

Oxymétrie pulsée : contribution au diagnostic et à l'approche hémodynamique en pédiatrie*

Pulse oximetry: a tool for diagnosis and hemodynamic assessment in pediatrics

S. Durand · J. Baleine · J. Le Bouhellec · C. Milési · R. Mesnage · G. Cambonie

Reçu le 30 septembre 2014 ; accepté le 18 novembre 2014
© SRLF et Lavoisier SAS 2014

Résumé L'oxymétrie de pouls est utilisée en pédiatrie depuis presque 30 ans, pour surveiller la fonction respiratoire et ajuster l'oxygénothérapie. Des avancées technologiques dans le traitement du signal pléthysmographique suggèrent un intérêt potentiel pour l'évaluation hémodynamique. L'indice de perfusion périphérique (IP), qui évalue le contingent pulsatile du signal, est proposé comme indicateur continu et non invasif de la circulation distale. Son utilisation clinique a surtout été développée en néonatalogie, comme aide au diagnostic ou complément à l'exploration de la macrocirculation. Dans la perspective d'un dépistage de cardiopathie, une valeur seuil $< 0,70$ est évocatrice d'une obstruction critique sur la voie d'éjection ventriculaire gauche. Chez le nouveau-né prématuré, plusieurs observations soulignent sa pertinence pour le diagnostic de bas débit systématique ou de persistance du canal artériel. Les indices dérivés de la variabilité respiratoire de la pléthysmographie de l'oxymètre ont fait principalement l'objet de travaux chez l'enfant, au bloc opératoire, dans la perspective d'évaluer sa volémie et de prédire sa réponse au remplissage vasculaire. Cependant, les résultats sont contradictoires et ne permettent actuellement pas, dans ce contexte, de rationaliser l'administration de fluides avec fiabilité par l'utilisation de ces paramètres. Des études supplémentaires sont nécessaires, particulièrement en réanimation pédiatrique, pour démontrer que l'oxymétrie de pouls peut être un outil hémodynamique d'une validité comparable à celle établie en médecine intensive de l'adulte.

Mots clés Enfant · Hémodynamique · Indice de perfusion · Indice de variabilité pléthysmographique · Oxymétrie de pouls

Abstract Since more than 30 years, pulse oximetry is used in pediatrics to monitor respiratory function and adjust oxygen therapy. Advances in signal processing of plethysmographic curves may confer additional interest for hemodynamic evaluation. The perfusion index (PI) deriving from pulse oxymetry and quantifying the pulsatile component of the signal has been proposed as continuous and noninvasive indicator of distal vessel function. The clinical practice with this index has mainly been developed in neonates. In the context of congenital heart disease screening, a value of < 0.70 may indicate critical left heart obstruction. In premature neonates, observations also suggest that PI may be relevant to diagnose low systemic output or persistent ductus arteriosus. Indices derived from respiratory variations of pulse oximeter plethysmograph amplitude have been mainly tested in children before or during surgery, to assess volemia and predict fluid responsiveness in the operating room. However, the currently debated data based on these indices may still not allow their use to guide reliable fluid administration. Further studies are required, particularly in children hospitalized in the intensive care unit, to demonstrate that pulse oximetry is an accurate hemodynamic tool, as clearly established in adults.

Keywords Child · Hemodynamics · Perfusion index · Pulse oximeter plethysmograph amplitude variation · Pulse oximetry

S. Durand · J. Baleine · J. Le Bouhellec · C. Milési · R. Mesnage · G. Cambonie (✉)
Département de pédiatrie néonatale et réanimations,
pôle hospitalo-universitaire enfant, CHRU de Montpellier,
F-34000 France
e-mail : g-cambonie@chu-montpellier.fr

Oxymétrie de pouls

Principes

L'oxymétrie de pouls ou saturation pulsée en oxygène (SpO_2) est une méthode non invasive qui permet de quantifier

* Cet article correspond à la conférence faite par l'auteur au congrès de la SRLF 2015 dans la session : *Marqueurs de décompensation*.

l'oxygène combiné à l'hémoglobine sanguine. Elle permet d'accéder à la saturation artérielle fonctionnelle en oxygène, qui ne prend en considération que la forme oxygénée (HbO_2) et réduite de l'hémoglobine (Hb) selon la formule $[\text{HbO}_2/(\text{Hb} + \text{HbO}_2)] \times 100$.

Le prélèvement de sang artériel reste la référence pour la détermination de la saturation artérielle en oxygène (SaO_2) ; mais il s'agit d'une mesure invasive et ponctuelle. Par spectrophotométrie, on peut à partir d'un échantillon sanguin mesurer les différentes formes d'hémoglobine puisque chacune absorbe des longueurs d'ondes spécifiques selon sa concentration (loi de Beer-Lambert). L'analyseur peut ainsi évaluer une saturation artérielle fractionnelle en oxygène, ratio de l'oxyhémoglobine sur l'hémoglobine totale.

L'oxymétrie pulsée par transmission est basée sur la mesure d'intensités lumineuses transmises d'un émetteur à un photodétecteur. Elle repose sur l'association de deux techniques: la spectrophotométrie d'absorption, qui permet de distinguer HbO_2 de Hb et la photopléthysmographie, qui permet de séparer la composante pulsatile de l'absorption de la composante non pulsatile [1].

L'oxymètre est constitué de diodes émettant deux ondes lumineuses, une lumière rouge (600 à 750 nm, absorbée préférentiellement par Hb) et une lumière infrarouge (850 à 1000 nm, absorbée préférentiellement par HbO_2), dont les coefficients d'absorption à 660 nm et 940 nm varient d'un facteur 10 selon la nature de l'hémoglobine rencontrée. L'émetteur est couplé à un photodétecteur puis à un moniteur qui mesure et analyse la lumière après son transit tissulaire.

Le principe pléthysmographique permet d'individualiser l'absorption lumineuse liée à la variation cyclique du volume de sang artériel. L'oxymètre de pouls réalise des centaines de mesures par seconde et détermine des phases d'absorption maximale et minimale pour chaque longueur d'onde. La différence entre ces phases correspond au flux de sang artériel systolique, responsable de la composante variable et pulsatile de l'absorption lumineuse. La composante stable et statique de l'absorption est d'origine multiple: flux artériel diastolique, sang veineux, tissus cutané, sous-cutané et osseux.

