de la saturation veineuse cérébrale (SjO_2) [3], permet de juger de l'adéquation entre le transport (TaO_2) et la consommation locale d' O_2 (VO_2). Le succès de la prise en charge postopératoire repose, notamment en chirurgie cardiaque, sur la détection précoce et la correction des épisodes d'insuffisance circulatoire. Le Q_c et le transport d'oxygène (TaO_2) doivent être adaptés à la demande métabolique, pour prévenir la survenue de dysfonction d'organe et limiter la morbi-mortalité. Or, une prise en charge thérapeutique ciblée sur la SvO_2 (saturation du sang veineux mêlé), reflet de l'équilibre global entre l'apport et la VO_2 , augmente la survie des patients en état de choc chez l'adulte comme chez l'enfant [4]. Le NIRS peut être utilisé comme une approximation de la SvO_2 et fournit une cible non-invasive aux actions thérapeutiques d'optimisation. Plusieurs travaux montrent une corrélation entre la ScO_2 et la SvO_2 après chirurgie cardiaque chez le nouveau-né et le nourrisson [3,5]. La SvO_2 est cependant supérieure à la ScO_2 car elle est plus représentative de l'oxygénation de la moitié inférieure du corps. La corrélation variable selon les appareils, est meilleure chez les enfants porteurs d'une cardiopathie cyanogène, mais les variations de ScO_2 sont corrélées à celle de SvO_2 [3]. Le meilleur agrément est observé en-dessous de 10 kg, possiblement en raison d'une épaisseur cutané-osseuse plus faible et d'un drainage veineux cérébral majoritairement jugulaire.

5.4. Facteurs de variation de la ScO_2 .

La ScO_2 est influencée par la pression de perfusion cérébrale, la pression artérielle (Pa), le Q_c , les pressions partielles artérielles en oxygène (PaO_2) et en dioxyde de carbone ($PaCO_2$), le taux d'Hb, le métabolisme cérébral, une altération au cours d'une canule veineuse de la CEC, et des micro ou macro-embolies. Le monitoring ne reposant pas sur la pulsatilité vasculaire, est utilisable pendant la CEC ou l'arrêt circulatoire. En arrêt circulatoire hypothermique à 20°C, la ScO_2 chute de 1%/min contre 20% à 36°C. L'autorégulation cérébrale est inhibée pendant plusieurs heures. La ScO_2 est alors très dépendante de la Pa et contribue à juger la tolérance cérébrale à l'ischémie pour adapter le débit minimal de CEC aux besoins cérébraux.

6. Saturation tissulaire.

Le monitoring de la saturation tissulaire (StO_2) se limite pas à la ScO_2 et s'étend aux saturations somatiques rénale (SrO_2), mésentérique (SmO_2), hépatique (ShO_2) et musculaire ($SmuO_2$). Sur les modèles d'ischémie rénale, hépatique, ou mésentérique du porcelet, les StO_2 somatiques sont corrélées aux mesures de distribution d'oxygène spécifiques aux organes, à la saturation veineuse et aux taux de lactate. La mesure de la saturation musculaire ($SmuO_2$) a été appliquée à l'analyse de la VO_2 tissulaire et de la réactivité microcirculatoire, pendant une ischémie-reperfusion induite par un test d'occlusion vasculaire. La meilleure concordance entre StO_2 somatiques et saturation veineuse spécifique d'organe est observée en dessous de 10 kg. La plupart des dispositifs de mesure possède au moins deux canaux de monitoring. Cette possibilité conduit à une stratégie plus pertinente de double mesure cérébrale et somatique (rénale, mésentérique ou musculaire) [6]. La régulation des circulations cérébrale et somatiques est différente. L'autorégulation cérébrale repose sur le couplage métabolisme-débit alors que les résistances des circulations somatiques sont modulées par le système sympathique. L'association du monitoring cérébral et somatique révèle des modifications de la distribution des flux sanguins régionaux, invisibles aux mesures hémodynamiques globales. Le gradient saturations somatique-cérébral, de l'ordre de 10-15% chez le sujet sain, estime le ratio débit/métabolisme régional [7]. Une approche double site permet de détecter des modifications de répartition du flux sanguin systémique dues à la stimulation sympathique, l'inflammation ou un traitement médicamenteux. La première étape d'un choc est l'activation du système sympathique qui conduit à une redistribution du flux sanguin des circulations rénales, splanchnique et mésentérique vers la circulation cérébrale. Ce degré de redistribution peut être apprécié par la différence absolue entre la saturation somatique et la ScO_2 . Lorsque cet index devient négatif, le risque de dysfonction d'organe augmente [7]. L'association des

monitorages cérébral et somatique a pour objectif d'identifier les hypoperfusions somatiques encore cliniquement silencieuses, au stade très précoce du choc compensé avec une bonne corrélation avec la SvjO₂. En conjonction avec la SpO₂, elle autorisait une estimation non invasive dynamique d'extraction régionale et globale de l'O₂ avec une précision clinique suffisante.

