

Monitoring hémodynamique par thermodilution transpulmonaire et analyse du contour de l'onde de pouls

D. Tassaux
M. Licker

Le monitoring des malades de réanimation est indispensable. En effet, ces malades hautement instables ne peuvent pas attendre la mise en route de mesures correctrices, hémodynamiques notamment, faute de quoi, leur état peut rapidement empirer et leurs pronostics, vital ou fonctionnel, peuvent changer très rapidement. D'importants progrès

dans le suivi de ces malades voient le jour actuellement. La thermodilution transpulmonaire, couplée à l'analyse de l'onde de pouls, est l'une de ces avancées. Dans cet article, nous décrivons cette technique, ses avantages et ses limites, en tentant de la mettre en perspective dans la prise en charge moderne des malades de réanimation.

Mots-clés :

- hémodynamique
- PiCCO
- thermodilution
- eau pulmonaire

Hemodynamic monitoring by transpulmonary thermodilution and pulse contour analysis

Critically ill patients must be carefully monitored. These highly unstable patients cannot wait a long time for the frequent therapeutic changes that their precarious state necessitates. Important progress is currently made in the intensive care patients' monitoring. In this short review, we discuss the trans-pulmonary thermodilution, coupled with the careful analysis of the pulse wave. We aim to put these new and promising tools in perspective, insisting on the potential benefits, but also on the limitation of this technology.

Med Hyg 2003 ; 61 : 2446-52

Introduction

Le monitoring hémodynamique en anesthésie et en réanimation est en pleine évolution. Cette évolution fait suite aux progrès qui ont été réalisés dans la compréhension des mécanismes dynamiques impliqués dans la régulation du débit cardiaque et de la pression artérielle. Le développement de l'échocardiographie Doppler a joué un rôle majeur dans cette évolution. En effet, cette technique a permis de documenter pour la première fois en temps réel les variables physiologiques directement impliquées dans le contrôle hémodynamique : précharge et postcharge ventriculaires, fonctions systolique et diastolique. D'autre part, l'échocardiographie a mis en lumière les interactions entre ces paramètres et la fonction respiratoire. Alors que l'on ne disposait que de variables indirectes obtenues par le cathétérisme cardiaque droit (pressions), on dispose aujourd'hui d'un outil permettant un monitoring volumétrique direct. Il s'agit là d'un progrès majeur dans la compréhension des mécanismes physiopathologiques qui sous-tendent les détresses circulatoires et les hypoxémies sévères. Ces avancées physiopathologiques ont permis le développement d'autres techniques de monitoring, moins dépendantes de l'opérateur, plus reproductibles, disponibles 24 heures sur 24 et qui permettent de répondre aux principales questions que le réanimateur se pose lorsqu'il est confronté à un patient en insuffisance circulatoire et/ou respiratoire aiguë. La thermodilution transpulmonaire, couplée à l'analyse du contour de l'onde de pouls est probablement la technique la plus aboutie, disponible à l'heure actuelle. Ces deux techniques sont disponibles sur le moniteur PiCCOplus (Pulsion Medical SystemsTM, Munich, Allemagne) et les modules «CCO» de

débit cardiaque de certains moniteurs de surveillance (Philips Medical SystemsTM).

Dispositif de mesure

L'évaluation hémodynamique nécessite la mise en place d'une voie veineuse centrale classique et d'un cathéter artériel fémoral, huméral ou axillaire (l'artère radiale n'est pas utilisable). Chaque voie d'abord est munie d'une sonde thermique pour les mesures de thermodilution transpulmonaire. La pression artérielle sanglante est enregistrée en continu (fig. 1).

Thermodilution transpulmonaire

La thermodilution transpulmonaire permet la mesure du débit cardiaque et de certains indices évaluant la précharge et la contractilité du myocarde. De plus, cette technique permet d'évaluer la quantité d'eau intrapulmonaire extravasculaire et un indice de perméabilité des capillaires pulmonaires. Le débit cardiaque est déterminé selon le même principe que la mesure par thermodilution artérielle pulmonaire obtenue à l'aide d'une sonde de Swan-Ganz (principe de Stewart-Hamilton) (fig. 2) à ceci près que : 1) le site d'injection de l'indicateur (bolus froid de sérum physiologique) se situe dans une veine centrale et non dans l'oreillette droite ; 2) le site de recueil de la courbe de thermodilution est un gros tronc artériel systémique (aorte, artère axillaire ou humérale) et non l'artère pulmonaire. La thermodilution transpulmonaire permet également la mesure d'un certain nombre de volumes intrathoraciques à partir de deux caractéristiques de la courbe de thermodilution : le MTt (*mean transit time*) ou temps de transit moyen et le DST