Un algorithme de calcul, calibré avec des mesures faites chez des volontaires sains, permet au moniteur de déterminer la SpO_2 à partir des ratios d'absorption des ondes lumineuses dans le rouge et l'infrarouge lors de la phase pulsatile. La relation entre SaO_2 et SpO_2 correspond à des valeurs de SaO_2 mesurées entre 100 et 75 %, après exposition à des mélanges hypoxiques. En dessous de 75 %, les SpO_2 sont extrapolées à partir des données obtenues entre 75 et 100 %. Quelle que soit sa valeur, la SpO_2 est la comparaison d'une valeur d'absorption avec une valeur obtenue dans des conditions normales. Il ne s'agit pas d'une valeur directement mesurée [2].

Courbe pléthysmographique

La courbe pléthysmographique, élaborée à partir des variations pulsatiles de l'absorption de la lumière infrarouge par l'oxyhémoglobine, permet d'attester l'origine artérielle du signal. Elle représente « un contrôle qualité » immédiat quant à l'interprétabilité de la SpO_2 affichée [3]. La présence d'une sinusoïde régulière avec onde dicrote ne peut en effet être reproduite par des ondes pseudopulsatiles liées à la lumière ambiante, comme par exemple les lampes de scialytique ou de photothérapie.

Les variations de l'absorption lumineuse qui génèrent la courbe sont essentiellement systoliques et proportionnelles aux variations de volume. Elles peuvent être interprétées, sous certaines conditions, comme un paramètre hémodynamique. Dans cette perspective, deux types d'indices ont été dérivés de la courbe pléthysmographique : l'indice de perfusion périphérique (IP) et les indices de variabilité de la pléthysmographie de l'oxymètre de pouls.

Indice de perfusion périphérique (IP)

L'IP est défini par le rapport entre la composante pulsatile (I_p) et non pulsatile (I_{np}) de la lumière infrarouge atteignant le photorécepteur de l'oxymètre. Il s'agit d'une valeur numérique, obtenue par un algorithme, qui répond à la formule suivante : $\text{IP} = (I_p/I_{np}) \times 100$.

Une modification de l'index peut résulter de phénomènes circulatoires locaux. Dans cette perspective, une augmentation de l'IP traduit généralement une vasodilatation et sa baisse une vasoconstriction, voire des perturbations locales de type hypothermie, vasospasme ou microembols au niveau du site de mesure. Cependant, des paramètres circulatoires plus globaux exercent aussi une influence, comme la volémie, le volume d'éjection systolique et le retour veineux. L'IP est ainsi un indice complexe, reflétant de variations systolo-diastoliques affectant la macro- et la microcirculation [4].

Variabilité de la pléthysmographie de l'oxymètre de pouls

Au cours de la ventilation mécanique, l'impédance au retour veineux systémique est maximale à l'insufflation, induisant une gêne au retour veineux vers le cœur droit. La variation de précharge du ventricule droit pendant la ventilation mécanique se transmet au ventricule gauche 2 à 3 cycles cardiaques plus tard. La variation de la précharge cardiaque peut être évaluée au mieux par les indices dynamiques au cours de la variation cyclique de la ventilation : variation de la pression artérielle invasive pulsée (ΔPP) [5], variation de la vélocité aortique maximale au Doppler (ΔVmAo) [6] ou variation du diamètre de la veine cave inférieure ou supérieure (ΔVCI ou

VCS) [7,8]. Chez l'adulte en ventilation mécanique, ces marqueurs de la variabilité du volume d'éjection ventriculaire gauche ont prouvé leur pertinence pour prédire la réponse au remplissage vasculaire (RV) [9].

Chez l'enfant, l'administration de RV est également très fréquente au bloc opératoire ou en réanimation. Quelques études ont montré que les indices dynamiques développés en médecine d'adulte pouvaient être utilement exploités. Notamment, Durand et al. observaient lors d'un travail sur 28 patients de 28,5 (16-44) mois en assistance ventilatoire, qu'une $\Delta VmAo > 12\%$ pouvait prédire l'efficacité du RV, définie par une augmentation $>15\%$ du volume d'éjection ventriculaire gauche [10].

La similitude entre les courbes de pression artérielle sanguine et de pléthysmographie a suscité des travaux visant à établir l'intérêt de l'oxymétrie pulsée dans l'évaluation non invasive de la volémie. L'amplitude de la courbe pléthysmographique dépend en effet du volume sanguin tissulaire dans l'environnement immédiat de l'oxymètre de pouls et, sur une brève période de temps, on accepte que ce dernier soit principalement déterminé par le volume d'éjection, le tonus vasculaire restant constant. Deux indices de variabilité ont été élaborés à partir de ce principe.

La variabilité de la pléthysmographie de l'oxymètre de pouls (ΔPOP) est calculée manuellement à partir des amplitudes maximales (POP_{max}) et minimales (POP_{min}) de la courbe pléthysmographique au cours d'un cycle respiratoire selon la formule : $POP = (POP_{max} - POP_{min}) / [(POP_{max} + POP_{min})/2]$. Le gain est maintenu constant pendant l'enregistrement pour ne pas modifier artificiellement l'amplitude du signal et l'expression de la mesure correspond en général à la moyenne de trois cycles respiratoires consécutifs [11].

L'indice de variabilité de l'onde pléthysmographique (IVP) est un algorithme industriel (Masimo Corp., Irvine, CA, États-Unis) permettant un calcul continu et automatique des variations de l'IP – qui donne une estimation de l'amplitude de l'onde – se produisant sur un intervalle de temps incluant au moins un cycle respiratoire selon la formule : $IVP = [(IP_{max} - IP_{min})/IP_{max}] \times 100$ [12].

La pléthysmographie présente des avantages évidents en termes de non-invasivité et de disponibilité immédiate, permettant de guider les étapes préliminaires de traitement d'un choc dès le service d'urgence [13]. Dans un travail très rigoureux, Feissel et al. montraient cependant que ΔPP était mieux corrélé que ΔPOP aux variations après RV de l'index cardiaque, suggérant que l'analyse de pression artérielle invasive était plus précise en termes de prédiction de l'efficacité de l'expansion volémique, comme de quantification de la réponse hémodynamique au RV [14]. Dans une autre étude, il était aussi observé que le signal n'était pas constamment obtenu chez des patients traités par noradrénaline, où l'IVP s'avérait également moins performant que ΔPP pour prédire une précharge-dépendance [15]. S'il existe donc des

similitudes entre le degré de variation respiratoire de la courbe de pléthysmographie et celui de la variation respiratoire de la pression de pouls artérielle, ces deux mesures ne couvrent pas la même réalité physiologique. Le volume d'éjection n'est pas le seul déterminant de l'amplitude de la courbe de pléthysmographie, influencée aussi par la compliance artérielle et veineuse, la pression veineuse en aval du site de mesure et la microcirculation locale [16]. La variabilité respiratoire des signaux obtenus à partir de la pléthysmographie ne dépend donc pas exclusivement de variations locales du volume sanguin artériel mais également de celles, plus lentes, du volume de sang veineux. Ce dernier est déterminé par le retour veineux systémique, véhiculé dans un lit très compliant, donc particulièrement sensible aux conditions ventilatoires. Le recours à des traitements vasopresseurs peut modifier la relation entre le volume d'éjection et la courbe pléthysmographique, car ils influencent directement la compliance artérielle et veineuse au niveau du site de mesure, tout comme la pression veineuse distale [17].