7. Applications chez l'adulte: en résumé

7.1. Chirurgie cardiaque.

Le monitoring de la ScO₂ est surtout mis en œuvre en chirurgie cardiaque. La mortalité post-chirurgie cardiaque reste basse en dépit du nombre croissant de patients âgés et à risque élevé. Cependant, la fréquence des complications neurologiques est restée stable sur la dernière décennie. La dysfonction cognitive, principale cause de morbidité impacte de façon très péjorative la durée de séjour, le coût de l'hospitalisation, la qualité de vie ultérieure et la réinsertion professionnelle. Les étiologies multiples (emboles, syndrome inflammatoire, hypoperfusion systémique, anémie peropératoire) ont en commun un déséquilibre entre l'apport d'O₂ au cerveau et sa VO₂. Les cliniciens recherchent depuis longtemps un monitoring pertinent de l'adéquation de la perfusion cérébrale pendant la CEC. En dépit de ses limites, l'engouement pour le NIRS repose sur le postulat qu'il détecte les épisodes d'ischémie cérébrale peropératoire cliniquement silencieux, responsables de complications neurologiques postopératoires, assez tôt pour mettre en place une mesure corrective de l'insuffisance du TaO₂ cérébral. L'hypothèse est que la diminution de la ScO₂ précède l'altération de la SvO₂ et que l'optimisation de la ScO₂ restaure une balance en oxygène favorable. Plusieurs études établissent effectivement un lien entre les valeurs basses peropératoires de ScO₂, l'incidence des complications neurologiques et la morbidité postopératoires, l'altération cognitive précoce ou la durée d'hospitalisation [8,9]. La sévérité de la désaturation cérébrale est le seul facteur prédictif de la détérioration des tests cognitifs [8]. De multiples travaux montrent que ce monitoring conduit à la mise en œuvre précoce d'actions thérapeutiques.

Les optimisations thérapeutiques peropératoires sont guidées au mieux par un algorithme [10] qui comporte dans un premier temps, la vérification de la position des électrodes, de la tête, des canules artérielle et veineuse et du clamp aortique et leur repositionnement, si nécessaire. La seconde étape est la correction d'une éventuelle hypotension en optimisant le Qc et/ou l'aide d'un vasopresseur. Puis oxygénation, capnie et équilibre acido-basique sont optimisés en modifiant les paramètres du respirateur ou de

l'oxygénateur de la CEC. Puis une transfusion de concentrés globulaires est envisagée selon le taux d'Hb. Enfin la VO_2 cérébrale est diminuée en approfondissant l'anesthésie, en adaptant la température centrale, et/ou administrant des anticonvulsivants [11].

Néanmoins, l'indication systématique du monitoring de la ScO_2 reste débattue [12] car les données pour établir que la prévention ou la correction rapide des valeurs basses de ScO_2 , est suivie d'une diminution de la morbidité ou de la mortalité, sont beaucoup moins nombreuses et divergentes. La plupart inclue un petit nombre de patients avec des méthodes et des dispositifs variés, qui empêchent la comparaison de leurs résultats. Néanmoins, trois études randomisées mettent en avant une amélioration du pronostic après chirurgie cardiaque ou vasculaire [1, 9,13]. L'application d'un algorithme de prise en charge du patient en fonction du NIRS, évaluée de façon randomisée chez 200 patients, avec occultation du NIRS dans le groupe contrôle, objective une diminution de 20% de l'incidence des complications neurologiques. Dans le groupe contrôle, la valeur du NIRS était occultée. Dans le groupe traité en fonction du NIRS, l'incidence des complications neurologiques diminue de 20% [1]. A l'inverse, une méta-analyse de 43 publications incluant plus de 50 patients adultes, conteste le bénéfice d'interventions thérapeutiques conduites sur la base du monitoring de la ScO_2 [14].