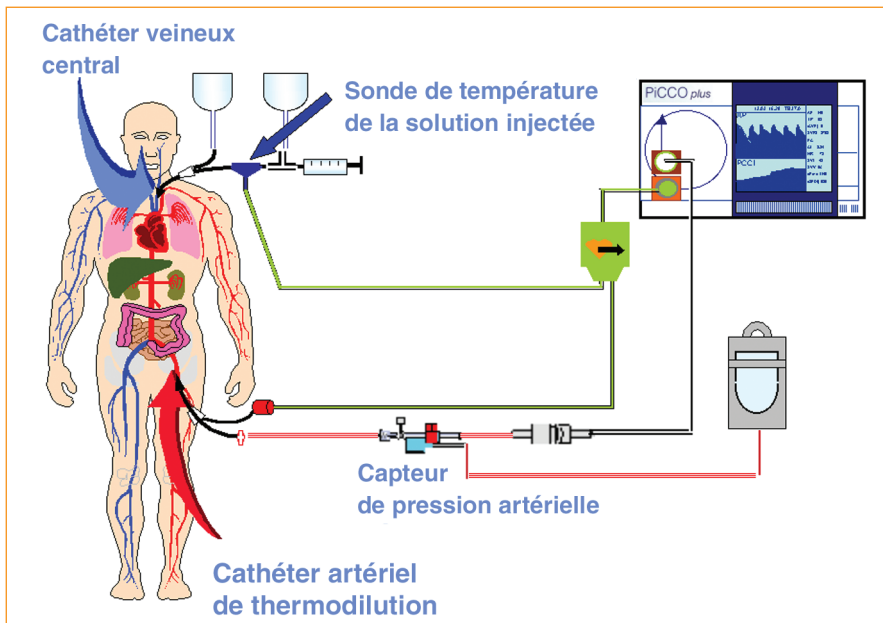


Fig. 1. Schéma de principe de montage du moniteur PiCCOplus.

Bibliographie

- Goedje O, Hoeke K, Lichtwarck-Aschoff M, et al. Continuous cardiac output by femoral arterial thermodilution calibrated pulse contour analysis: Comparison with pulmonary arterial thermodilution. *Crit Care Med* 1999; 27: 2407-12.
- Berkenstadt H, Margalit N, Hadani M, et al. Stroke volume variation as a predictor of fluid responsiveness in patients undergoing brain surgery. *Anesth Analg* 2001; 92: 984-9.
- Reuter DA, Felbinger TW, Schmidt C, et al. Stroke volume variations for assessment of cardiac responsiveness to volume loading in mechanically ventilated patients after cardiac surgery. *Intensive Care Med* 2002; 28: 392-8.

(downslope time) ou temps de décroissance exponentielle de l'indicateur (fig. 3). Ces deux paramètres permettent de déterminer un indice de précharge global: le VTGD (volume télé-diastolique global) et de calculer le volume d'eau pulmonaire extravasculaire (EPEV) (fig. 4). Enfin, à partir de ces calculs, il est possible de calculer deux indices :

- un indice de contractilité globale: le GEF (global ejection fraction) ou fraction d'éjection globale qui est donnée par la formule :

$$GEF = \frac{4 \times VES}{VTGD}$$

avec VES = volume d'éjection systolique (DC/FC) et VTGD = volume télé-diastolique global;

• un indice de perméabilité vasculaire pulmonaire :

$$PVPI = \frac{EPEV}{VSP}$$

avec EPEV = eau pulmonaire extravasculaire et VSP = volume sanguin pulmonaire (fig. 4).