Applications cliniques de l'IP en néonatalogie et en pédiatrie

Expérience en néonatalogie

Valeurs de références en populations « saines »

- Nouveau-né à terme

Zaramella et al. ont évalué si l'IP pouvait représenter un indicateur fiable du flux sanguin périphérique et de ses variations [18]. L'étude menée au troisième jour de vie auprès de 43 nouveau-nés à terme et sains permettait d'établir une corrélation modeste ($R^2 = 0,11$) entre l'IP, mesuré au niveau de l'orteil, et la perfusion du muscle tricipital évaluée par spectroscopie dans le proche infrarouge (NIRS). Aucune corrélation n'était observée entre l'IP et la consommation ou l'extraction d'oxygène, mais la plupart des enfants étaient étudiés en phase de repos et d'activité musculaire réduite.

Les valeurs de références de l'IP ont été établies à partir d'une cohorte de 10 000 nouveau-nés à terme indemnes de toute pathologie néonatale, notamment de cardiopathie, dans la région de Västra Götaland en Suède. Une mesure systématique était réalisée aux bords externes de la main droite et de l'extrémité distale d'un pied. La valeur médiane était de 1,70 (1,18-2,50) à un âge post-natal compris entre 1 et 120 heures. Les seuils correspondant, respectivement, au 5^e et 95^e percentile étaient 0,70 et 4,50 pour les deux sites de mesure. La distribution de la différence main-pied était Gaussienne, avec une valeur moyenne de -0,02. L'étude renforçait l'intérêt potentiel de l'IP en tant que marqueur de la perfusion périphérique, puisque tous les patients porteurs

d'une pathologie obstructive du cœur gauche présentaient des valeurs inférieures à l'étendue interquartile, soit $< 1,20$ [19]. Un travail plus récent sur un échantillon de 241 nouveau-nés sains, comportant 80 % de naissances à terme, évaluait les variations temporelles de l'IP après un délai de 6 heures par rapport à la naissance, compatible avec une stabilité cardiorespiratoire. Les valeurs de l'indice chez les enfants nés à terme étaient de 1,35 (1,02-1,91) au membre supérieur droit, c'est-à-dire en territoire préductal et de 0,88 (0,62-1,22) au membre inférieur (territoire postductal). Elles n'étaient pas affectées par l'âge post-natal au cours des cinq premiers jours de vie. Aucune corrélation n'était observée entre l'IP, la SpO_2 , la fréquence cardiaque et la pression artérielle systolique ou diastolique [20].

- Nouveau-né prématuré

Une naissance avant terme n'altérerait pas la reproductibilité de la mesure, cependant les valeurs de l'IP étaient sensiblement différentes [21]. Dans une série de 30 nouveau-nés, hémodynamiquement stables, d'âge gestationnel moyen de $32,5 \pm 2,1$ semaines, les auteurs rapportaient un indice plus faible mais qui augmentait de $0,9 \pm 0,6$ à $1,3 \pm 0,9$ au cours des trois premiers jours [22]. Les valeurs de l'IP étaient également plus basses et croissantes avec l'âge post-natal dans un travail prospectif mené auprès de 30 grands prématurés de terme < 32 semaines: 0,60 (0,10-1,60) avant six heures post-natales, 0,51 (0,07-1,50) entre 6 et 24 heures, 0,70 (0,40-1,70) entre 24 et 48 heures et 0,80 (0,14-1,41) entre 48 et 72 heures [23]. Cette majoration post-natale de l'IP observée dans plusieurs études [22-24] pourrait traduire la vasodilatation systémique qui survient avec un degré variable chez la plupart des prématurés après le premier jour de vie [25].

L'IP donne aussi une illustration du débit sanguin systémique. L'exploration synchrone par l'échographie et la photopléthysmographie confirmait une corrélation significative entre l'IP et le débit dans la veine cave supérieure [$R = 0,509$ (0,335-0,649)], qui n'était pas affectée par la persistance du canal artériel (PCA) ou le niveau de température cutanée [23].

Au-delà de la période adaptative, l'IP fournit une estimation de la perfusion tissulaire chez le nouveau-né prématuré. Un travail mené auprès de 31 patients en phase de croissance montrait une corrélation inverse entre l'IP et le gradient entre la température centrale, mesurée au niveau des flancs et les températures périphériques, prises au niveau des bras et jambes (R^2 entre 0,25 et 0,30). L'IP était plus élevé en décubitus ventral que dorsal en sommeil calme ($3,7 \pm 0,9$ vs $3,1 \pm 0,7$, $p < 0,0005$), comme en sommeil agité ($2,9 \pm 0,9$ vs $2,3 \pm 0,9$, $p < 0,0001$). Ce résultat traduisait une vasodilatation cutanée, cette position étant associée à une réduction des pertes thermiques et une élévation de la température corporelle [26].

Situations pathologiques

- Cardiopathies congénitales

Malgré les progrès du diagnostic prénatal, 20 % à 30 % des nouveau-nés porteurs d'une cardiopathie congénitale de gravité variable peuvent quitter leur maternité de naissance sans que le diagnostic soit porté [27]. Certaines cardiopathies ne sont ainsi dépistées qu'au stade de défaillance cardiaque aiguë. La combinaison de l'oxymétrie pulsée dans les 48 heures suivant la naissance à l'examen clinique augmentait la probabilité de dépistage à 92 %. L'algorithme retenu, développé en Suède, était principalement basé sur la SpO_2 mais précisait qu'un $IP < 0,7$ en territoire sus- ou sous-ductal pouvait aussi traduire l'existence d'une cardiopathie congénitale [28]. En cas d'hypoplasie du cœur gauche, un IP plus faible au membre supérieur était physiologiquement cohérent avec la vascularisation rétrograde de l'arche aortique par le canal artériel. En cas d' $IP < 0,7$ au membre supérieur ou inférieur, le risque relatif de pathologie obstructive de la voie gauche était de 23,75 (6,36-88,74) et le rapport de vraisemblance de 11 [19]. Dans cet objectif, l'utilisation de l'oxymétrie est devenue systématique dans la plupart des états aux États-Unis et elle est recommandée dans quelques pays Européens [29].