7.2. Autres indications

L'endariection carotidienne est associée à un risque élevé d'accident vasculaire cérébral du côté opéré. Le NIRS est proposé pour une détection précoce de l'altération de la perfusion cérébrale et guider la mise en place d'un shunt. La sensibilité du monitoring de la ScO_2 à détecter une diminution du flux sanguin cérébral est identique à celle du doppler transcrânien mais sa spécificité est plus faible, ce qui pourrait conduire à la mise en place inutile de shunt. Cependant, si la ScO_2 ne décroît pas de 20% dans les 2 minutes suivant le clampage carotidien, une ischémie cérébrale est peu probable [15]. La ScO_2 est proposée également en greffe hépatique et en chirurgie de l'épaule en position assise pour détecter l'ischémie cérébrale. Une relation entre de faibles valeurs peropératoires de ScO_2 et l'altération précoce des fonctions cognitives est établie au cours de chirurgie thoracique avec ventilation unipulmonaire. La durée d'hospitalisation après chirurgie abdominale majeure chez le sujet âgé est prolongée chez les patients ayant une altération peropératoire de 25% de la ScO_2 . De courts épisodes de $ScO_2 < 65\%$, observés chez plus de la moitié des patients, sont associés à une incidence 2 fois plus élevée de troubles de la conscience. Les patients dont la ScO_2 est normalisée, ont une plus faible incidence de dysfonction cognitive et une plus courte durée de

séjour en réanimation [9]. Le NIRS est également proposé chez le traumatisé sévère adulte pour définir l'indication d'une transfusion globulaire comme alternative au seuil transfusionnel.

8. Chirurgie cardiaque pédiatrique

8.1. Oxymétrie cérébrale.

Mortalité et morbidité sont élevées en chirurgie cardiaque pédiatrique et inversement corrélées à l'âge [16-17]. Les étiologies sont multiples mais l'ischémie cérébrale est impliquée dans la majorité des cas. Détection et traitement précoces sont prioritaires. Malgré toutes les limites d'interprétation d'une valeur absolue, une altération de la ScO₂ préopératoire (<50%) par un shunt gauche-droit ou une cardiopathie cyanogène possède une valeur pronostique péjorative sur la mortalité postopératoire [18] signant ainsi la gravité de la cardiopathie sous-jacente. Comme chez l'adulte, une désaturation cérébrale per et postopératoire [19] est associée à une augmentation de la morbi-mortalité et de la durée de séjour en réanimation. Une désaturation cérébrale (<45%) prolongée (>180 min) après intervention de Norwood avec perfusion cérébrale sélective, prédit l'aggravation ou l'apparition de lésions ischémiques à l'IRM [20]. Dans une étude évaluant différentes modalités de monitoring cérébral chez 250 enfants, une complication neurologique postopératoire survient chez 26% des patients qui présentent un événement peropératoire non corrigé *versus* 6% des patients pour lesquels l'événement est corrigé [21]. Le constat d'une désaturation cérébrale conduit comme chez l'adulte, à la mise en œuvre de mesures correctives comme le repositionnement précoce d'une canule aortique. Guidées par un algorithme, elle divise par 4 l'incidence des complications neurologiques et réduit la durée d'hospitalisation [21]. En dessous de 2 ans, le NIRS modifie les pratiques transfusionnelles peropératoires avec une transfusion plus précoce et un seuil d'Hb plus élevé. En revanche, le volume total de concentrés globulaires transfusé est réduit ainsi que la durée de séjour en réanimation [22]. Cependant, le lien entre le pronostic neurologique à long terme et les désaturations cérébrales n'est pas formellement établi [23].

8.2. Oxymétrie somatique

Plusieurs travaux cliniques plaident en faveur du monitoring somatique en chirurgie cardiaque pédiatrique. Un trouble du rythme dû à un cathétérisme cardiaque abaisse plus précocement (10 à 15 s) les ScO₂ et SrO₂ que la SpO₂ [24]. Après sevrage de la CEC, la performance de la SmO₂ est supérieure à celle des SrO₂ ou ScO₂ pour prédire le besoin en