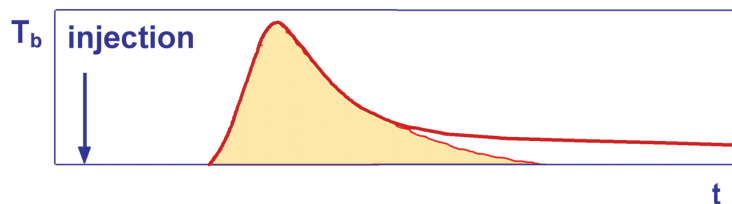
Analyse du contour de l'onde de pouls

L'analyse de la courbe de pression artérielle permet de mesurer le débit cardiaque en continu, un index de contractilité ventriculaire gauche et de prédire la réponse hémodynamique au remplissage vasculaire à l'aide des variations de la pression artérielle pulsée. Le débit cardiaque continu est égal au volume d'éjection systolique (VES) multiplié par la fréquence cardiaque. Le VES est obtenu par intégration, systole par systole, de l'aire sous la courbe de pression artérielle que l'on multiplie par un facteur de calibration (fig. 5). Le facteur de calibration dépend principalement de la compliance aortique du patient. La variabilité inter-individuelle de la compliance aortique nécessite une calibration systématique par une mesure du débit cardiaque obtenue par thermodilution transpulmonaire.¹ La performance contractile ventriculaire gauche est évaluée par la mesure de la pente de montée en pression (dPmax) lors de l'éjection ventriculaire. Celle-ci est égale à la différentielle maximale instantanée de la pression artérielle (dP/dtmax) (fig. 5). Enfin, la réponse hémodynamique au remplissage peut être prédite par la mesure de la variation du volume d'éjection systolique (VVE) au cours d'une période d'acquisition de 7,5 s, période englobant au moins un cycle respiratoire complet.² Cette mesure n'est possible que chez les patients en ventilation contrôlée en pression positive (fig. 6). Une VVE supérieure à 9,5% permet de prédire une augmentation du volume d'éjection systolique en réponse à un remplissage vasculaire, ce qui suggère la présence d'une hypovolémie relative.³

Validation physiologique

Mesure du débit cardiaque et du volume d'éjection systolique

La plupart des mesures et indices obtenus par la thermodilution transpulmonaire sont actuellement bien validés par des études physiologiques réalisées aussi bien chez des patients chirurgicaux que chez des patients de réanima-



Méthode de Stewart-Hamilton

$$CO_{TDa} = \frac{(T_b - T_i) \cdot V_i \cdot K}{\int \Delta T_b \cdot dt}$$

- T_b = Température corporelle
- T_i = Température de l'injectat
- V_i = Volume de l'injectat
- ∫ Δ T_b · dt = Aire sous la courbe de thermodilution
- K = Constante de calcul

Fig. 2. Mesure du débit cardiaque par la méthode de Stewart-Hamilton (thermodilution).

L'intégration de la courbe de dilution d'un indicateur dans la circulation permet le calcul du débit circulant. Dans le cas de la thermodilution, l'indicateur est un injecta à une température inférieure à la température corporelle et l'on mesure la «dilution thermique».

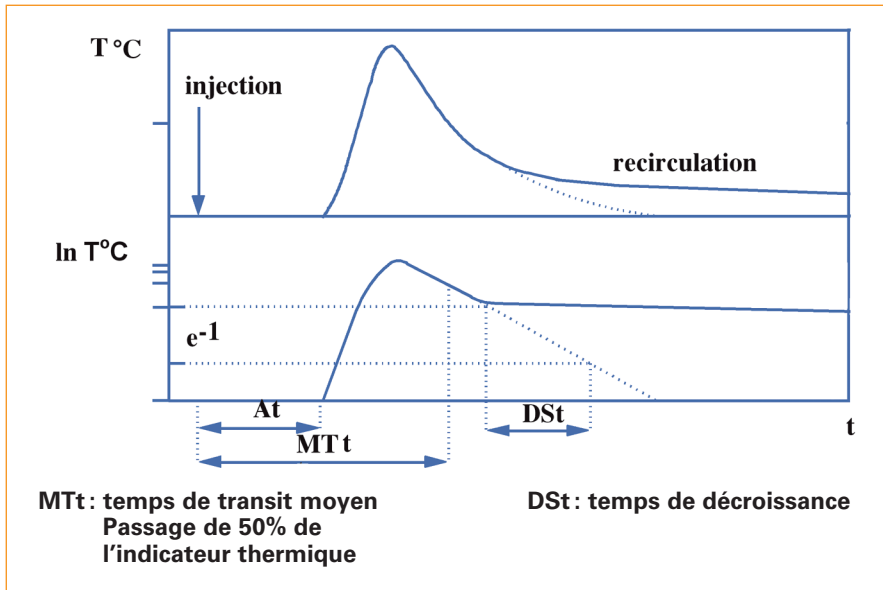


Fig. 3. Détermination du temps de transit moyen (MTt) et du temps de décroissance exponentielle (DSt) de l'indicateur thermique.

Ces deux paramètres permettent le calcul du volume télédiastolique global (VTDG) et de l'eau pulmonaire extravasculaire (EPEV).