- Chorioamniotite infraclinique

Dans les 24 heures suivant l'admission en néonatalogie, la mesure de l'IP dans un effectif de 101 nouveau-nés modérément prématurés distinguait ceux présentant un score de gravité élevé ou développant ultérieurement une pathologie sévère. Un $IP < 1,24$ permettait de prédire une sévérité supérieure avec une sensibilité de 95,5 % et une spécificité de 93,7 % [30]. L'étude n'apportait pas de précisions sur les mécanismes qui sous-tendaient la baisse de l'index dans la population à risque. L'hypothèse d'une chorioamniotite infraclinique a été évoquée, puisque la présence d'une inflammation à l'histologie placentaire était associée à un pH fœtal, un score d'Apgar et des IP plus faibles 1 et 5 minutes après la naissance, alors que l'admission en réanimation néonatale, le risque d'intubation et les scores de gravité étaient supérieurs [31]. La chorioamniotite est associée à un syndrome inflammatoire systémique fœtal qui peut générer une vasoconstriction systémique et/ou des troubles microcirculatoires contribuant à la baisse de l'IP observée immédiatement après la naissance. Sur le versant maternel, la réponse de stress implique les axes corticotrope et adrénergique, qui modifient aussi les résistances vasculaires périphériques. Un IP plus faible était ainsi observé en cas de chorioamniotite infraclinique, à la phase pré-anesthésique de la césarienne [32].

- Morbidité du grand prématuré

Une étude prospective randomisée chez 92 nouveau-nés prématurés en détresse respiratoire observait que l'évolution précoce de l'IP était influencée par le type de surfactant naturel administré. Dans les cinq premiers jours, un $IP < 0,7$ était également associé à des risques plus élevés d'hémorragies pulmonaire et intraventriculaire cérébrale, de PCA, d'entérococolite ulcéronécrosante et de décès [33].

Un travail mené récemment auprès de 30 prématurés de 31 (29-32) semaines d'âge gestationnel précise l'influence de la PCA sur l'IP. En présence d'un large canal artériel shuntant de gauche à droite, on observait des différences importantes entre les valeurs d'IP mesurées simultanément dans le territoire sus- et sous-ductal. Par exemple, au 3^e jour post-natal, la différence était égale à 1,32 (0,28-1,83) pour un diamètre canalaire égal à 3 (2,6-3,4) mm, alors qu'elle n'était que de 0,08 (-0,07- 0,26) quand le canal artériel était fermé ou de diamètre $< 1,5$ mm [34]. La différence marquée de l'IP entre les deux territoires peut traduire l'augmentation du flux systolique artériel dans le territoire sus-ductal par augmentation de la précharge et/ou une vasoconstriction adaptative au phénomène de vol diastolique dans le territoire sous-ductal. Ce dernier mécanisme a été observé en présence d'une PCA significative par polarisation spectrale orthogonale [35].

Expérience chez le nourrisson et l'enfant

Chez l'adulte, la valeur médiane de l'IP était 1,4 (0,7-4,0) en présence d'indicateurs de perfusion périphérique normaux, i.e. un temps de recoloration cutané < 2 s et un gradient de température central/périphérique $< 7^{\circ}\text{C}$. Un $IP < 1,4$ permettait dans ce travail de diagnostiquer une hypoperfusion périphérique avec une sensibilité de 86 % et une spécificité de 100 % [36].

L'IP a fait l'objet d'un nombre très limité d'études en pédiatrie, menées principalement au bloc opératoire. Sa mesure aux 4 membres chez 40 enfants à l'occasion d'une chirurgie de hernie sous bloc épidural lombaire montrait une augmentation de l'ordre de 40 % aux membres inférieurs, témoin d'une vasodilatation dans le territoire anesthésié [37]. Ces résultats préliminaires ont été confirmés par un essai randomisé ayant inclus 40 garçons de 2 à 8 ans lors d'une circoncision. La comparaison portait sur la variation des valeurs de l'IP au deuxième orteil gauche après administration de kétamine seule (2 mg/kg), par rapport à un bloc caudal par lidocaïne à 1 % (1 ml/kg) après anesthésie par kétamine à la même dose. Dans cette étude, la valeur basale moyenne de l'IP était $2,4 \pm 1,5$ dans le premier groupe et $2,3 \pm 0,8$ dans le second. La chute de l'IP sous kétamine atteignait au maximum 71 ± 9 % de la valeur initiale 15 minutes après le bolus, alors que les variations maximales

de fréquence cardiaque ($+10 \pm 6$ % à 2 min) et de la pression artérielle moyenne (11 ± 6 % à 3 min) étaient beaucoup plus modestes. L'anesthésie locorégionale provoquait une augmentation de l'IP très forte, rapide (363 ± 318 % à 5 min) et prolongée (778 ± 578 % à 20 min), alors que la fréquence cardiaque et la pression artérielle moyenne n'étaient pas significativement différentes par rapport aux valeurs recensées avant la procédure. Les auteurs concluaient sur la pertinence de l'index pour objectiver les effets sympathomimétiques ou sympatholytiques de la kétamine ou du bloc caudal, et sur sa pertinence pour prédire très rapidement l'efficacité de l'anesthésie épidurale chez l'enfant après prémédication [38].

Synthèse

L'utilisation de l'IP en pédiatrie a été le plus souvent envisagée comme une aide au diagnostic voire un marqueur de gravité. En termes hémodynamiques, les travaux ont principalement testé si l'IP pouvait représenter une alternative ou un complément à l'exploration de la macrocirculation et non si elle pouvait permettre l'exploration ou la surveillance de l'hémodynamique périphérique ou de la microcirculation. Le Tableau 1 regroupe les valeurs de références et seuils pathologiques de l'IP dans les populations de nouveau-nés, d'enfants et d'adulte.