support inotrope, une ventilation et un séjour en réanimation prolongés [25]. Pendant les 24 premières heures postopératoires, la SrO_2 (86-91%) surestime la SvO_2 (60-70%). La ScO_2 plus faible (60-70%) traduit une VO_2 plus importante dans le territoire cave supérieur [26]. La ScO_2 mesurée pendant les 60 minutes précédant le prélèvement est le mieux inversément corrélée aux taux de lactates, suivi par la SmO_2 , la SrO_2 et la $SmuO_2$. Le degré de corrélation est plus élevé si on considère les moyennes des valeurs de ScO_2 et de SrO_2 . Une valeur moyenne $\leq 65\%$ prédit des lactates ≥ 3 avec une sensibilité de 95% et une spécificité de 83% [27]. Durant le sevrage ventilatoire, une diminution $\geq 10\%$ des saturations régionales majeure par un facteur 6 le risque d'échec d'extubation [28]. Plus de 40% des enfants développent une insuffisance rénale post-CEC. Une diminution prolongée de la SrO_2 est mieux corrélée avec la survenue d'une insuffisance rénale que les biomarqueurs conventionnels [29]. Chez le nouveau-né, la SmO_2 postopératoire au début de la réalimentation entérale, est plus faible en cas de développement ultérieur d'entérocolite ulcéronécrosante [30]. La ShO_2 semble moins intéressante.

8.3. Limites du monitoring

En chirurgie cardiaque pédiatrique, le monitoring de la ScO_2 est intégré dans le monitoring de routine systématique, pour beaucoup d'équipes [1,5-6]. La mise en œuvre en routine d'un nouveau monitoring peropératoire devrait toujours être précédée de la preuve de sa contribution à l'amélioration de la prise en charge du patient. Malgré le coût des consommables et probablement en raison de son caractère non invasif, cette étape a été écourtée. Certains auteurs soulignent l'absence de validation scientifique et l'insuffisance des preuves pédiatriques [31]. La validité de la mesure est remise en question car une ScO_2 n'exclue pas une hypoperfusion cérébrale, ce d'autant qu'elle survient dans une région non examinée. A l'inverse, une diminution de la ScO_2 affichée est possible en l'absence d'altération de l'oxygénation tissulaire comme le rapportent plusieurs cas cliniques décrivant une valeur basse sans ischémie cérébrale [31].

L'implémentation en routine du NIRS a débuté sur la base de faisceaux de preuves, issues d'études rétrospectives ou observationnelles. Une revue systématique identifie 47 séries de cas, 4 essais randomisés et 3 études rétrospectives et 13 revues sur le sujet [32]. Leur analyse globale échoue à montrer que le monitoring de la ScO_2 conduit à une amélioration du pronostic neurologique. Une validation scientifique de son intérêt pour diminuer la morbidité nécessiterait des essais randomisés. Mais le NIRS a tellement gagné en popularité qu'une telle

étude est devenue difficile à conduire d'un point de vue éthique [6]. Il faut remarquer qu'une méta-analyse a échoué à montrer que l'oxymétrie de pouls améliorerait l'issue des patients [33].

9. Chirurgie pédiatrique générale

9.1. Effet de l'anesthésie

Les effets hémodynamiques vasodilatateurs des agents anesthésiques sont objectivés par le NIRS. La ScO_2 augmente chez l'adulte sous l'effet du thiopental et du propofol mais pas de l'étoomidate. En revanche, une baisse transitoire de ScO_2 en lien avec une baisse de Pa plus prolongée est observée chez le nouveau-né après injection de 3 mg/kg de propofol [34] ou 0,2 mg/kg de midazolam et 0,05 mg/kg de morphine [35]. La vasodilatation régionale qui accompagne la sympathectomie secondaire à une anesthésie caudale ou un bloc loco-régional étendu peut être également détectée par le NIRS [36]. En dessous de 2 ans, l'induction par inhalation de sévoflurane, élève la ScO_2 , mais avec une plus faible amplitude en dessous de 6 mois (+13%) qu'au-delà (+13%) malgré une baisse de Pa (-27%) [37]. Cet effet favorable du sévoflurane ne doit pas sous-estimer les effets délétères de toute hypotension peropératoire, en particulier chez les plus jeunes. En phase d'entretien de l'anesthésie, les mêmes auteurs observent une diminution de ScO_2 pour une Pam < 33 et 43 mmHg respectivement en dessous et au-dessus de 6 mois [37]. En dessous de 3 mois, la probabilité d'une chute de ScO_2 de 20% est <10% pour une baisse de Pam <20% et de 90% pour une baisse de 35% [38]. En dessous de 6 mois, une analyse conjuguée de la ScO_2 et du débit sanguin cérébral par doppler transcrânien objective une bonne perfusion cérébrale pour une PAM > 45 mmHg. Entre 35 et 45 mmHg, le flux sanguin diminue mais l'élévation de la ScO_2 traduit une balance positive entre apport d'oxygène et VO_2 . En dessous de 35 mmHg, la ScO_2 chute également en dépit de la diminution de la VO_2 [39]. Chez le nouveau-né et le prématuré, le monitoring de la ScO_2 et de la SrO_2 est plus sensible que le monitoring habituel durant les 24 premières heures après l'induction anesthésique pour chirurgie non cardiaque. Une altération (-20% de la valeur de base) des ScO_2 et SrO_2 est enregistrée pendant respectivement 2,8 et 19,3% de la période peropératoire et 9,6 et 9,9% de la période postopératoire. La corrélation avec SpO_2 et Pa est faible. Les hypoxies détectées par le NIRS sont 2 à 3 fois plus fréquentes et plus précoces (10 à 15 s) que celles détectées par la SpO_2 [40].