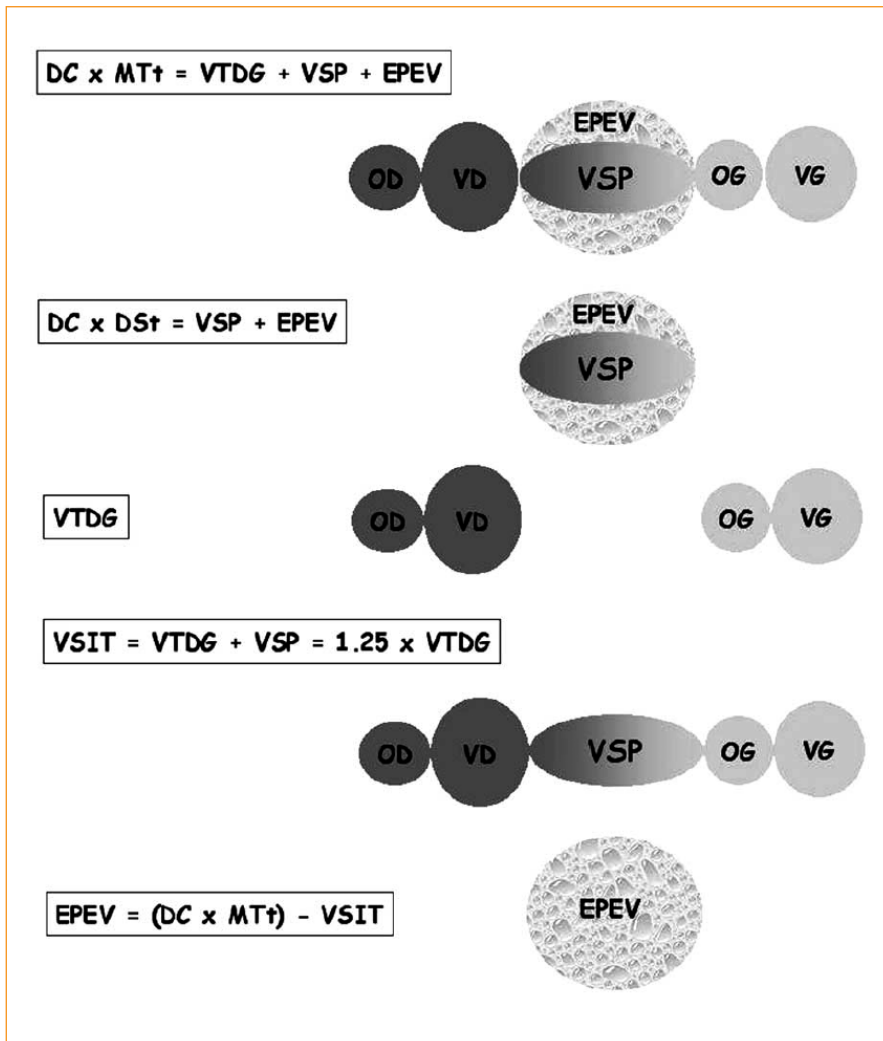


Fig. 4. Principes d'évaluation du volume télédiastolique global (VTDG) et de l'eau pulmonaire extravasculaire (EPEV) par la technique de thermodilution transpulmonaire.

DC = débit cardiaque, MTt = temps de transit moyen, OD = oreillette droite, VD = ventricule droit, VSP = volume sanguin pulmonaire, OG = oreillette gauche, VG = ventricule gauche, DSt = temps de décroissance exponentielle, VSIT = volume sanguin intrathoracique.