Applications cliniques de la variabilité de la pléthysmographie de l'oxymètre de pouls en néonatalogie et en pédiatrie

Expérience en néonatalogie

Une étude auprès de 242 nouveau-nés indiquait pour valeurs de références de l'IPV, chez un patient à terme et asymptomatique, une valeur médiane à 20 (15-24) %. L'indice était influencé par l'état comportemental, notamment les cris ou l'agitation entraînaient une forte majoration. Les corrélations allaient dans le même sens pour l'IP et la fréquence cardiaque de l'oxymètre et en sens inverse pour la SpO_2 [39].

Le schéma circulatoire au cours de la période de transition entre vie intra- et extra-utérine chez le nouveau-né grand prématuré se caractérise par la présence de shunts, atrial et ductal, qui augmentent très nettement la précharge et la performance du ventricule gauche. Dans ces conditions, Vidal et al. ont étudié la signification de l'IPV dans une population de 45 grands prématurés de 27 (25-28) semaines et 857 (750-1080) g, en couplant cet indice à des évaluations échocardiographiques au cours de la première semaine post-natale. La valeur médiane de l'IPV était 22 (18-27) % dans cette population, non influencé par l'âge post-natal mais par

Tableau 1 Valeurs de références et seuils pathologiques pour l'indice de perfusion périphérique (IP) pléthysmographique dans des populations de nouveau-nés, d'enfants et d'adulte. AG : âge gestationnel à la naissance, exprimé en semaines d'aménorrhée (SA) ; APN : âge post-natal (h : heures, j ou J : jours) ; DMP : différence main-pied ; IP : indice de perfusion périphérique ; MI : membre inférieur ; MS : membre supérieur ; OR : odds ratio ; PCA : persistance du canal artériel ; courbe ROC : *receiver operating characteristics curve* ; RVN : rapport de vraisemblance négative ; RVP : rapport de vraisemblance positive ; se : sensibilité ; sp : spécificité ; VCS : flux dans la veine cave supérieure ; bas si < 40 ml/kg/min ; VI : ventilation invasive ; VNI : ventilation non invasive ; VPN : valeur prédictive négative ; VPP : valeur prédictive positive. *pied droit ou gauche

Population	Pathologie	Effectif	Statistiques	Référence
Nouveau-nés prématurés	AG 29 (25-31) SA APN <48 h VI : 27 %, VNI : 63 %	30	IP médian 0,70 (0,29–1,35) DMP moyenne 0,24 (p<0,001)	Irlande 2013 [21]
Nouveau-nés prématurés	AG 32,5 ± 2,1 SA APN <7 j Stabilité clinique (FiO ₂ max >0,24)	30	IP moyen post-ductal* 0,9 (0,6) J1 1,2 (1,0) J3 1,3 (0,9) J7 (p<0,001 vs J1)	Italie 2010 [22]
Nouveau-nés prématurés	AG 34,7 ± 4,0 SA APN <24 h 43 % morbidité sévère : sepsis, dysplasie broncho-pulmonaire, lésions neurologiques, entérocolites	101	IP post-ductal <1,24 prédictif de morbidité sévère Se : 96 % ; Sp : 94 % VPP : 91 % ; VPN : 97 % Aire sous courbe ROC : 0,98	Italie 2002 [30]
Nouveau-nés prématurés	AG 28,6 ± 2,2 SA APN <72 h VI : 73 %, VNI 27 % 10 % bas flux VCS	30	IP post-ductal <0,42 prédictif d'un bas flux VCS Se : 88 % ; Sp : 86 % VPP : 39 % ; VPN : 99 % Aire sous courbe ROC : 0,88	Japon 2010 [23]
Nouveau-nés prématurés	AG 31 (29-32) SA APN <7 j PCA significative 46,7 % à J1 33,3 % à J3	30	DMP J1 et J3 prédictives d'une PCA significative Seuils : J1>0,79; J3 >0,26 Se : 71/80 % ; Sp : 93/80 % VPP : 91/80 % ; VPN : 79/80 % Aire courbe ROC : 0,78/0,82	Turquie 2014 [34]
Nouveau-nés à terme	APN 42 (1-310) h Asymptomatiques 9 cardiopathies obstructives de la voie gauche (COVG)	10000	IP médian : 1,70 (1,18-2,50) DMP moyenne : -0,02 IP < 0,7 associé au risque de COVG [OR : 23,75 (6,36–88,74)]	Suède 2007 [19]
Garçons 2-8 ans	Bloc opératoire Avant circoncision	40	IP moyen au MI : 2,3 ± 0,8 à 2,4 ± 1,5	Chine 2013 [38]
Adultes	Sains Soins intensifs médico-chirurgicale	101 37	IP médian au MS : 1,4 (0,7-3,0) IP <1,4 prédictif d'une perfusion périphérique anormale Se : 81 % ; Sp : 86 % RVP : 6 ; RVN : 0,2 Aire sous courbe ROC : 0,91	Pays Bas 2002 [36]

la typologie du flux ductal (Fig. 1). Une conséquence précoce d'un shunt gauche-droit significatif par le canal artériel est l'augmentation massive du flux artériel pulmonaire, déterminant essentiel de la précharge ventriculaire gauche. Ainsi, dans cette étude, une PCA de typologie « croissante » et « pulsatile » était non seulement associée à des marqueurs

d'hyperdébit pulmonaire – comme l'élévation du rapport oreillette gauche/aorte ou de la vélocité télédiastolique dans l'artère pulmonaire gauche – mais également à des valeurs plus basses d'IVP. À l'inverse, une PCA avec shunt droit-gauche, en « pré-fermeture » ou un canal artériel fermé étaient associés à des IVP plus élevés [24].

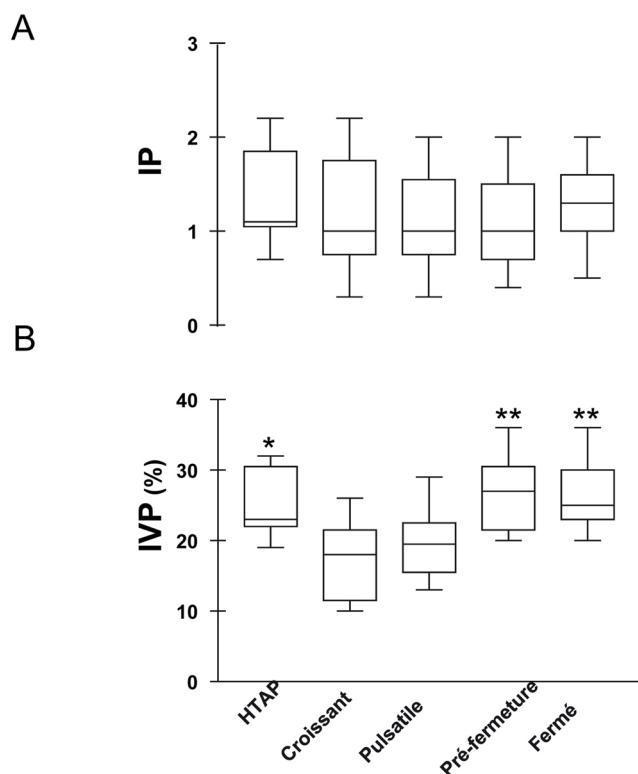


Fig. 1 Indice de perfusion périphérique (IP, 1A) et ses variations dynamiques (IVP, 1B), en fonction de la typologie du flux dans le canal artériel. Adapté d'après Vidal et al. [24]. * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$ comparés aux groupes croissant et pulsatile. HTAP : hypertension artérielle pulmonaire