9.2. Intérêt selon le type de chirurgie

Les travaux en chirurgie générale, peu nombreux et exploratoires, font entrevoir de multiples applications mais sont encore très insuffisants pour intégrer le monitoring tissulaire

en pratique quotidienne. La réintégration abdominale des viscères au décours de la cure chirurgicale de hernie diaphragmatique après stabilisation hémodynamique et ventilatoire, génère une réduction (6%) de la $ScO_2\%$ et une élévation de la Fc, sans diminution de la Pam. Le mécanisme est possiblement une baisse du retour veineux et du Qc, liée à l'augmentation de la pression abdominale [41]. En revanche, dans une série de 29 enfants (<9 ans) bénéficiant d'une cure laparoscopique de reflux gastro-œsophagien, la SrO_2 est stable pour des pressions péritonéales maximales de 6 à 12 mmHg en fonction de l'âge. De surcroît la ScO_2 s'élève de 5,8% lors de l'insufflation [42]. Après cure d'atrésie de l'œsophage, une diminution de la ScO_2 et de la SrO_2 pendant 24 heures postopératoires, en l'absence d'autres anomalies à l'exception du débit urinaire, suggère une redistribution des flux sanguins au dépend de la circulation rénale et probablement splanchnique [43]. La persistance du canal artériel est associée à une diminution (10%) de la ScO_2 avec majoration de l'extraction en O_2 [44] en rapport avec la baisse de Pa, résolutive 24 heures après fermeture médicamenteuse mais non après fermeture chirurgicale [45]. En chirurgie cranio-faciale, la ShO_2 n'est pas suffisamment corrélée avec la SvO_2 pour être pertinente. Une compression vasculaire sur fracture supracondylienne abaisse la StO_2 ($63,5 \pm 15\%$) qui se normalise ($80,9 \pm 10\%$) après réduction.

10. Néonatalogie et pédiatrie médicale

Le monitoring de la ScO_2 est exploré de façon extensive en néonatalogie. Des travaux de recherche récents la proposent pour déterminer la fraction optimale d' O_2 à administrer aux grands-prématurés [46] en salle de naissance et au cours des 3 premiers jours de vie. Un référentiel de valeurs normales est même établi au cours de l'adaptation à la vie extra-utérine du nouveau-né sain [47]. Dans cette population, une activité électro-encéphalographique faible est liée à une ScO_2 basse, ce qui traduit une extraction en O_2 accrue. La relation entre transfusion et ScO_2 est surtout étudiée chez le nouveau-né prématuré [48]. Le monitoring du rapport des valeurs de SmO_2 et ScO_2 , contribue à identifier les enfants chez lesquels la transfusion de concentrés globulaire diminue la symptomatologie (apnée, bradycardie, épisode de désaturation, nécessité d'une assistance respiratoire, tolérance entérale) [49]. Une élévation de 3% d'hématocrite est associée chez le prématuré de 26 SA anémique à une augmentation des ScO_2 , SrO_2 et SmO_2 , respectivement de 10, 18 et 16%, en l'absence de variation des autres paramètres vitaux, conséquence d'élévation de l'extraction tissulaire avant transfusion [50]. Dans une étude observationnelle, Fortune [51] utilise une mesure double-site (cérébrale et abdominale antérieure ou mésentérique) pour évaluer le risque des

nouveaux de développer une entérocolite ulcéro-nécrosante. Le degré de redistribution du flux sanguin est exprimé par le ratio SmO_2/ScO_2 . Pour un ratio <75%, le risque de développer une entérocolite ulcéro-nécrosante est multiplié par un facteur 8 avec une sensibilité >90%. Le monitoring de la ScO_2 est proposé pour identifier les enfants drépanocytaires à risque élevé de vasculopathie cérébrale ou à l'aide d'un monitoring nocturne pour détecter les enfants porteurs d'un syndrome d'apnée obstructive du sommeil.

