

Monitoring hémodynamique par échocardiographie des patients en état de choc

Hemodynamic Monitoring Using Echocardiography in Shock

P. Vignon

Reçu le 23 novembre 2016 ; accepté le 20 décembre 2016
© SRLF et Lavoisier SAS 2017

Résumé Le monitoring hémodynamique est nécessaire chez les patients les plus instables qui présentent un état de choc sévère, a fortiori si la défaillance hémodynamique est complexe et se développe sur un terrain à haut risque évolutif ou d'intolérance au traitement. Il consiste à identifier les mécanismes prépondérants à l'origine de l'état de choc, à guider ainsi le choix de l'intervention thérapeutique la plus adaptée et à vérifier l'efficacité et la tolérance de celle-ci. L'échocardiographie est actuellement recommandée en première intention pour l'évaluation hémodynamique des patients en défaillance circulatoire. Elle repose sur deux approches complémentaires, la voie transthoracique conventionnelle utilisée en première intention et la voie transœsophagienne. Sous couvert d'une formation spécifique dont les modalités ont été décrites récemment, l'échocardiographie en réanimation permet en effet d'identifier au mieux le profil hémodynamique d'un état de choc et d'en guider la prise en charge thérapeutique. Elle fournit des informations supplémentaires aux recommandations en vigueur dans la prise en charge du choc septique, permet d'identifier au mieux la présence d'un cœur pulmonaire aigu à l'origine d'une défaillance circulatoire associée au syndrome de détresse respiratoire aiguë (SDRA) et identifie les sources d'imprécision des modes de monitoring hémodynamique « aveugle » telle que la thermodilution transpulmonaire. L'échocardiographie réalisée de manière répétée permet de suivre l'efficacité et la tolérance des interventions thérapeutiques, qu'elles soient médicamenteuses ou non (retentissement cardiaque droit de la ventilation mécanique dans le SDRA). L'émergence de sondes d'échocardiographie transœsophagienne minia-

turisées ouvre la perspective de monitoring hémodynamique prolongé chez les patients les plus instables.

Mots clés Monitoring hémodynamique · Échocardiographie · États de choc

Abstract Hemodynamic monitoring is necessary in unstable patients with shock, especially in the presence of complex circulatory compromise, high risk of rapid worsening or treatment intolerance. It allows early identification of the main mechanisms leading to shock states, hence helps in guiding adequate and targeted therapeutic interventions, and assesses both the efficacy and tolerance of therapy. Critical care echocardiography is currently recommended as the first-line technique for the hemodynamic assessment of patients presenting with acute circulatory failure. Two complementary approaches may be used. Conventional transthoracic echocardiography is primarily performed and may be completed by the transesophageal approach in the presence of suboptimal imaging quality or if expected diagnostic accuracy is deemed insufficient. If a dedicated training in which modalities have recently been detailed is respected, critical care echocardiography is ideally suited to best determine the type of shock and guide its therapeutic management. Importantly, critical care echocardiography provides additional information when compared with the standard management of patients with septic shock, and this accurately identifies the presence of acute cor pulmonale associated with the acute respiratory distress syndrome and depicts potential sources of imprecision of "blind" hemodynamic monitoring devices, such as the transpulmonary thermodilution. Repeated echocardiographic assessment allows monitoring of both the efficacy and tolerance of therapeutic interventions, including the potential deleterious effects of ventilator settings on right ventricular function in patients sustaining moderate-to-severe acute respiratory distress syndrome. In the near future, the emergence of miniaturized transesophageal echocardiographic probes promises to provide adequate tools for prolonged

P. Vignon (✉)
Service de réanimation polyvalente,
CHU Dupuytren, 2, avenue Martin-Luther-King,
F-87042 Limoges, France
e-mail : philippe.vignon@unilim.fr

hemodynamic monitoring using critical care echocardiography in the most unstable patients.

Keywords Hemodynamic monitoring · Echocardiography · Shock

Introduction

L'instabilité hémodynamique joue un rôle clé dans le développement des défaillances d'organes qui caractérisent le patient de réanimation en induisant un déséquilibre entre le transport et l'utilisation de l'oxygène d'une part, et les besoins tissulaires d'autre part. L'état de choc qui en résulte est lié à une hypoxie tissulaire que reflètent certaines anomalies biologiques telles que l'acidose métabolique, l'hyperlactatémie ou la diminution de la saturation veineuse centrale en oxygène (SvcO₂) [1]. Hypovolémie, dysfonction cardiaque et vasoplégie peuvent diversement contribuer à l'instabilité hémodynamique et à l'état de choc qui en découle, quelle qu'en soit l'origine. De plus, ces différents mécanismes peuvent être intriqués et évoluer dans le temps et au cours de la prise en charge du patient, notamment à la phase initiale du choc septique [2,3]. Chez les patients de réanimation, le choc septique est la cause d'instabilité hémodynamique la plus fréquente, suivi du choc hypovolémique et cardiogénique [4].

Lorsque l'examen clinique et la mesure de paramètres vitaux et hémodynamiques de première ligne (pression artérielle invasive, pression veineuse centrale) sont insuffisants pour guider la prise en charge du patient en état de choc, le monitoring hémodynamique est indiqué. Celui-ci peut utiliser diverses méthodes d'évaluation hémodynamique, continues ou discontinues, et plus ou moins invasives [5]. Parmi celles-ci, l'échocardiographie est de plus en plus utilisée en première ligne, car elle seule fournit en temps réel à la fois des informations structurelles et fonctionnelles sur la circulation centrale, le cœur et les gros vaisseaux [6]. À ce titre, l'échocardiographie est actuellement recommandée en première intention pour l'évaluation des patients présentant un état de choc [7]. Elle peut faire appel à l'échocardiographie transthoracique (ETT) ou transœsophagienne (ETO) selon les indications et la qualité des images obtenues. Le but de cet article est de décrire comment l'échocardiographie peut être utilisée pour le monitoring hémodynamique des patients en état de choc. Le monitoring par doppler transœsophagien qui a été développé par ailleurs [8] ne sera pas abordé dans cette mise au point.

Échocardiographie en réanimation

L'échocardiographie en réanimation est réalisée et interprétée au lit du patient par le réanimateur lui-même chez un

patient présentant une défaillance circulatoire et/ou respiratoire afin de guider la prise en charge [9]. L'impact thérapeutique découlant directement de l'évaluation hémodynamique par échocardiographie est donc fréquent puisqu'il peut atteindre 60 % des cas [10], en particulier chez les patients les plus instables en période postopératoire [11]. Selon la typologie des patients examinés, l'échocardiographie peut même déboucher sur une indication de chirurgie cardiaque sans avoir recours à d'autres examens [10,12]. À la différence de son utilisation en cardiologie, l'échocardiographie en réanimation peut être limitée à une évaluation essentiellement qualitative [13], ou être parfois ciblée afin de répondre seulement à une question clinique simple en l'utilisant comme prolongement de l'examen clinique [14]. Surtout, l'échocardiographie est répétée afin d'évaluer l'efficacité et la tolérance du traitement entrepris suite à l'évaluation hémodynamique initiale, ce d'autant que le patient est instable. Selon l'information requise et les conditions d'examen, l'utilisateur peut choisir d'utiliser l'ETT conventionnelle ou l'ETO (Tableau 1). Chaque approche a ses avantages et ses limites respectives (Tableau 2). L'ETT est utilisée en première intention, notamment chez les patients de réanimation en ventilation spontanée pour des raisons de tolérance évidentes, car elle reste strictement non invasive. Néanmoins, les informations qu'elle fournit sont parfois limitées par la qualité inadéquate des images, en particulier chez les patients ventilés (Tableau 2). C'est pourquoi chez ces patients, l'ETO a une capacité diagnostique supérieure à celle de l'ETT, donc un impact thérapeutique plus important [12]. Elle fournit également des informations uniques sur certaines structures profondes inaccessibles à l'ETT, telle que la veine cave supérieure (Tableau 2). La tolérance de l'ETO est excellente dès lors que le patient est ventilé sous sédation [15]. Chez les patients de réanimation, les complications de l'ETO sont exceptionnelles dès lors que ses contre-indications sont scrupuleusement respectées [10].