Expérience en pédiatrie

Deux études ont évalué la pertinence de l'IVP pour prédire la réponse au RV. La première était menée auprès de 27 enfants de 17 ± 16 mois et $10,4 \pm 6,3$ kg, en assistance ventilatoire mécanique comportant un volume courant de 10 ml/kg sur une PEEP de 3 à 5 cm d'eau, avant une intervention pour une cardiopathie congénitale. Les données hémodynamiques étaient colligées après l'induction anesthésique et avant l'ouverture du thorax. Si les meilleurs indices prédictifs d'efficacité du RV étaient issus du Doppler transœsophagien (DTO), particulièrement la variation respiratoire des pics de vélocité aortique, les auteurs observaient néanmoins que l'IVP était corrélé à l'augmentation du volume d'éjection systolique indexé (VESi) après remplissage par 10 ml/kg d'hydroxyéthylamidon à 6 % ($R = 0,50$, $p = 0,009$). Un $IVP \geq 13$ % permettait de prédire l'efficacité du RV, définie par une augmentation d'au moins 15 % du VESi, avec une sensibilité à 84 %, une spécificité à 61 %. L'aire sous courbe de prédiction était de 0,78, confirmant que l'IVP était nettement supérieure aux indices statiques

comme la pression veineuse centrale (0,57) pour prédire la réponse au remplissage, mais inférieure aux indices dynamiques comme la $\Delta VmAo$ (0,92) ou la variabilité respiratoire de l'intégrale temps-vitesse (0,84), tous deux reflets du volume d'éjection systolique [40]. La deuxième étude était réalisée chez 33 enfants de moins de 9 ans, avec des conditions de ventilation comparables, au cours d'une intervention neurochirurgicale. Ici encore, les seuls indices prédictifs d'efficacité du RV par un colloïde étaient $\Delta VmAo$ et l'IVP, qui permettaient de prédire de manière relativement fiable (aires sous la courbe respectivement égale à 0,8 et 0,77) la réponse à l'expansion volémique. Néanmoins, les indices statiques (pression artérielle systolique, fréquence cardiaque, PVC) et même les autres indices dynamiques étaient faiblement corrélés à une réponse positive à l'expansion volémique (aires sous la courbe respectivement égales à 0,37 et 0,54 pour la ΔVCI et le ΔPP) [41].

De façon surprenante, ces données n'ont pas été confirmées par le travail de Pereira de Souza Neto et al., réalisé auprès de 30 enfants de 0 à 14 ans admis au bloc opératoire pour un répertoire très limité d'interventions neurochirurgicales. En effet, seul $\Delta VmAo$ permettait de prédire la réponse à un RV par 20 ml/kg de sérum salé isotonique. Aucune corrélation n'était d'ailleurs observée entre $\Delta VmAo$ et la variabilité respiratoire de l'onde pléthysmographique, que cette dernière soit déterminée à partir de calculs automatiques (IVP , $r = 0,01$, $p = 0,4$) ou manuels (ΔPOP , $r = 0,01$, $p = 0,78$) [42]. L'étude renforçait l'hypothèse formulée par Durand et al., d'une compliance artérielle plus élevée chez l'enfant « absorbe » et finalement neutralise les fluctuations de pression mais aussi de volume générées par le ventricule gauche [10]. En effet, la capacité de distension artérielle indexée sur la surface corporelle décroît progressivement avec l'âge, qui s'accompagne d'une augmentation progressive de l'épaisseur et de la rigidité pariétale. À cet égard, il est possible que les conditions pathologiques associées à une réduction de compliance artérielle, par exemple l'augmentation du tonus sympathique en présence d'une cardiopathie congénitale ou associée à l'utilisation de vasopresseurs, rendent compte d'une performance satisfaisante de l'IVP dans certaines populations.

Les conditions physiologiques de l'enfant au bloc opératoire ne sont pas toujours représentatives de celles observées en réanimation pédiatrique. En particulier, la présence d'une anomalie de compliance thoracopulmonaire, dans les situations de maladies respiratoires sévères (SDRA), peut amplifier l'expression des interactions cœur-poumons et le retentissement hémodynamique de la ventilation contrôlée.

Aucune étude interventionnelle n'a été réalisée en réanimation pédiatrique dans l'objectif d'évaluer l'intérêt de ΔPOP ou de l'IVP pour prédire l'efficacité du RV. Une étude observationnelle a néanmoins été pratiquée auprès de 33 patients de moins de 10 ans, nécessitant un support ventilatoire invasif

pour des affections de nature médicale ou chirurgicale. Elle montrait une très forte corrélation entre les variabilités respiratoires de l'onde pléthysmographique et de la pression artérielle pulsée, calculées manuellement, et l'IVP, encourageant à réaliser des investigations complémentaires sur la pertinence de cet index dans un environnement plus strictement réanimatoire [43].

Les études futures sur la variabilité de la pléthysmographie de l'oxymètre de pouls doivent cependant anticiper certains biais méthodologiques. Notamment, il est nécessaire de confronter les modifications quantitativement modestes de la performance cardiaque après RV chez l'enfant à la marge d'erreur intrinsèque du calcul du débit cardiaque des moniteurs disponibles sur le marché. Les méthodes d'acquisition et de calcul des paramètres dynamiques sont également multiples et leurs qualités respectives doit être prise en considération [44].

Synthèse

L'utilité de l'IVP pour guider l'administration de RV chez le nouveau-né à terme ou prématuré n'est pas établie et son exploitation potentielle peut être limitée par plusieurs facteurs. L'assistance ventilatoire repose rarement sur des volumes courants supérieurs à 5 ml/kg et les nouveau-nés bénéficient en général d'une sédation-analgésie minimale pour assurer un confort satisfaisant. De plus, l'interprétation des variations de l'IVP n'est pas univoque, imposant la recherche conjointe d'un shunt canalaire et/ou atrial par échocardiographie.