tion. La mesure du débit cardiaque par thermodilution transpulmonaire a été validée par de nombreuses études où les auteurs ont comparé cette technique à la thermodilution transpulmonaire (tableau 1) et à la méthode de Fick.⁴ Le biais moyen de la mesure reste cependant de 0,28 l/min, avec des extrêmes pouvant aller jusqu'à 0,73 l/min. La technique de détermination du débit cardiaque en continu par l'analyse de la courbe de pression artérielle, après une calibration par thermodilution transpulmonaire, a également été comparée à la méthode requérant l'emploi d'un cathéter de Swan-Ganz. Dans deux études réalisées chez des patients de soins intensifs chirurgicaux, Goedje a observé une bonne corrélation entre les deux techniques, aussi bien chez des patients après chirurgie cardiaque¹ que chez des malades qui présentaient un choc septique ou une hémorragie méningée.⁵ Dans ces deux travaux, les biais étaient respectivement de $0,11 \pm 0,6$ l/min et $0,07 \pm 0,7$ l/min/m². Cependant une recalibration par thermodilution transpulmonaire s'avérait nécessaire en cas de variations importantes du bilan hydrique. D'autres auteurs ont confirmé ces résultats chez vingt patients qui avaient bénéficié d'une chirurgie coronarienne minimalement invasive⁹ et chez dix-neuf patients de chirurgie cardiaque qui avaient nécessité une prise en charge intensive prolongée.¹⁰ Il est très intéressant de mentionner qu'un nouvel algorithme vient d'être validé chez des patients qui présentaient une instabilité hémodynamique importante au cours d'une période allant de 8 à 44 heures pendant laquelle aucune recalibration n'avait été effectuée. Dans ces situations hautement instables (variation du DC de $40\% \pm 27\%$ et de la résistance artérielle systémique de 450 à 2360 dyne x sec/cm⁵), les auteurs ont observé une bonne corrélation ($r = 0,88$) quand ils comparaient les résultats de la thermodilution transpulmonaire à la méthode employant un cathéter de Swan-Ganz, avec un biais (\pm SD) de 0,8 l/min ($\pm 1,2$).¹¹

Mesure des index de précharge cardiaque

Le volume global télédiastolique (VTDG) représente le volume sanguin contenu dans les quatre cavités cardiaques en fin de diastole. Bien que global, il semble être un meilleur indice de précharge cardiaque que ne le sont les pressions de remplissage (pression veineuse centrale et pression artérielle pulmonaire d'occlusion).¹² En effet, au cours de chocs septiques, il a été démontré que le VTDG est significativement plus bas chez les répondeurs que chez les non-répondeurs au remplissage vasculaire en termes d'augmentation du débit cardiaque. Une réponse positive au remplissage vasculaire est très probable chez les patients dont le VTDG indexé à la surface corporelle est inférieur à 0,6 l/m² et elle est très improbable si le VTDG

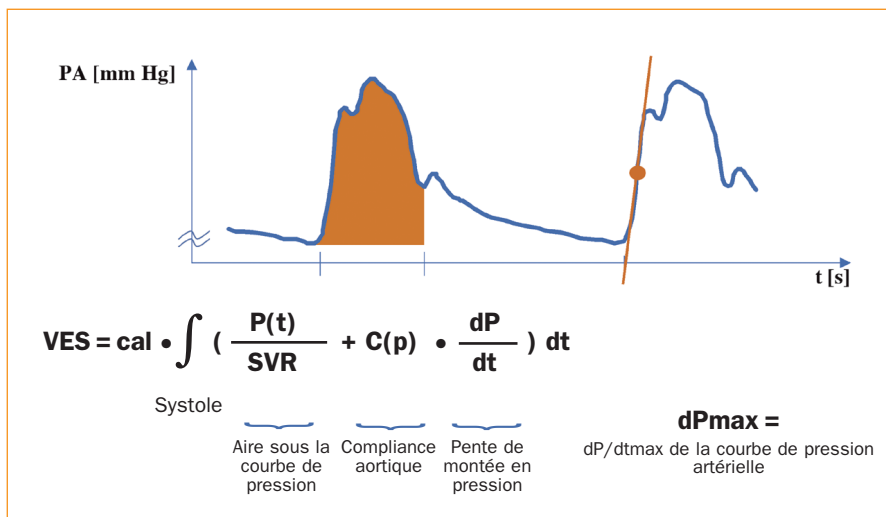


Fig. 5. Analyse de la courbe de pression artérielle.

Principe de calcul du volume d'éjection systolique par l'intégration de la courbe de pression artérielle et de l'indice de contractilité ventriculaire gauche (dPmax).

- 4 Tibby SM, Hatherill M, Marsh MJ, et al. Clinical validation of cardiac output measurements using femoral artery thermodilution with direct Fick in ventilated children and infants. *Intensive Care Med* 1997; 23: 987-91.
- 5 Sakka SG, Reinhart K, Meier-Hellmann AK. Comparison of pulmonary artery and arterial thermodilution cardiac output in critically ill patients. *Intensive Care Med* 1999; 25: 843-6.
- 6 Sakka SG, Reinhart K, Wegscheider K, Meier-Hellmann A. Is the placement of a pulmonary artery catheter still justified solely for the measurement of cardiac output? *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2000; 14: 119-24.
- 7 Bindels AJ, van der Hoeven JG, Graafland AD, et al. Relationships between volume and pressure measurements and stroke volume in critically ill patients. *Crit Care* 2000; 4: 193-9.
- 8 Holm C, Melcer B, Horbrand F, et al. Arterial thermodilution: An alternative to pulmonary artery catheter for cardiac output assessment in burn patients. *Burns* 2001; 27: 161-6.
- 9 Buhre W, Weyland A, Kazmaier S, et al. Comparison of cardiac output assessed by pulse-contour analysis and thermodilution in patients undergoing minimally invasive direct coronary artery bypass grafting. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 1999; 13: 437-40.
- 10 Zollner C, Haller M, Weis M, et al. Beat-to-beat measurement of cardiac output by intravascular pulse contour analysis:

indexé est supérieur à 0,8 l/m².^{13,14} La variation du volume d'éjection systolique (VVE) est un indice dynamique qui traduit les variations des volumes des cavités cardiaques au cours de la ventilation en pression positive. Au même titre que d'autres indices dynamiques (variation de la POD, de la pression artérielle pulsée, Δ_{down}), l'interprétation de la VVE n'est possible qu'en l'absence d'arythmie cardiaque et elle n'a été validée que chez des patients ventilés et profondément sédatisés. Une VVE supérieure à 9,5% permet de séparer les patients répondeurs des non-répondeurs à un remplissage vasculaire avec une sensibilité de 79% et une spécificité de 93%.² L'intérêt de monitorer la VVE pour prédire l'effet du remplissage vasculaire est maintenant bien établi en situation postopératoire de chirurgie cardiaque.^{3,15}

Mesure de l'eau pulmonaire extravasculaire (EPEV)

La mesure de l'EPEV par thermodilution

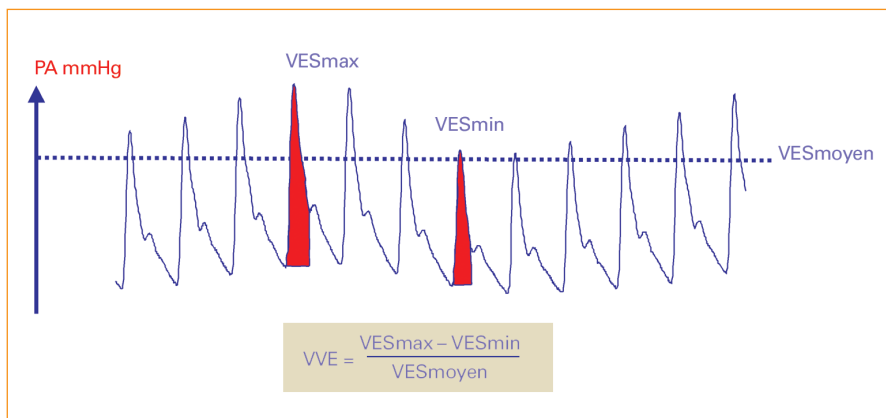


Fig. 6. Mesure de la variation du volume d'éjection systolique (VVE).

Une variation de VVE de plus de 9,5% au cours du cycle respiratoire permet de prédire une augmentation du débit cardiaque en cas de remplissage vasculaire chez des patients en ventilation contrôlée en pression positive. VESmax = volume d'éjection systolique maximal, VESmin = volume d'éjection systolique minimum, VESmean = volume d'éjection systolique moyen.

transpulmonaire a été validée expérimentalement chez l'animal et chez des patients en état de mort cérébrale par comparaison à une technique gravimétrique (méthode de référence).¹⁶ Ces données n'ont été publiées à ce jour que sous forme de résumés et elles demandent confirmation. La thermodilution transpulmonaire a également été comparée à des scores radiologiques dans les années 1980 avec des résultats variables, tantôt excellents en termes de corrélation, tantôt médiocres.

Autres indices

Les autres indices issus de la combinaison des deux techniques, thermodilution transpulmonaire – analyse de la courbe de pression artérielle, n'ont pas encore fait l'objet d'une validation rigoureuse. Il s'agit de l'index de perméabilité vasculaire pulmonaire (PVPI) et des index de performance myocardique: fraction d'éjection globale (GEF) et l'index de contractilité du ventricule gauche (dPmax). De même, il n'existe aucune donnée sur la validité de VVE en cas de persistance d'une activité respiratoire spontanée sous ventilation mécanique en pression positive.