L'échocardiographie en réanimation nécessite une formation spécifique pour maîtriser l'acquisition des images et leur interprétation [9]. La formation des réanimateurs à la pratique de l'échocardiographie existe depuis plus d'une décennie en France [16]. Elle se décline à deux niveaux : un niveau « basique » qui permet principalement à l'aide de l'ETT de répondre à une question binaire simple, et un niveau « avancé » qui permet d'évaluer l'état hémodynamique et de guider la prise en charge d'un patient présentant une défaillance circulatoire et/ou respiratoire, en ayant recours si besoin à l'ETO [9]. Tous les réanimateurs doivent obtenir le niveau « basique » au cours de leur formation initiale [17]. S'ils le désirent, ils peuvent perfectionner leur connaissance afin d'atteindre le niveau « avancé », les compétences à acquérir ayant été récemment détaillées au cours d'une table ronde internationale [18]. Avec l'expérience, ces réanimateurs acquièrent une expertise qui leur permet

| Tableau 1 Principales indications respectives de l'échocardiographie par voie transthoracique et par voie transœsophagienne chez les patients de réanimation | |
|---|---|
| Échocardiographie transthoracique | Échocardiographie transœsophagienne |
| Réalisée en première intention | Voie transthoracique non conclusive (ventilation mécanique invasive) |
| Seule approche possible si contre-indication à la voie transœsophagienne | Précision diagnostique supérieure prouvée de la voie transœsophagienne pour le motif de l'examen |
| Évaluation de la fonction cardiaque | Identification d'un cœur pulmonaire aigu associé à un syndrome de détresse respiratoire aiguë ^a |
| Suspicion de pathologie péricardique | Suspicion de tamponnade extrapéricardique (hématome médiastinal) ^a |
| Guidage de péricardocentèse | Mécanisme et quantification d'une régurgitation mitrale excentrée ou d'une dysfonction de prothèse valvulaire mitrale (ou aortique) |
| Évaluation d'une valvulopathie ou d'une valve prothétique | Diagnostic et prise en charge d'une endocardite infectieuse aiguë |
| Suspicion d'obstruction dynamique à l'éjection du ventricule gauche | Identification d'un shunt anatomique intracardiaque (ou intrapulmonaire) |
| Évaluation de la pression artérielle pulmonaire | Identification d'un embole en transit ou enclavé dans l'artère pulmonaire proximale ^a |
| Suspicion de thrombus de la pointe du ventricule gauche | Identification d'une source cardiaque ou aortique d'embolie systémique |
| Évaluation de la veine cave inférieure | Guidage de procédures invasives ^{a,b} |
| Traumatisme pénétrant précordial | Traumatisme thoracique fermé grave (lésions cardiovasculaires) et syndrome aortique aigu ^a |
| ^a Chez un patient ventilé sous sédation (tolérance) | |
| ^b Montée de sonde d'entraînement électrosystolique, positionnement de canule d'assistance circulatoire, fermeture d'un foramen ovale perméable... | |

| Tableau 2 Principaux avantages et principales limites respectives de l'échocardiographie par voie transthoracique et par voie transœsophagienne chez les patients de réanimation | |
|--|--|
| Échocardiographie transthoracique | Échocardiographie transœsophagienne |
| Strictement non invasive | Qualité constante des images obtenues |
| Pas de contre-indication | Visualisation de structures anatomiques profondes non accessible par voie transthoracique |
| Qualité d'images aléatoire (patient ventilé, pansements, emphysème sous-cutané...): potentielle perte de sensibilité et spécificité | Contre-indications liées au risque de complications du positionnement de la sonde dans l'œsophage (pathologie de l'œsophage, lésion cervicale instable...) |
| Inaccessibilité de certaines structures anatomiques profondes (gros vaisseaux, médiastin, auricule gauche, foramen ovale...) | Problème de tolérance en ventilation spontanée |
| Meilleur alignement du tir doppler avec certains courants sanguins (valvulopathie ou prothèse valvulaire aortique, obstacle dynamique à l'éjection, insuffisance tricuspide...) | Risque de sous-estimation de certaines mesures de vitesses doppler par défaut d'alignement |
| Meilleur alignement pour la mesure en doppler tissulaire des vitesses diastoliques de l'anneau mitral (fonction diastolique et évaluation des pressions de remplissage du ventricule gauche) | Évaluation des propriétés diastoliques du ventricule gauche en doppler tissulaire non validée par voie transœsophagienne (angulation du tir doppler) |

secondairement d'encadrer à leur tour des médecins en formation [19]. Le caractère opérateur-dépendant de l'échocardiographie a longtemps été présenté comme une de ses principales limites. Cependant, la fiabilité des informations fournies par d'autres techniques de monitoring hémodyna-

mique comme le cathétérisme droit dépend aussi étroitement de l'opérateur [20]. Des modes de monitoring hémodynamique continu plus récents tels que la thermodilution transpulmonaire fournissent des mesures fiables du débit cardiaque sous couvert de calibrations régulières [21]. Si

l'acquisition des paramètres hémodynamiques est facilitée avec cette technique, la fiabilité de leur interprétation reste elle aussi dépendante de l'opérateur. Ainsi, les efforts de formation des réanimateurs à l'échocardiographie consentis depuis plusieurs années ont permis sa large diffusion dans les services de réanimation et sa reconnaissance comme méthode d'évaluation hémodynamique de première ligne chez les patients en état de choc [22].

Monitoring hémodynamique : évaluation hémodynamique initiale

Le premier but du monitoring hémodynamique est d'identifier le type de choc selon son profil hémodynamique et de sélectionner ainsi le traitement le mieux adapté [7]. Comme toute méthode d'évaluation hémodynamique, l'échocardiographie doit s'intégrer et non se substituer à un raisonnement médical fondé sur les éléments contextuels, l'examen clinique et les résultats biologiques et d'imagerie. L'interprétation de l'échocardiographie doit prendre en compte les conditions de réalisation de l'examen (exemple : niveau de pression artérielle systolique, type de ventilation, rythme cardiaque, température corporelle) et le traitement en cours (exemple : inotropes). En dehors de situations caricaturales aisées à identifier (exemple : hypovolémie profonde, tamponnade, cœur pulmonaire aigu sévère), la conduite de l'échocardiographie doit s'attacher à réunir un faisceau d'arguments convergents en faveur d'un diagnostic expliquant la défaillance cardiorespiratoire. La pertinence clinique d'éléments de découverte fortuite (exemple : cardiomyopathie ou valvulopathie chronique sous-jacente) doit être discutée précisément afin de s'assurer de leur imputabilité dans le tableau clinique et d'éviter ainsi toute dérive diagnostique potentiellement délétère pour le patient.