Chez l'enfant, les variables dynamiques développées à partir de l'onde pléthysmographique offrent trop de données contradictoires et ne permettent pas, actuellement, de guider avec fiabilité le remplissage vasculaire [45]. Le Tableau 2 regroupe les valeurs de références et seuils pathologiques pour

Tableau 2 Valeurs de références et seuils pathologiques pour les indices de variabilité pléthysmographique de l'oxymètre de pouls dans les populations de nouveau-nés et d'enfants. AG : âge gestationnel à la naissance, exprimé en semaines d'aménorrhées (SA) ; APN : âge post-natal en jours (j) ; Δ POP : variabilité de la pléthysmographie de l'oxymètre de pouls (calcul manuel) ; IC95 : intervalle de confiance 95 % ; ITV : intégrale temps vitesse aortique mesuré par échographie trans-thoracique ; IVP : indice de variabilité de l'onde pléthysmographique (calcul automatique) ; MI : membre inférieur ; PCA : persistance du canal artériel ; RV : remplissage vasculaire (*10 ml/kg HEA ; **20 ml/kg NaCl 0,9 %) ; VI : ventilation invasive ; VESi : volume d'éjection systolique indexé sur la surface corporelle mesuré par Doppler œsophagien [40] ou échographie transthoracique [41]

Population	Pathologie	Effectif	Statistiques	Référence
Nouveau-nés prématurés	AG 27 (25-28) SA	45	IVP médian au MI : 22 (18-27) Valeurs plus faibles si PCA « croissante » ou « pulsatile » ($p < 0,01$)	France 2013 [24]
	APN <7 j VI 100 % PCA 86 %			
Nouveau-nés à terme	APN <1 j	242	IVP médian au MI : 20 (15-24) 10 ^e percentile : 12 (IC 95 : 11–12) 90 ^e percentile : 28 (IC 95 : CI 27–29),	Italie 2012 [39]
	Asymptomatiques			
Enfants 17 ± 16 mois	Anesthésie générale avant chirurgie cardiaque VI : 100 % Volume courant : 10 ml/kg	27	IVP : ≥13 % prédictif réponse au RV* (VESi >15 % post-RV) Se : 84 % ; Sp : 64 % Aire sous courbe ROC : 0,78	Allemagne 2011 [40]
Enfants < 9 ans	Anesthésie générale avant neurochirurgie VI : 100 % Pression contrôlée	33	IVP >11 % prédictif réponse au RV* (VESi ≥10 % post RV) Se : 73 % ; Sp : 87 % Aire sous courbe ROC : 0,77	Corée 2013 [41]
Enfants 0-14 ans	Anesthésie générale avant neurochirurgie VI : 100 % Volume courant : 10 ml/kg	30	Diminution après RV** de Δ POP et IVP Non prédictifs réponse au RV (ITV : ≥15 % post-RV) Aire sous courbe ROC Δ POP : 0,51 (0-6 ans) et 0,57 (6-14 ans) IVP : 0,63 (0-6 ans) et 0,54 (6-14 ans)	France 2011 [42]

les indices de variabilité pléthysmographique de l'oxymètre de pouls dans les populations de nouveau-nés et d'enfants.

Conclusion

L'oxymétrie pulsée reste en tout premier lieu un outil de surveillance de la fonction respiratoire en pédiatrie. Contrairement à la médecine de l'adulte, la courbe pléthysmographique issue de l'oxymètre n'a pas acquis ses lettres de noblesses, en tant qu'outil de surveillance hémodynamique. Les données les plus robustes sont relatives à l'IP chez le nouveau-né à terme, qui figure comme paramètre associé à l'algorithme de dépistage des cardiopathies congénitales dans certains pays. Des études supplémentaires sont nécessaires pour préciser l'intérêt des paramètres dérivés de la variabilité de l'onde pléthysmographique dans l'estimation de la volémie et l'intérêt individuel d'un RV, en particulier dans le domaine de la réanimation pédiatrique.

Liens d'intérêts : S. Durand, J. Baleine, J. Le Bouhellec, C. Milési, R. Mesnage et G. Cambonie déclarent n'avoir aucun lien d'intérêt.