11. Conclusion

À l'évidence, l'oxymétrie cérébrale détecte des événements significatifs au niveau de l'oxygénation cérébrale qui sont délétères pour le cerveau au décours de la CEC. Même si l'impact du ou des monitorages tissulaires en chirurgie cardiaque pédiatrique sur la morbidité/mortalité n'est pas définitivement démontré, de multiples arguments plaident pour son utilisation. En revanche, en chirurgie pédiatriques générale, les données sont encore trop limitées pour en prôner une utilisation de routine, chez le nourrisson à risque hémodynamique.

Références

1. Murkin JM, Adams SJ, Novick RJ, Quantz M, Bainbridge D, Iglesias I, et al. Monitoring brain oxygen saturation during coronary bypass surgery: a randomized, prospective study. *Anesth Analg* 2007; 104: 51-8.
2. Taillefer MC, Denault AY. Cerebral near-infrared spectroscopy in adult heart surgery: systematic review of its clinical efficacy. *Can J Anaesth* 2005; 52: 79-87.
3. Ranucci M, Isgrò G, De la Torre T, Romitti F, Conti D, Carlucci C. Near-infrared spectroscopy correlates with continuous superior vena cava oxygen saturation in pediatric cardiac surgery patients. *Paediatr Anaesth* 2008; 18:1163-9.
4. De Oliveira CF, de Oliveira DS, Gottschald AF, Moura JD, Costa GA, Ventura AC, et al. ACCM/PALS haemodynamic support guidelines for paediatric septic shock: an outcomes comparison with and without monitoring central venous oxygen saturation. *Intensive Care Med* 2008; 34: 1065-75.
5. Tortoriello TA, Stayer SA, Mott AR, McKenzie ED, Fraser CD, Andropoulos DB et al. A noninvasive estimation of mixed venous oxygen saturation using near-infrared spectroscopy by cerebral oximetry in pediatric cardiac surgery patients. *Paediatr Anaesth* 2005; 15: 495-503.

6. Tweddell JS, Ghanayem NS, Hoffman GM. Pro: NIRS is "standard of care" for postoperative management. *Semin Thorac Cardiovasc Surg Pediatr Card Surg Annu* 2010; 13: 44-50.
7. Scott JP, Hoffman GM. Near-infrared spectroscopy: exposing the dark (venous) side of the circulation. *Pediatr Anesth* 2014; 24: 74-88.
8. Yao FS, Tseng CC, Ho CY, Levin SK, Illner P. Cerebral oxygen desaturation is associated with early postoperative neuropsychological dysfunction in patients undergoing cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2004; 18: 552-8.
9. Casati A, Fanelli G, Pietropaoli P, Proietti R, Tufano R, Danelli G, et al. Continuous monitoring of cerebral oxygen saturation in elderly patients undergoing major abdominal surgery minimizes brain exposure to potential hypoxia. *Anesth Analg* 2005; 101: 740-7.
10. Denault A, Deschamps A, Murkin JM. A proposed algorithm for the intraoperative use of cerebral near-infrared spectroscopy. *Semin Cardiothorac Vasc Anesth* 2007; 11: 274-81.
11. Andropoulos DB, Stayer SA, Diaz LK, Ramamoorthy C. Neurological monitoring for congenital heart surgery. *Anesth Analg* 2004; 99: 1365 - 75.
12. Gregory A, Kohl BA. Con: near-infrared spectroscopy has not proven its clinical utility as a standard monitor in cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2013; 27: 390-4.
13. Goldman S, Sutter F, Ferdinand F, Trace C. Optimizing intraoperative cerebral oxygen delivery using noninvasive cerebral oximetry decreases the incidence of stroke for cardiac surgical patients. *Heart Surg Forum* 2004; 7: E376-381.
14. Zheng F, Sheinberg R, Yee MS, Ono M, Zheng Y, Hogue CW. Cerebral near-infrared spectroscopy monitoring and neurologic outcomes in adult cardiac surgery patients: a systematic review. *Anesth Analg* 2013; 116: 663-76.
15. Moritz S, Kasprzak P, Arlt M, Taeger K, Metz C. Accuracy of cerebral monitoring in detecting cerebral ischemia during carotid endarterectomy: a comparison of transcranial Doppler sonography, near-infrared spectroscopy, stump pressure, and somatosensory evoked potentials. *Anesthesiology* 2007; 107: 563-9.
16. Menache CC, du Plessis AJ, Wessel DL, Jonas RA, Newburger JW. Current incidence of acute neurologic complications after open-heart operations in children. *Thorac Surg* 2002; 73: 1752-8.
17. Hayashida M, Kin N, Tomioka T, Orii R, Sekiyama H, Usui H, et al. Cerebral ischaemia during cardiac surgery in children detected by combined monitoring of BIS and near-infrared spectroscopy. *Br J Anaesth* 2004; 92: 662-9.