L'hypovolémie reste le mécanisme le plus fréquent à l'origine d'un état de choc et d'une question clinique pluriquotidienne en réanimation [23]. Les paramètres hémodynamiques dits « statiques » (pression veineuse centrale, pression artérielle pulmonaire d'occlusion, volume ou surface télédiastolique du ventricule gauche en échocardiographie) n'ont pas de valeur discriminante pour distinguer les patients qui vont augmenter leur débit cardiaque après un remplissage vasculaire (répondeurs) des autres (non-répondeurs) [24]. Des indices « dynamiques » ont été proposés afin de prédire la réponse au remplissage vasculaire et d'éviter ainsi toute surcharge hydrique inutile et potentiellement néfaste [25]. Chez les patients ventilés, les variations respiratoires du diamètre de la veine cave supérieure (Δ VCS) en ETO, du diamètre de la veine cave inférieure (Δ VCI) en ETT et de la vitesse maximale doppler enregistrée dans la chambre de chasse du ventricule gauche (Δ VmaxAo) quelle que soit l'approche ont été validées initialement chez des patients en choc septique dans

des études de petite taille [26–29]. Chez les patients en ventilation spontanée, l'augmentation de l'intégrale temps-vitesse du profil doppler enregistré dans la chambre de chasse du ventricule gauche (Δ ITVAo) pendant un lever de jambes passif a été proposée pour prédire la réponse au remplissage vasculaire [30,31]. En revanche, les variations respiratoires de veine cave inférieure — opposées à celles observées sous ventilation en pression positive — ne permettent pas de prédire de manière fiable la réponse au remplissage vasculaire chez ces patients [32,33]. Chacun de ces indices « dynamiques » souffre de certaines limites qui en réduisent parfois la précision (Tableau 3). Dans une étude multicentrique récente évaluant 540 patients ventilés par échocardiographie pour insuffisance circulatoire aiguë quelle qu'en soit l'origine, Δ VmaxAo était le paramètre le plus sensible et Δ VCS le plus spécifique pour prédire la réponse au lever de jambes passif utilisé comme succédané au remplissage vasculaire [34]. Alors que Δ VmaxAo et Δ VCI étaient exploitables chez 78 % des patients, Δ VCS était obtenu dans 99,6 % des cas, mais nécessitait une ETO. L'aire sous la courbe ROC de Δ VCS était significativement supérieure à celle de Δ VCI, mais la précision diagnostique dans cette étude était globalement inférieure à celle décrite initialement pour chacun des indices « dynamiques » évalués. Les résultats étaient similaires pour le groupe de 229 patients qui ont bénéficié d'un remplissage vasculaire au décours de l'évaluation échocardiographique initiale [34]. Cette différence de précision diagnostique a plusieurs explications. Premièrement, la taille de la population étudiée était beaucoup plus importante et les étiologies d'insuffisance circulatoire aiguë étaient variées, comparées aux petits échantillons de patients en choc septique décrits dans les études pionnières [26–29]. Deuxièmement, l'hypovolémie était plus profonde dans les études initiales au vu des valeurs moyennes d'indices « dynamiques » mesurées avant remplissage vasculaire qui étaient nettement supérieures à celles de la cohorte multicentrique. Troisièmement, une grande proportion de patients de la cohorte multicentrique avait un volume courant inférieur à 8 ml/kg et une chirurgie abdominale récente qui ont pu réduire la précision diagnostique des indices « dynamiques ». Cette étude pragmatique qui reflète la diversité des situations rencontrées chez les patients ventilés de réanimation examinés en échocardiographie pour une insuffisance circulatoire aiguë a montré que seul un seuil inférieur à 8 % pour l'ensemble des paramètres « dynamiques » permettait d'atteindre une sensibilité de 90 %, alors qu'un seuil de 31 % pour Δ VCS et de 18 % pour Δ VCI et Δ VmaxAo avait une spécificité de 90 % chez les patients à haut risque de surcharge volémique (exemple : syndrome de détresse respiratoire aiguë [SDRA]) [34]. Outre l'utilisation de valeurs seuil différentes selon le contexte clinique (choix de privilégier la sensibilité ou la spécificité), cette étude suggère que les indices « dynamiques » peuvent être combinés afin d'éviter certains faux résultats positifs, comme une

| Tableau 3 Avantages et limites respectives des paramètres « dynamiques » utilisés en échocardiographie pour prédire la réponse au remplissage vasculaire | | |
|---|---|---|
| Paramètres « dynamiques » | Limites | Avantages |
| Variations respiratoires de la veine cave supérieure | Nécessite l'échocardiographie transœsophagienne Non utilisable chez les patients en ventilation spontanée | Haute faisabilité Spécificité Prédit la réponse au remplissage du ventricule droit Utilisable si rythme non sinusal |
| Variations respiratoires de la veine cave inférieure | Faisabilité aux alentours de 80 % Interférence de la pression intra-abdominale Peu précis chez les patients en ventilation spontanée (influence de l'effort inspiratoire) | Rapide à obtenir Facile d'apprentissage Intégré à tout examen Prédit la réponse au remplissage du ventricule droit Utilisable si rythme non sinusal |
| Variations respiratoires de la vitesse doppler maximale enregistrée dans la chambre de chasse du ventricule gauche | Applicabilité dans environ 80 % des cas (si rythme sinusal et selon la qualité d'images) Inapplicable en ventilation spontanée Faux-positif si dysfonction ventriculaire droite | Rapide à obtenir Facile d'apprentissage Intégré à tout examen Sensibilité |
| Variations de l'intégrale temps-vitesse du profil doppler enregistré dans la chambre de chasse du ventricule gauche induite par le lever de jambes passif | Lourdeur de la procédure Contre-indications ou infaisabilité du lever de jambes passif ^a | Utilisable chez les patients en ventilation spontanée Utilisable si rythme non sinusal |

^a Hypertension intracrânienne, tamponnade, dissection aortique, amputation des membres inférieurs, fractures instables du bassin...

augmentation de ΔV_{maxAo} en lien avec une défaillance cardiaque droite et non une précharge-dépendance [35].

En l'absence de réponse prévisible au remplissage vasculaire chez un patient en état de choc, l'échocardiographie permet d'identifier un bas débit cardiaque lié à une dysfonction cardiaque et précise quel est le ventricule défaillant [36]. Outre la mesure du volume d'éjection systolique du ventricule gauche, elle précise si celui-ci est généré par un volume cavitaire augmenté (dilatation ventriculaire) plus que par le raccourcissement des fibres myocardiques, identifie précisément la présence et la sévérité d'une éventuelle cardiomyopathie ou valvulopathie sous-jacente et évalue le retentissement de la défaillance cardiaque sur les pressions de remplissage [6]. C'est pourquoi l'échocardiographie est requise en présence d'un choc cardiogénique [37,38]. En cas de défaillance hémodynamique postopératoire de chirurgie cardiaque, l'ETO est incontournable, car elle permet en outre d'identifier rapidement des complications qui nécessitent une reprise chirurgicale en urgence, alors que l'ETT peut être prise en défaut [39].