Applications cliniques

Hypotension et états de choc

La technologie PiCCOplus permet actuellement de mesurer les paramètres utiles à l'évaluation physiopathologique d'une insuffisance circulatoire aiguë. En effet, la mesure continue du débit cardiaque et la détermination de la précharge globale (VTDG) permettent de différencier un bas débit cardiaque, une hypovolémie sévère ou une vasoplégie et ainsi de guider le diagnostic étiologique. Les indices de précharge cardiaque VTDG et VVE permettent de dévoiler une hypovolémie ou, de manière très utile en pratique clinique, de prédire l'efficacité d'un remplissage vasculaire. Ces paramètres hémodynamiques sont ainsi à même d'orienter les mesures thérapeutiques et d'en mesurer leurs effets à court terme. L'intérêt de cette prise en charge dynamique est de pouvoir corriger le diagnostic posé sur le trouble hémodynamique et de proposer des modifications thérapeutiques adaptées et rapides. Enfin, comparée au cathéter de Swan-Ganz, la mise en œuvre de ce monitoring est plus rapide puisque les voies d'abord sont en général en place et qu'elles font partie de l'équipement de routine des patients instables sur le plan hémodynamique. Il n'existe pas, et nous ne disposons pas actuellement de preuve que cette technique améliore le pronostic et le devenir de ces patients en la comparant à l'utilisation des techniques conventionnelles de monitoring.

Référence (année)	Types de patients	n (patient/mesures)	DC _{TP} – DC _{TPA} biais ± écart-type	r
1 (1999)	Chirurgie cardiovasculaire (chirurgie cardiaque)	24/216	-0,29 ± 0,66 l/min	0,93
5 (1999)	Réanimation chirurgicale chocs septiques, hémorragies méningées	37/449	0,68 ± 0,62 l/min	0,97
6 (2000)	Réanimation chirurgicale sepsis sévères et chocs septiques	12/51	0,73 ± 0,38 l/min	0,98
7 (2000)	Réanimation polyvalente 10 SDRA, 15 chocs septiques, 10 OAP cardiogéniques, 10 poses de shunts intrahépatiques (TIPS)	45/283	0,49 ± 0,45 l/min/m ²	0,95
8 (2001)	Grands brûlés	23/218	0,32 ± 0,29 l/min	0,98

Tableau 1. Comparaison des mesures de débit cardiaque obtenues par thermodilution transpulmonaire et par la sonde de Swan-Ganz.

DC_{TP}: débit cardiaque obtenu par thermodilution transpulmonaire; DC_{TPA}: débit cardiaque obtenu par thermodilution artérielle pulmonaire (Swan-Ganz); SDRA: syndrome de détresse respiratoire de l'adulte; OAP: œdème pulmonaire aigu cardiogénique; TIPS: transjugular intrahepatic portocaval shunt.

A prospective criterion standard study in patients after cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2000; 14: 125-9.

11 Godje O, Hoke K, Goetz AE, et al. Reliability of a new algorithm for continuous cardiac output determination by pulse-contour analysis during hemodynamic instability. *Crit Care Med* 2002; 30: 528.

12 Godje O, Peyerl M, Seebauer T, et al. Central venous pressure, pulmonary artery capillary wedge pressure as preload indicators in cardiac surgery patients. *Eur J Cardiothorac Surg* 1998; 13: 533-44.

13 Godje O, Seebauer T, Peyerl M, et al. Hemodynamic monitoring by double-indicator dilution technique in patients after orthotopic heart transplantation. *Chest* 2000; 118: 775-81.

14 Michard F, Alaya S, Zarka V, et al. Effects of volume loading and dobutamine on transpulmonary thermodilution global end-diastolic volume (abstract). *Intensive Care Med* 2002; 28: S53.

15 Reuter DA, Seebinger TW, Kilger E, et al. Optimizing fluid therapy in mechanically ventilated patients after cardiac surgery by on-line monitoring of left ventricular stroke volume variations. Comparison with aortic systolic pressure variations. *Br J Anaesth* 2002; 88: 124-6.

16 Stum M. In: *Practical applications of fiberoptics in Critical Care Monitoring*. Heidelberg, New York, Berlin: Springer Verlag, 1990; 129-39.

17 Michard F, Chemla D, Richard C, et al. Clinical use of respiratory changes in arterial pulse pressure to monitor the hemodynamic effects of PEEP. *Am J Respir Crit Care Med* 1999; 159: 935-9.