18. Fenton KN, Freeman K, Glogowski K, Fogg S, Duncan KF. The significance of baseline cerebral oxygen saturation in children undergoing congenital heart surgery. *Am J Surg* 2005; 190: 260-3.
19. Phelps HM, Mahle WT, Kim D, Simsic JM, Kirshbom PM, Kanter KR, et al. Postoperative cerebral oxygenation in hypoplastic left heart syndrome after the Norwood procedure. *Ann Thorac Surg* 2009; 87: 1490-4.
20. Dent CL, Spaeth JP, Jones BV, Schwartz SM, Glauser TA, Hallinan B, et al. Brain magnetic resonance imaging abnormalities after the Norwood procedure using regional cerebral perfusion. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2006; 131: 190-7.
21. Austin EH 3rd, Edmonds HL Jr, Auden SM, Seremet V, Niznik G, et al. Benefit of neurophysiologic monitoring for pediatric cardiac surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1997; 114: 707-15.
22. Lejus C, De Windt A, LeBoeuf-Pouliquen D, Le Roux C, Bérard L, Asehnoune K. A retrospective study about cerebral near-infrared spectroscopy monitoring during paediatric cardiac surgery and intra-operative patient blood management. *Anaesth Crit Care Pain Med* 2015; 34: 259-63.
23. Simons J, Sood ED, Derby CD, Pizarro C. Predictive value of near-infrared spectroscopy on neurodevelopmental outcome after surgery for congenital heart disease in infancy. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2012; 143: 118-25.
24. Tanidir IC, Ozturk E, Ozyilmaz I, Saygi M, Kiplapinar N, Haydin S, et al. Near infrared spectroscopy monitoring in the pediatric cardiac catheterization laboratory. *Artif Organs* 2014; 38: 838-44.
25. Kim JW, Shin WJ, Park I, Chung IS, Gwak M, Hwang GS. Splanchnic oxygen saturation immediately after weaning from cardiopulmonary bypass can predict early postoperative outcomes in children undergoing congenital heart surgery. *Pediatr Cardiol* 2014; 35: 587-95.
26. Gil-Anton J, Redondo S, Garcia Urabayen D, Nieto Faza M, Sanz I, Pilar J. Combined Cerebral and Renal Near-Infrared Spectroscopy After Congenital Heart. Surgery. *Pediatr Cardiol* 2015; 36: 1173-8.
27. Chakravarti SB, Mittnacht AJ, Katz JC, Nguyen K, Joashi U, Srivastava S. Multisite near-infrared spectroscopy predicts elevated blood lactate level in children after cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2009; 23: 663-7