La défaillance circulatoire touche plus de la moitié des patients présentant un SDRA [40], et ce dernier est lié à une pneumopathie ou à un sepsis d'une autre origine dans 60 % des cas [41,42]. Dans ces cas, l'échocardiographie permet d'identifier le mécanisme de la défaillance circulatoire, notamment lorsqu'elle est induite par le sepsis. De plus,

l'échocardiographie fournit le critère hémodynamique du SDRA en éliminant une élévation des pressions de remplissage gauche [43]. C'est pourquoi son utilisation a été suggérée dans la nouvelle définition du SDRA [44]. Mais l'échocardiographie permet également d'identifier la présence d'un cœur pulmonaire aigu [45], la forme la plus sévère de dysfonction ventriculaire droite qui peut expliquer la défaillance circulatoire associée au SDRA [46]. Cette défaillance ventriculaire droite est secondaire à l'augmentation des résistances vasculaires pulmonaires associée au SDRA et peut être majorée par les effets délétères de la ventilation mécanique même dite « protectrice » sur la fonction du ventricule droit [47]. Dans une cohorte multicentrique récente évaluant en ETO plus de 750 patients ventilés pour un SDRA modéré à sévère au cours des trois premiers jours d'hospitalisation en réanimation, la prévalence du cœur pulmonaire aigu était de 22 % [48]. Quatre facteurs de risque de développer un cœur pulmonaire aigu ont été identifiés : la pneumopathie à l'origine du SDRA, le rapport PaO_2/FiO_2 inférieur à 150 mmHg, la *driving pressure* supérieure ou égale à 18 cmH₂O et la $PaCO_2$ supérieure ou égale à 48 mmHg. Quand tous ces facteurs étaient présents, le risque de cœur pulmonaire aigu excédait 60 %, alors qu'il était inférieur à 10 % quand aucun facteur n'était présent [49]. Cette étude suggère qu'une échocardiographie doit être réalisée dès lors que le patient présente un score supérieur ou égal 2 puisque la fréquence

du cœur pulmonaire aigu excède alors 20 %. L'ETO a une précision supérieure à l'ETT pour diagnostiquer le cœur pulmonaire aigu à la phase initiale du SDRA [42]. Elle permet également d'identifier un éventuel foramen ovale perméable dans 15 à 19 % des cas [42,49].

Monitoring hémodynamique : évaluer la réponse à l'intervention thérapeutique

Le second but du monitoring hémodynamique est d'évaluer la réponse du patient à l'intervention thérapeutique choisie sur les bases de l'évaluation initiale [7]. Il n'est pas nécessaire en cas d'état de choc répondant rapidement au traitement de première ligne guidé sur l'examen clinique et l'évaluation hémodynamique initiale par échocardiographie. En revanche, le monitoring hémodynamique est utile en cas d'état de choc sévère et dans des situations cliniques complexes afin d'identifier le ou les facteurs qui contribuent principalement à la défaillance circulatoire sur lesquels le traitement doit porter [7]. Il s'adresse en pratique aux patients instables en défaillance circulatoire et/ou respiratoire, ayant une pathologie à risque évolutif rapide (exemple : choc septique, SDRA), ou des comorbidités l'exposant tout particulièrement à une intolérance du traitement (exemple : cardiopathie chronique sous-jacente). L'échocardiographie constitue un mode de monitoring hémodynamique de première intention, car elle est utilisée en routine de manière répétée afin de juger l'efficacité et la tolérance de l'intervention thérapeutique qu'elle a suscitée (Fig. 1). Bien qu'elle ne fournisse pas un monitoring hémodynamique continu, l'échocardiographie permet de mieux caractériser les défaillances hémodynamiques, de sélectionner les meilleures options thérapeutiques (exemple : remplissage vasculaire, inotropes, négativation du bilan hydrosodé) et d'évaluer au mieux la réponse hémodynamique au traitement entrepris [7]. Pour que cet usage soit possible, l'examen doit être ciblé et ne pas comporter de mesures complexes pour en garantir la faisabilité. Chez 46 patients ventilés en choc septique, nous avons comparé la prise en charge guidée par les recommandations de la Surviving Sepsis Campaign et celle reposant sur l'évaluation hémodynamique précoce par ETO répétée pour confirmer l'efficacité de l'intervention thérapeutique [50]. Les deux approches étaient concordantes pour guider le remplissage vasculaire chez 32 des 46 patients (70 %), et l'ETO n'a pas identifié de précharge-dépendance chez les 17 patients restants qui n'ont pas reçu de remplissage vasculaire malgré une pression veineuse centrale inférieure à 12 mmHg. Par ailleurs, l'ETO a conduit à débiter un traitement inotrope positif chez 14 patients ayant une dysfonction systolique marquée du ventricule gauche avec hyperlactatémie mais sans précharge-dépendance, alors qu'il n'était pas indiqué par les recommandations de la Sur-

viving Sepsis Campaign [50]. Cette étude incite donc au monitoring hémodynamique par échocardiographie à la phase initiale du choc septique. Par ailleurs, parmi 32 patients ventilés pour état de mal épileptique, l'échocardiographie réalisée toutes les six heures a identifié une cardiomyopathie de stress au cours des 24 premières heures chez 18 d'entre eux (56 %) et a documenté dans tous les cas une récupération rapide de la dysfonction systolique du ventricule gauche [51]. Cette étude suggère que les patients admis pour état de mal épileptique soient évalués par échocardiographie à la recherche d'une cardiomyopathie de stress et monitorés en cas de défaillance circulatoire associée. En outre, l'échocardiographie est indispensable pour le monitoring hémodynamique des patients en choc cardiogénique afin de guider au mieux leur prise en charge [37,38]. Chez les plus sévères d'entre eux, l'ETO permet de guider la mise en place d'une assistance circulatoire et d'identifier d'éventuelles complications [52], tout en évaluant régulièrement la possibilité du sevrage de l'assistance en présence d'une récupération myocardique [53].

Après l'évaluation hémodynamique initiale des patients ventilés pour SDRA modéré à sévère, l'échocardiographie peut être répétée pour guider la stratégie ventilatoire en s'assurant de sa tolérance par le ventricule droit [40,54]. L'ETO documente le bénéfice potentiel de la ventilation mécanique en décubitus ventral sur la fonction ventriculaire droite, notamment en cas de SDRA compliqué de cœur pulmonaire aigu [55]. Elle peut même être réalisée pendant les périodes de ventilation mécanique en décubitus ventral, notamment en cas d'événement hémodynamique [56].