Références

- Alexander CM, Teller LE, Gross JB (1989) Principles of pulse oximetry: theoretical and practical considerations. *Anesth Analg* 68:368–76
- Jubran A (1999) Pulse oximetry. *Crit Care* 3:R11–R17
- Nijboer JA, Dorlas JC, Mahieu HF (1981) Photoelectric plethysmography: some fundamental aspects of the reflection and transmission method. *Clin Phys Physiol Meas* 2:205–15
- Feissel M (2007) The pulse oximetry plethysmographic curve: an old signal with a great future? Principles and clinical applications. *Réanimation* 16:124–131
- Michard F, Boussat S, Chemla D, et al (2000) Relation between respiratory changes in arterial pulse pressure and fluid responsiveness in septic patients with acute circulatory failure. *Am J Respir Crit Care Med* 162:134–8
- Feissel M, Michard F, Mangin I, et al (2001) Respiratory changes in aortic blood velocity as an indicator of fluid responsiveness in ventilated patients with septic shock. *Chest* 119:867–73
- Feissel M, Michard F, Faller JP, Teboul JL (2004) The respiratory variation in inferior vena cava diameter as a guide to fluid therapy. *Intensive Care Med* 30:1834–7
- Vieillard-Baron A, Chergui K, Rabiller A, et al (2004) Superior vena caval collapsibility as a gauge of volume status in ventilated septic patients. *Intensive Care Med* 30:1734–9
- Monnet X, Teboul JL (2013) Assessment of volume responsiveness during mechanical ventilation: recent advances. *Crit Care* 17:217
- Durand P, Chevret L, Essouri S, et al (2008) Respiratory variations in aortic blood flow predict fluid responsiveness in ventilated children. *Intensive Care Med* 34:888–94
- Cannesson M, Besnard C, Durand PG, et al (2005) Relation between respiratory variations in pulse oximetry plethysmographic waveform amplitude and arterial pulse pressure in ventilated patients. *Crit Care* 9:R562–8
- Cannesson M, Desebbe O, Rosamel P, et al (2008) Pleth variability index to monitor the respiratory variations in the pulse oximeter plethysmographic waveform amplitude and predict fluid responsiveness in the operating theatre. *Br J Anaesth* 101:200–6
- Feissel M, Kalakhy R, Banwarth P, et al (2013) Plethysmographic variation index predicts fluid responsiveness in ventilated patients in the early phase of septic shock in the emergency department: a pilot study. *J Crit Care* 28:634–9
- Feissel M, Teboul JL, Merlani P, et al (2007) Plethysmographic dynamic indices predict fluid responsiveness in septic ventilated patients. *Intensive Care Med* 33:993–9
- Monnet X, Guérin L, Jozwiak M, et al (2013) Pleth variability index is a weak predictor of fluid responsiveness in patients receiving norepinephrine. *Br J Anaesth* 110:207–13
- Nilsson L, Johansson A, Kalman S (2003) Macrocirculation is not the sole determinant of respiratory induced variations in the reflection mode photoplethysmographic signal. *Physiol Meas* 24:925–37
- Monnet X, Lamia B, Teboul JL (2005) Pulse oximeter as a sensor of fluid responsiveness: do we have our finger on the best solution? *Crit Care* 9:429–30
- Zaramella P, Freato F, Quaresima V, et al (2005) Foot pulse oximeter perfusion index correlates with calf muscle perfusion measured by near-infrared spectroscopy in healthy neonates. *J Perinatol* 25:417–22
- Granelli Ad, Ostman-Smith I (2007) Noninvasive peripheral perfusion index as a possible tool for screening for critical left heart obstruction. *Acta Paediatr* 96:1455–9
- Hakan N, Dilli D, Zenciroglu A, et al (2014) Reference values of perfusion indices in hemodynamically stable newborns during the early neonatal period. *Eur J Pediatr* 173:597–602
- Kinoshita M, Hawkes CP, Ryan CA, Dempsey EM (2013) Perfusion index in the very preterm infant. *Acta Paediatr* 102:e398–401
- Cresi F, Pelle E, Calabrese R, et al (2010) Perfusion index variations in clinically and hemodynamically stable preterm newborns in the first week of life. *Ital J Pediatr* 36:6
- Takahashi S, Kakiuchi S, Nanba Y, et al (2010) The perfusion index derived from a pulse oximeter for predicting low superior vena cava flow in very low birth weight infants. *J Perinatol* 30:265–9
- Vidal M, Ferragu F, Durand S, et al (2013) Perfusion index and its dynamic changes in preterm neonates with patent ductus arteriosus. *Acta Paediatr* 102:373–8
- Evans N (2006) Assessment and support of the preterm circulation. *Early Hum Dev* 82:803–10
- Sahni R, Schulze KF, Ohira-Kist K, et al (2010) Interactions among peripheral perfusion, cardiac activity, oxygen saturation, thermal profile and body position in growing low birth weight infants. *Acta Paediatr* 99:135–9
- Mellander M, Sunnegårdh J (2006) Failure to diagnose critical heart malformations in newborns before discharge--an increasing problem? *Acta Paediatr* 95:407–13
- de-Wahl Granelli A, Wennergren M, Sandberg K, et al (2009) Impact of pulse oximetry screening on the detection of duct dependent congenital heart disease: a Swedish prospective screening study in 39,821 newborns. *BMJ* 338:a3037
- Ewer AK, Granelli AD, Manzoni P, et al (2013) Pulse oximetry screening for congenital heart defects. *Lancet* 382:856–7
- De Felice C, Latini G, Vacca P, et al (2002) The pulse oximeter perfusion index as a predictor for high illness severity in neonates. *Eur J Pediatr* 161:561–2
- De Felice C, Del Vecchio A, Criscuolo M, et al (2005) Early postnatal changes in the perfusion index in term newborns with

- subclinical chorioamnionitis. *Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed* 90:F411–4
32. De Felice C, Leoni L, Tommasini E, et al (2008) Maternal pulse oximetry perfusion index as a predictor of early adverse respiratory neonatal outcome after elective cesarean delivery. *Pediatr Crit Care Med* 9:203–8
 33. Karadag N, Dilli D, Zenciroglu A, et al (2014) Perfusion index variability in preterm infants treated with two different natural surfactants for respiratory distress syndrome. *Am J Perinatol* 31:1015–22
 34. Khositseth A, Muangyod N, Nuntarumit P (2013) Perfusion index as a diagnostic tool for patent ductus arteriosus in preterm infants. *Neonatology* 104:250–4
 35. Hiedl S, Schwepcke A, Weber F, et al (2010) Microcirculation in preterm infants: profound effects of patent ductus arteriosus. *J Pediatr* 156:191–6
 36. Lima AP, Beelen P, Bakker J (2002) Use of a peripheral perfusion index derived from the pulse oximetry signal as a noninvasive indicator of perfusion. *Crit Care Med* 30:1210–3
 37. Uemura A, Yagihara M, Miyabe M (2006) Pulse oximeter perfusion index as a predictor for the effect of pediatric epidural block. *Anesthesiology* 105:A1354
 38. Xu Z, Zhang J, Shen H, Zheng J (2013) Assessment of pulse oximeter perfusion index in pediatric caudal block under basal ketamine anesthesia. *ScientificWorld Journal* 19:183493
 39. Latini G, Dipaola L, De Felice C (2012) First day of life reference values for pleth variability index in spontaneously breathing term newborns. *Neonatology* 101:179–82
 40. Renner J, Broch O, Gruenewald M, et al (2011) Non-invasive prediction of fluid responsiveness in infants using pleth variability index. *Anaesthesia* 66:582–9
 41. Byon HJ, Lim CW, Lee JH, et al (2013) Prediction of fluid responsiveness in mechanically ventilated children undergoing neurosurgery. *Br J Anaesth* 110:586–91
 42. Pereira de Souza Neto E, Grousseau S, Duflo F, et al (2011) Predicting fluid responsiveness in mechanically ventilated children under general anaesthesia using dynamic parameters and thoracic echocardiography. *Br J Anaesth* 106:856–64
 43. Chandler JR, Cooke E, Petersen C, et al (2012) Pulse oximeter plethysmograph variation and its relationship to the arterial waveform in mechanically ventilated children. *J Clin Monit Comput* 26:145–51
 44. Chung E, Cannesson M (2012) Using noninvasive dynamic parameters of fluid responsiveness in children: there is still much to learn. *J Clin Monit Comput* 26:153–5
 45. Gan H, Cannesson M, Chandler JR, Ansermino JM (2013) Predicting fluid responsiveness in children: a systematic review. *Anesth Analg* 117:1380–92