Thermodilution transpulmonaire au cours des hypoxémies sévères

Théoriquement, cette technique permet la mesure de l'eau pulmonaire extravasculaire et celle de la perméabilité vasculaire pulmonaire. Elle présente donc potentiellement un intérêt majeur dans la quantification de l'œdème pulmonaire, notamment en cas de syndrome de détresse respiratoire aigu (SDRA). Elle permettrait d'ajuster le remplissage vasculaire de manière optimale pour trouver un bon compromis entre une volémie efficace et l'apparition d'un œdème interstitiel pulmonaire, situation qui représente une préoccupation majeure pour le réanimateur. La validation de cette technique

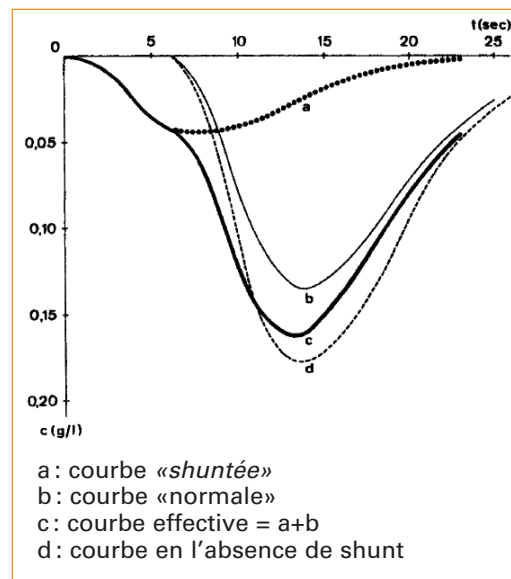


Fig. 7. Détection d'un shunt droit-gauche intracardiaque par thermodilution transpulmonaire.

La courbe de thermodilution (c = courbe effective) apparaît prématurément et elle est biphasique.

dans cet objectif est encore insuffisante et des études cliniques devraient s'attacher à répondre à cette question. D'un point de vue très pratique, le PiCCO permet d'aider à la compréhension physiopathologique des hypoxémies en mettant en évidence un effet PvO₂ ou un shunt droit-gauche. L'effet PvO₂, ou hypoxémie circulatoire, est observé en cas de débit cardiaque abaissé. La baisse du débit cardiaque entraîne une diminution de la SvO₂ avec pour conséquence une baisse de SaO₂. Une augmentation du débit cardiaque peut donc réduire le degré d'hypoxémie. Le PiCCO permet dans cette situation de monitorer très aisément l'ensemble du déroulement de cette procédure.

Il est aussi possible de détecter un shunt droit-gauche qui peut être à l'origine d'hypoxémies extrêmement sévères chez les patients de réanimation intubés et ventilés. Le cas le plus classique est la présence d'un *foramen ovale* perméable (FOP) dont les manifestations cliniques sont dévoilées ou aggravées par la ventilation (fig. 7). Cela correspond à un passage prématuré de l'indicateur thermique dans la circulation artérielle à travers la communication interauriculaire. Enfin, l'utilisation de la variabilité du volume d'éjection systolique (VVE) peut être utile dans la prédiction des effets hémodynamiques de la PEEP chez les patients ventilés. Chez des patients en ALI (*acute lung injury*) ventilés, la chute du débit cardiaque lors de l'application d'une PEEP est d'autant plus importante que la VVE est grande.¹⁷ En d'autres termes, si la VVE est grande, le remplissage vasculaire sera probablement efficace et entraînera une meilleure tolérance de la PEEP.

Perspectives et conclusion

La thermodilution transpulmonaire couplée à l'analyse de la courbe de pression artérielle permet un diagnostic hémodynamique complet et rapide en mesurant le débit cardiaque, la précharge globale ainsi que la contractilité myocardique. Par ailleurs, elle permet aussi de quantifier l'eau extravasculaire pulmonaire et d'en suivre l'évolution. La plupart de ces paramètres sont validés sur le plan physiologique de façon robuste et ils permettent de guider le traitement de façon dynamique. Cependant, il reste à mesurer les bénéfices que l'on peut en attendre sur la prise en charge globale des patients, notamment en termes de pronostic et de coût, et de les comparer aux standards de monitoring existants. Un effort pédagogique est certainement nécessaire si l'on recourt à cette vision nouvelle de l'hémodynamique, mais le caractère moins dépendant de l'opérateur que ne le sont la récolte et l'interprétation des données issues de l'emploi du cathéter de Swan-Ganz, devrait faciliter cette tâche.

Adresse des auteurs :

Dr Didier Tassaux
Service des soins intensifs de médecine et service d'anesthésiologie
Dr Marc Licker
Service d'anesthésiologie
HUG
1211 Genève 14
didier.tassaux@hcuge.ch