L'échocardiographie n'est classiquement pas considérée comme un mode de monitoring hémodynamique, car elle ne fournit que des informations ponctuelles qui dépendent de la présence d'un opérateur entraîné et ne permet pas un suivi en continu de certains paramètres comme le débit cardiaque, à l'inverse des techniques fondées sur la thermodilution. Néanmoins, la miniaturisation des sondes d'ETO ouvre des perspectives de monitoring hémodynamique pendant des périodes prolongées grâce à une meilleure tolérance potentielle de la présence de la sonde d'échocardiographie dans l'œsophage. Les premières descriptions du monitoring hémodynamique continu de la fonction systolique du ventricule gauche à l'aide d'une sonde d'ETO miniaturisée couplée à la détection automatique des contours endocardiques remontent à une vingtaine d'années [57]. Une étude récente comparant chez 57 patients ventilés pour une défaillance circulatoire et/ou respiratoire aiguë les résultats d'une ETO multiplan classique (diamètre de sonde : 10 mm) et d'un examen réalisé avec une sonde multiplan miniaturisée (diamètre de sonde : 5,2 mm) a montré un excellent agrément tant pour le diagnostic que pour les propositions thérapeutiques découlant de cette double évaluation hémodynamique [58]. L'insertion de la sonde d'ETO miniaturisée a été

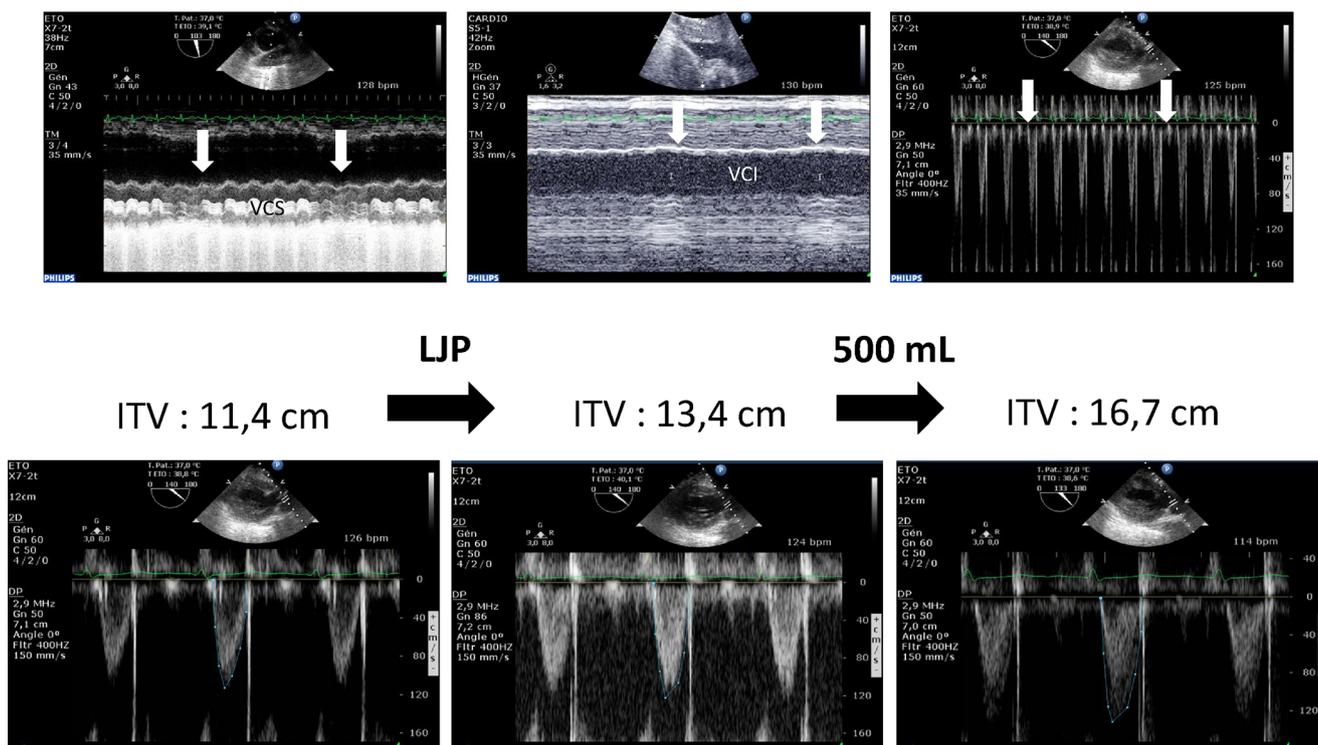


Fig. 1 Exemple de monitoring échocardiographique chez un patient ventilé pour choc septique compliqué de défaillance polyviscérale. L'échocardiographie transœsophagienne montre des variations respiratoires minimales de la veine cave supérieure (VCS) avec une faible diminution de son diamètre pendant l'insufflation mécanique (en haut à gauche, flèches). L'échocardiographie transthoracique montre des variations respiratoires minimales de la veine cave inférieure (VCI) avec une faible augmentation de son diamètre pendant l'insufflation mécanique (en haut au milieu, flèches). Il existe également des variations respiratoires minimales de la vitesse doppler maximale enregistrée dans la chambre de chasse du ventricule gauche, avec une faible accélération pendant l'insufflation mécanique (en haut à droite, flèches). Le volume d'éjection systolique est fortement diminué comme le reflète une intégrale temps-vitesse (ITV) du profil doppler enregistré dans la chambre de chasse du ventricule gauche à 11,4 cm (en bas à gauche). En l'absence de critère franc de précharge-dépendance, on réalise un lever de jambes passif (LJP) avec une bascule de 90° qui augmente l'intégrale temps-vitesse du profil doppler enregistré dans la chambre de chasse du ventricule gauche à 13,4 cm (en bas au centre). Cette augmentation de 18 % est en faveur d'une réponse au remplissage vasculaire qui est confirmée par la perfusion rapide de 500 ml de macromolécules : celle-ci permet d'augmenter l'intégrale temps-vitesse du profil doppler enregistré dans la chambre de chasse du ventricule gauche à 16,7 cm (en bas à droite). Parallèlement, le profil doppler mitral n'évoluera pas, reflétant ainsi l'absence d'augmentation des pressions de remplissage du ventricule gauche

plus facile que celle de la sonde conventionnelle, et aucune complication n'a été déplorée lorsqu'un monitoring hémodynamique sur une période pouvant atteindre deux heures a été réalisé. Enfin, la concordance entre les mesures réalisées avec les deux approches était excellente, la sonde miniaturisée offrant les mêmes modes d'imagerie que l'ETO classique, mais une qualité d'images encore globalement inférieure [58]. Une approche simplifiée fondée sur une interprétation qualitative et non quantitative de l'ETO validée chez les patients septiques [59] couplée à l'utilisation d'une sonde miniaturisée monoplan sans doppler intégré et à usage unique (diamètre de sonde : 5,5 mm) a été évaluée dans une récente étude multicentrique chez 94 patients ventilés examinés pour une défaillance circulatoire et/ou respiratoire aiguë [59]. La durée de monitoring était en moyenne de 32 heures et a permis 263 évaluations hémodynamiques

dont la moitié a eu un impact thérapeutique direct, avec une bonne tolérance de l'insertion œsophagienne prolongée de la sonde d'ETO miniaturisée [59]. Ces études suggèrent qu'à la faveur des progrès techniques et informatiques incessants, le monitoring hémodynamique à l'aide de sondes d'ETO miniaturisées qui permettent d'obtenir une image stable et une bonne tolérance de l'insertion œsophagienne prolongée se généralisera dans les prochaines années.

Échocardiographie et autres techniques de monitoring hémodynamique : exclusives ou complémentaires ?