28. Foster CB, Spaeder MC, McCarter RJ, Cheng YI, Berger JT. The use of near-infrared spectroscopy during an extubation readiness trial as a predictor of extubation outcome. *Pediatr Crit Care Med*. 2013; 14: 587-92.
29. Ruf B, Bonelli V, Balling G, Hörer J, Nagdyman N, Braun SL, et al. Intraoperative renal near-infrared spectroscopy indicates developing acute kidney injury in infants undergoing cardiac surgery with cardiopulmonary bypass: a case-control study. *Crit Care* 2015; 19: 27.
30. DeWitt AG, Charpie JR, Donohue JE, Yu S, Owens GE. Splanchnic near-infrared spectroscopy and risk of necrotizing enterocolitis after neonatal heart surgery. *Pediatr Cardiol* 2014; 35: 1286-94.
31. Durandy Y, Rubatti M, Couturier R. Near Infrared Spectroscopy during pediatric cardiac surgery: errors and pitfalls. *Perfusion* 2011; 26: 441-6.
32. Hirsch JC, Charpie JR, Ohye RG, Gurney JG. Near-infrared spectroscopy: what we know and what we need to know--a systematic review of the congenital heart disease literature. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2009; 137: 154-9.
33. Pedersen T, Nicholson A, Hovhannisyann K, Møller AM, Smith AF, Lewis SR. Pulse oximetry for perioperative monitoring. *Cochrane Database Syst Rev* 2014; 17: CD002013.
34. Vanderhaegen J, Naulaers G, Van Huffel S, Vanhole C, Allegaert K. Cerebral and systemic hemodynamic effects of intravenous bolus administration of propofol in neonates. *Neonatology* 2010; 98: 57-63.
35. van Alfen-van der Velden AA, Hopman JC, Klaessens JH, Feuth T, Sengers RC, Liem KD. Effects of midazolam and morphine on cerebral oxygenation and hemodynamics in ventilated premature infants. *Biol Neonate* 2006; 90: 197-202.
36. Bettsworth J, Bhalla T, Barry N, Tobias JD. Changes in tissue oxygenation following caudal epidural blockade in infants and children. *Paediatr Anaesth* 2012; 22: 1068-71.
37. Rhondali O, Juhel S, Mathews S, Cellier Q, Desgranges FP, Mahr A, et al. Impact of sevoflurane anesthesia on brain oxygenation in children younger than 2 years. *Paediatr Anaesth* 2014; 24: 734-40.
38. Michelet D, Arslan O, Hilly J, Mangalsuren N, Brasher C, Grace R, et al. Intraoperative changes in blood pressure associated with cerebral desaturation in infants. *Paediatr Anaesth* 2015; 25: 681-8.
39. Rhondali O, André C, Pouyau A, Mahr A, Juhel S, De Queiroz M, et al. Sevoflurane anesthesia and brain perfusion. *Paediatr Anaesth*. 2015; 25: 180-5.
40. Koch HW, Hansen TG. Perioperative use of cerebral and renal near-infrared spectroscopy in neonates: a 24-h observational study. *Paediatr Anaesth* 2016; 26: 190-8.

41. Dotta A, Rechichi J, Campi F, Braguglia A, Palamides S, Capolupo I, et al. Effects of surgical repair of congenital diaphragmatic hernia on cerebral hemodynamics evaluated by near-infrared spectroscopy. *J Pediatr Surg* 2005; 40: 1748-52.
42. Westgarth-Taylor C, de Lijster L, van Bogerijen G, Millar AJ, Karpelowsky J. A prospective assessment of renal oxygenation in children undergoing laparoscopy using near-infrared spectroscopy. *Surg Endosc* 2013; 27: 3696-704.
43. Conforti A, Giliberti P, Mondì V, Valfré L, Sgro S, Picardo S, et al. Near infrared spectroscopy: experience on esophageal atresia infants. *J Pediatr Surg* 2014; 49: 1064-8.
44. Lemmers PM, Toet MC, van Bel F. Impact of patent ductus arteriosus and subsequent therapy with indomethacin on cerebral oxygenation in preterm infants. *Pediatrics* 2008; 121: 142-7.
45. Lemmers PM, Molenschot MC, Evens J, Toet MC, van Bel F. Is cerebral oxygen supply compromised in preterm infants undergoing surgical closure for patent ductus arteriosus? *Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed* 2010; 95: F429-34.
46. Pichler G, Urlesberger B, Baik N, Schwabegger B, Binder-Heschl C, Avian A, et al. Cerebral Oxygen Saturation to Guide Oxygen Delivery in Preterm Neonates for the Immediate Transition after Birth: A 2-Center Randomized Controlled Pilot Feasibility Trial. *J Pediatr* 2016; 170: 73-8.
47. Baik N, Urlesberger B, Schwabegger B, Schmölder GM, Mileder L, Avian A, et al. Reference Ranges for Cerebral Tissue Oxygen Saturation Index in Term Neonates during Immediate Neonatal Transition after Birth. *Neonatology* 2015; 108: 283-6.
48. Banerjee J, Leung TS, Aladangady N. Cerebral blood flow and oximetry response to blood transfusion in relation to chronological age in preterm infants. *Early Hum Dev* 2016; 97:1-8.
49. Bailey SM, Hendricks-Muñoz KD, Mally P. Splanchnic-cerebral oxygenation ratio as a marker of preterm infant blood transfusion needs. *Transfusion* 2012; 52: 252-60.
50. Mintzer JP, Parvez B, La Gamma EF. Umbilical Arterial Blood Sampling Alters Cerebral Tissue Oxygenation in Very Low Birth Weight Neonates. *J Pediatr* 2015; 167: 1013.
51. Fortune PM, Wagstaff M, Petros AJ. Cerebro-splanchnic oxygenation ratio (CSOR) using near infrared spectroscopy may be able to predict splanchnic ischaemia in neonates. *Intensive Care Med* 2001; 27: 1401-7.