Bien que l'échocardiographie et les techniques de thermodynamique ne soient pas interchangeables pour la mesure du débit

cardiaque, les deux approches identifient de manière concordante le sens de ses variations suite à une intervention thérapeutique [60]. Les études anciennes ayant comparé les résultats de l'ETO et du cathétérisme droit chez des patients de réanimation ventilés ont toutes souligné l'apport de l'échocardiographie qui fournissait des informations inaccessibles au monitoring hémodynamique invasif [61,62]. Ces pathologies peuvent être très variées selon le contexte clinique, mais en règle non identifiées par une technique de monitoring « aveugle » fondée sur la thermodilution, telles que l'obstruction dynamique à l'éjection du ventricule gauche, le cœur pulmonaire aigu, les valvulopathies aiguës ou chroniques sévères, les shunts anatomiques acquis, les tamponnades extrapéricardiques... [6]. Au cours du choc septique par exemple, la prévalence de l'obstruction dynamique à l'éjection du ventricule gauche progresse en raison de l'âge croissant des patients, et seule l'échocardiographie en permet le diagnostic [63]. Par ailleurs, certaines des pathologies dont le diagnostic échappe aux méthodes de monitoring hémodynamique « aveugle » peuvent invalider le débit cardiaque mesuré par thermodilution [64]. L'identification par l'échocardiographie de ces sources d'erreur dans la mesure des paramètres hémodynamiques au cours du cathétérisme droit est fondamentale, car les conclusions erronées qu'elles génèrent peuvent conduire à des interventions thérapeutiques excessives, voire inappropriées, donc potentiellement délétères pour le patient [65]. C'est pourquoi le cathétérisme droit est de moins en moins utilisé en réanimation. Néanmoins, il reste la méthode de référence pour explorer les patients ambulatoires avec hypertension artérielle pulmonaire sévère [65].

Actuellement, la thermodilution transpulmonaire a largement supplanté le cathétérisme droit pour le monitoring hémodynamique des patients de réanimation. Une étude récente réalisée chez 137 patients ventilés nécessitant un monitoring hémodynamique à la phase initiale du choc septique a comparé les propositions thérapeutiques découlant d'une évaluation par ETO et par thermodilution transpulmonaire [66]. L'ordre des évaluations hémodynamiques était randomisé, et celles-ci étaient réalisées et interprétées de manière indépendante par deux investigateurs distincts n'ayant pas en charge le patient. Un algorithme thérapeutique prédéfini était utilisé pour chaque mode de monitoring hémodynamique. L'ETO a identifié un cœur pulmonaire aigu chez cinq patients, ce diagnostic n'étant pas accessible à la thermodilution transpulmonaire [67]. Les propositions thérapeutiques prédéfinies selon le profil hémodynamique obtenu étaient concordantes chez seulement 87 des 132 patients restants (66 %). Après adjudication par deux experts indépendants, la concordance a augmenté entre les deux types d'évaluation, ce qui souligne l'importance de la formation du réanimateur quel que soit le mode de monitoring hémodynamique utilisé [66]. La clairance des lactates, la

tolérance des interventions thérapeutiques et la mortalité en réanimation et à 28 jours n'étaient pas statistiquement différents que les propositions thérapeutiques aient été convergentes ou non, et en cas de divergence que le médecin en charge du patient ait suivi les propositions thérapeutiques de l'ETO ou de la thermodilution transpulmonaire. Surtout, l'ETO identifiait une source potentielle d'imprécision de la thermodilution transpulmonaire chez huit des 29 patients pour lesquels persistait une discordance entre les deux évaluations hémodynamiques après adjudication (exemple : valvulopathie gauche sévère, obstacle dynamique à l'éjection du ventricule gauche, bas débit cardiaque majeur) [66]. Cette étude suggère que l'ETO semble souhaitable avant d'envisager un monitoring hémodynamique continu « aveugle » des patients en choc septique afin d'identifier une potentielle source d'imprécision de la thermodilution transpulmonaire.

Conclusion

Seule l'échocardiographie fournit à la fois des informations morphologiques et fonctionnelles sur le massif cardiaque et les gros vaisseaux. Elle est donc recommandée en première intention pour l'évaluation hémodynamique répétée des patients ayant une insuffisance circulatoire et/ou respiratoire aiguë. Sous couvert d'une formation spécifique facilement accessible en France, l'échocardiographie permet d'évaluer au mieux l'efficacité et la tolérance des interventions thérapeutiques, et de guider ainsi la prise en charge des patients en état de choc. Bien qu'elle ne constitue pas un outil de monitoring continu, la miniaturisation des sondes d'ETO ouvre la perspective de périodes d'évaluation hémodynamique de plus en plus longues chez les patients les plus instables. Les indications du monitoring hémodynamique par échocardiographie sont actuellement bien définies, et cette approche apparaît complémentaire plus que concurrente avec d'autres techniques telles que la thermodilution transpulmonaire.

Liens d'intérêts : l'auteur déclare ne pas avoir de lien d'intérêt.

Références

1. Antonelli M, Levy M, Andrews PJ, Chastre J, Hudson LD, Manthous C, Meduri GU, Moreno RP, Putensen C, Stewart T, Torres A, (2007) Hemodynamic monitoring in shock and implications for management. International Consensus Conference, Paris, France, 27–28 April 2006. *Intensive Care Med* 33: 575–590
2. Etchecopar-Chevreuil C, François B, Clavel M, Pichon N, Gastinne H, Vignon P, (2008) Cardiac morphological and functional changes during early septic shock: a transesophageal echocardiographic study. *Intensive Care Med* 34: 250–256

3. Vieillard-Baron A, Caille V, Charron C, Belliard G, Page B, Jardin F, (2008) Actual incidence of global left ventricular hypokinesia in adult septic shock. *Crit Care Med* 36: 1701–1706
4. De Backer D, Biston P, Devriendt J, Madl C, Chochrad D, Aldecoa C, Brasseur A, Defrance P, Gottignies P, Vincent JL; SOAP II Investigators, (2010) Comparison of dopamine and norepinephrine in the treatment of shock. *New Engl J Med* 362: 779–789
5. Teboul JL, Saugel B, Cecconi M, De Backer D, Hofer CK, Monnet X, Perel A, Pinsky MR, Reuter DA, Rhodes A, Squara P, Vincent JL, Scheeren TW, (2016) Less invasive hemodynamic monitoring in critically ill patients. *Intensive Care Med* 42: 1350–1359
6. Vignon P, (2005) Hemodynamic assessment of critically ill patients using echocardiography Doppler. *Curr Opin Crit Care* 11: 227–234
7. Cecconi M, De Backer D, Antonelli M, Beale R, Bakker J, Hofer C, Jaeschke R, Mebazaa A, Pinsky MR, Teboul JL, Vincent JL, Rhodes A, (2014) Consensus on circulatory shock and hemodynamic monitoring. Task force of the European Society of Intensive Care Medicine. *Intensive Care Med* 40: 1795–1815
8. Colquhoun DA, Roche AM, (2014) Oesophageal Doppler cardiac output monitoring: a longstanding tool with evolving indications and applications. *Best Pract Res Clin Anaesthesiol* 28: 353–62
9. Mayo PH, Beaulieu Y, Doelken P, Feller-Kopman D, Harrod C, Kaplan A, Oropello J, Vieillard-Baron A, Axler O, Lichtenstein D, Maury E, Slama M, Vignon P, (2009) American College of Chest Physicians/la Société de réanimation de langue française statement on competence in critical care ultrasonography. *Chest* 135: 1050–60
10. Hüttemann E, Schelenz C, Kara F, Chatziz Nikolaou K, Reinhart K, (2004) The use and safety of transoesophageal echocardiography in the general ICU — a minireview. *Acta Anaesthesiol Scand* 48: 827–836
11. Denault AY, Couture P, McKenty S, Boudreault D, Plante F, Perron R, Babin D, Buithieu J, (2002) Perioperative use of transesophageal echocardiography by anesthesiologists: impact in noncardiac surgery and in the intensive care unit. *Can J Anaesth* 49: 287–293
12. Vignon P, Mentec H, Terré S, Gastinne H, Guéret P, Lemaire F, (1994) Diagnostic accuracy and therapeutic impact of transthoracic and transesophageal echocardiography in mechanically ventilated patients in the ICU. *Chest* 106: 1829–1834
13. Vieillard-Baron A, Charron C, Chergui K, Peyrouset O, Jardin F, (2006) Bedside echocardiographic evaluation of hemodynamics in sepsis: is a qualitative evaluation sufficient? *Intensive Care Med* 32: 1547–1552
14. Amiel JB, Grümman A, Lhéritier G, Clavel M, François B, Pichon N, Dugard A, Marin B, Vignon P. (2012) Assessment of left ventricular ejection fraction using an ultrasonic stethoscope in critically ill patients. *Crit Care* 16: R29
15. Vignon P, Mentec H, François B, Gastinne H, Gay R, (1996) Tolérance de l'échocardiographie transœsophagienne en réanimation. *Reanim Urg* 5: 3–8
16. Vieillard-Baron A, Slama M, Cholley B, Janvier G, Vignon P, (2008) Echocardiography in the intensive care unit: from evolution to revolution? *Intensive Care Med* 34: 243–249
17. Expert roundtable on ultrasound in ICU, (2011) International expert statement on training standards for critical care ultrasonography. *Intensive Care Med* 37: 1077–1083
18. Expert round table on echocardiography in ICU, (2014) International consensus statement on training standards for advanced critical care echocardiography. *Intensive Care Med* 40: 654–666
19. Vignon P, (2012) PRO: physician-performed ultrasound: the time has come for routine use in acute care medicine. *Anesth Analg* 115: 999–1003
20. Gnaegi A, Feihl F, Perret C, (1997) Intensive care physicians' insufficient knowledge of right-heart catheterization at the bedside: time to act? *Crit Care Med* 25: 213–220
21. Monnet X, Persichini R, Ktari M, Jozwiak M, Richard C, Teboul JL, (2011) Precision of the transpulmonary thermodilution measurements. *Crit Care* 15: R204
22. Vincent JL, De Backer D, (2013) Circulatory shock. *N Engl J Med* 369: 1726–1734
23. Perner A, Vieillard-Baron A, Bakker J, (2015) Fluid resuscitation in ICU patients: quo vadis? *Intensive Care Med* 41: 1667–1669
24. Bendjelid K, Romand JA, (2003) Fluid responsiveness in mechanically ventilated patients: a review of indices used in intensive care. *Intensive Care Med* 29: 352–360
25. Monnet X, Marik PE, Teboul JL, (2016) Prediction of fluid responsiveness: an update. *Ann Intensive Care* 6: 111
26. Vieillard-Baron A, Chergui K, Rabiller A, Peyrouset O, Page B, Beauchet A, Jardin F, (2004) Superior vena caval collapsibility as a gauge of volume status in ventilated septic patients. *Intensive Care Med* 30: 1734–1739
27. Barbier C, Loubières Y, Schmit C, Hayon J, Ricôme JL, Jardin F, Vieillard-Baron A, (2004) Respiratory changes in inferior vena cava diameter are helpful in predicting fluid responsiveness in ventilated septic patients. *Intensive Care Med* 30: 1740–1746
28. 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: 1834–1837
29. Feissel M, Michard F, Mangin I, Ruyer O, Faller JP, Teboul JL, (2001) Respiratory changes in aortic blood velocity as an indicator of fluid responsiveness in ventilated patients with septic shock. *Chest* 119: 867–873
30. Lamia B, Ochagavia A, Monnet X, Chemla D, Richard C, Teboul JL, (2007) Echocardiographic prediction of volume responsiveness in critically ill patients with spontaneously breathing activity. *Intensive Care Med* 33: 1125–1132
31. Maizel J, Airapetian N, Lorne E, Tribouilloy C, Massy Z, Slama M, (2007) Diagnosis of central hypovolemia by using passive leg raising. *Intensive Care Med* 33: 1133–1138
32. Muller L, Bobbia X, Toumi M, Louart G, Molinari N, Ragonnet B, Quintard H, Leone M, Zoric L, Lefrant JY; AzuRea group, (2012) Respiratory variations of inferior vena cava diameter to predict fluid responsiveness in spontaneously breathing patients with acute circulatory failure: need for a cautious use. *Crit Care* 16: R188
33. Airapetian N, Maizel J, Alyamani O, Mahjoub Y, Lorne E, Levrard M, Ammenouche N, Seydi A, Tinturier F, Lobjoie E, Dupont H, Slama M, (2015) Does inferior vena cava respiratory variability predict fluid responsiveness in spontaneously breathing patients? *Crit Care* 19: 400
34. Vignon P, Repessé X, Bégot E, Léger J, Jacob C, Bouferrache K, Slama M, Prat G, Vieillard-Baron A, (2016) Comparison of Echocardiographic Indices Used to Predict Fluid Responsiveness in Ventilated Patients. *Am J Respir Crit Care Med* [Epub ahead of print]
35. Jardin F, (2004) Cyclic changes in arterial pressure during mechanical ventilation. *Intensive Care Med* 30: 1047–1050
36. Vignon P, Slama M, (2011) Diagnosing the mechanisms of circulatory failure. In: De Backer D, Cholley BP, Slama M, Vieillard-Baron A, Vignon P (eds) *Hemodynamic monitoring using echocardiography in the critically ill*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, pp 1–9
37. Levy B, Bastien O, Karim B, Cariou A, Chouihed T, Combes A, Mebazaa A, Megarbane B, Plaisance P, Ouattara A, Spaulding C, Teboul JL, Vanhuysse F, Boulain T, Kuteifan K, (2015) Experts' recommendations for the management of adult patients with cardiogenic shock. *Ann Intensive Care* 5: 26

38. Mebazaa A, Tolppanen H, Mueller C, Lassus J, DiSomma S, Baksyte G, Cecconi M, Choi DJ, Cohen Solal A, Christ M, Masip J, Arrigo M, Noura S, Ojji D, Peacock F, Richards M, Sato N, Sliwa K, Spinar J, Thiele H, Yilmaz MB, Januzzi J, (2016) Acute heart failure and cardiogenic shock: a multidisciplinary practical guidance. *Intensive Care Med* 42: 147–163
39. Grumann A, Baretto L, Dugard A, Morera P, Cornu E, Amiel JB, Vignon P, (2012) Localized cardiac tamponade after open-heart surgery. *Ann Thoracic Cardiovasc Surg* 18: 524–529
40. Vignon P, Repessé X, Vieillard-Baron A, Maury E, (2016) Critical care ultrasonography in acute respiratory failure. *Critical Care* 20: 228
41. Boissier F, Katsahian S, Razazi K, Thille AW, Roche-Campo F, Leon R, Vivier E, Brochard L, Vieillard-Baron A, Brun-Buisson C, Mekontso Dessap A, (2013) Prevalence and prognosis of cor pulmonale during protective ventilation for acute respiratory distress syndrome. *Intensive Care Med* 39: 1725–1733
42. Lhéritier G, Legras A, Caille A, Lherm T, Mathonnet A, Frat JP, Courte A, Martin-Lefèvre L, Gouëlle JP, Amiel JB, Garot D, Vignon P, (2013) Prevalence and prognostic value of acute cor pulmonale and patent foramen ovale in ventilated patients with early acute respiratory distress syndrome: a multicenter study. *Intensive Care Med* 39: 1734–1742
43. Vignon P, AitHssain A, François B, Preux PM, Pichon N, Clavel M, Frat JP, Gastinne H, (2008) Echocardiographic assessment of pulmonary artery occlusion pressure in ventilated patients: a transoesophageal study. *Crit Care* 12: R18
44. ARDS Definition Task Force, Ranieri VM, Rubenfeld GD, Thompson BT, Ferguson ND, Caldwell E, Fan E, Camporota L, Slutsky AS, (2012) Acute respiratory distress syndrome: the Berlin Definition. *JAMA* 307: 2526–2533
45. Jardin F, Dubourg O, Bourdarias JP, (1997) Echocardiographic pattern of acute cor pulmonale. *Chest* 111: 209–217
46. Legras A, Caille A, Begot E, Lhéritier G, Lherm T, Mathonnet A, Frat JP, Courte A, Martin-Lefèvre L, Gouëlle JP, Mercier E, Vignon P; ARCO and CRICS network, (2015) Acute respiratory distress syndrome (ARDS)-associated acute cor pulmonale and patent foramen ovale: a multicenter noninvasive hemodynamic study. *Critical Care* 19: 174
47. Guérin C, Matthay MA, (2016) Acute cor pulmonale and the acute respiratory distress syndrome. *Intensive Care Med* 42: 934–36
48. Mekontso-Dessap A, Boissier F, Charron C, Bégot E, Repessé X, Legras A, Brun-Buisson C, Vignon P, Vieillard-Baron A, (2016) Acute cor pulmonale during protective ventilation for acute respiratory distress syndrome: prevalence, predictors, and clinical impact. *Intensive Care Med* 42: 862–70
49. Mekontso-Dessap A, Boissier F, Leon R, Carreira S, Campo FR, Lemaire F, Brochard L, (2010) Prevalence and prognosis of shunting across patent foramen ovale during acute respiratory distress syndrome. *Crit Care Med* 38: 1786–1792
50. Bouferrache K, Amiel JB, Chimot L, Caille V, Charron C, Vignon P, Vieillard-Baron A, (2012) Initial resuscitation guided by the Surviving Sepsis Campaign recommendations and early echocardiographic assessment of hemodynamics in intensive care unit septic patients: a pilot study. *Crit Care Med* 40: 2821–2827
51. Belcour D, Jabot J, Grard B, Roussiaux A, Ferdynus C, Vandroux D, Vignon P, (2015) Prevalence and Risk Factors of Stress Cardiomyopathy After Convulsive Status Epilepticus in ICU Patients. *Crit Care Med* 43: 2164–2170
52. Douflé G, Roscoe A, Billia F, Fan E, (2015) Echocardiography for adult patients supported with extracorporeal membrane oxygenation. *Critical Care* 19: 326
53. Aissaoui N, Luyt CE, Leprince P, Trouillet JL, Léger P, Pavie A, Diebold B, Chastre J, Combes A, (2011) Predictors of successful extracorporeal membrane oxygenation (ECMO) weaning after assistance for refractory cardiogenic shock. *Intensive Care Med* 37: 1738–1745
54. Vieillard-Baron A, Price LC, Matthay MA, (2013) Acute cor pulmonale in ARDS. *Intensive Care Med* 39: 1836–1838
55. Vieillard-Baron A, Charron C, Caille V, Belliard G, Page B, Jardin F, (2007) Prone positioning unloads the right ventricle in severe ARDS. *Chest* 132: 1440–1446
56. Mekontso-Dessap A, Proost O, Boissier F, Louis B, Roche Campo F, Brochard L, (2011) Transesophageal echocardiography in prone position during severe acute respiratory distress syndrome. *Intensive Care Med* 37: 430–434
57. Spencer KT, Krauss D, Thurn J, Mor-Avi V, Poppas A, Vignon P, Connor BG, Lang RM, (1997) Transnasal transesophageal echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 10: 728–737
58. Begot E, Dalmay F, Etchecopar C, Clavel M, Pichon N, Francois B, Lang R, Vignon P, (2015) Hemodynamic assessment of ventilated ICU patients with cardiorespiratory failure using a miniaturized multiplane transesophageal echocardiography probe. *Intensive Care Med* 41: 1886–1894
59. Vieillard-Baron A, Slama M, Mayo P, Charron C, Amiel JB, Esterez C, Leleu F, Repesse X, Vignon P, (2013) A pilot study on safety and clinical utility of a single-use 72-hour indwelling transesophageal echocardiography probe. *Intensive Care Med* 39: 629–635
60. Wetterslev M, Møller-Sørensen H, Johansen RR, Perner A, (2016) Systematic review of cardiac output measurements by echocardiography vs. thermodilution: the techniques are not interchangeable. *Intensive Care Med* 42: 1223–1233
61. Benjamin E, Griffin K, Leibowitz AB, Manasia A, Oropello JM, Geffroy V, DelGiudice R, Hufanda J, Rosen S, Goldman M, (1998) Goal-directed transesophageal echocardiography performed by intensivists to assess left ventricular function: comparison with pulmonary artery catheterization. *J Cardiothorac Vasc Anest* 12: 10–15
62. Costachescu T, Denault A, Guimond JG, Couture P, Carignan S, Sheridan P, Hellou G, Blair L, Normandin L, Babin D, Allard M, Harel F, Buihieu J, (2002) The hemodynamically unstable patient in the intensive care unit: hemodynamic vs. transesophageal echocardiographic monitoring. *Crit Care Med* 30: 1214–1223
63. Chauvet JL, El-Dash S, Delastre O, Bouffandeau B, Jusserand D, Michot JB, Bauer F, Maizel J, Slama M, (2015) Early dynamic left intraventricular obstruction is associated with hypovolemia and high mortality in septic shock patients. *Critical Care* 19: 262
64. Nishikawa T, Dohi S, (1993) Errors in the measurement of cardiac output by thermodilution. *Can J Anaesth* 40: 142–153
65. Marik PE, (2013) Obituary: pulmonary artery catheter 1970 to 2013. *Ann Intensive Care* 3: 38
66. Riu-Poulenc B, Begot E, Mari A, Clavel M, Chimot L, Delour P, Vargas F, Filloux B, Vandroux D, Jabot J, Silva S, Genestal M, François B, Pichon N, Vignon P, (2014) Agreement of therapeutic proposals derived from early hemodynamic assessment using transpulmonary thermodilution and transesophageal echocardiography in septic shock patients. *Intensive Care Med* 40: S209
67. Combes A, Berneau JB, Luyt CE, Trouillet JL, (2004) Estimation of left ventricular systolic function by single transpulmonary thermodilution. *Intensive Care Med* 30: 1377–83