

INDICES DE RÉPONSE AU REMPLISSAGE OÙ EN SOMMES-NOUS EN 2012?

Olfa Hamzaoui (1), Xavier Monnet (2), Jean-Louis Teboul (2)

(1) Service de Réanimation Médicale, Hôpital Antoine Bécclère, Hôpitaux Universitaires Paris-Sud, Clamart, France

(2) Service de Réanimation Médicale, Hôpital de Bicêtre, Hôpitaux Universitaires Paris-Sud, Le Kremlin-Bicêtre, France

INTRODUCTION

Un remplissage vasculaire optimal est nécessaire pour maintenir un débit cardiaque adéquat afin d'assurer la perfusion des différents organes. Cependant, un remplissage excessif expose les patients à des effets adverses qui peuvent être graves chez les patients de réanimation, notamment l'œdème aigu du poumon en présence d'une cardiopathie sous-jacente. Il est important de noter que seulement 50 % des patients en réanimation répondent au remplissage en augmentant leur débit cardiaque [1]. Afin d'éviter ces effets secondaires, certains tests ont été proposés pour prédire la réponse au remplissage. Dans cette mise au point, nous passerons en revue les différents indicateurs - statiques et dynamiques - de la réponse au remplissage, leurs rationnels physiologiques, leur utilité clinique et leurs limites.

1. LES INDICES STATIQUES

En considérant la courbe de Frank-Starling (volume d'éjection vs. précharge), la réponse au remplissage est susceptible d'être positive pour des valeurs basses plutôt que pour des valeurs hautes de précharge ventriculaire (Figure 1).

Ainsi, au cours d'un état de choc la découverte d'une pression veineuse centrale (PVC) inférieure ou égale à 5 mmHg, d'une pression artérielle pulmonaire d'occlusion (PAPO) inférieure ou égale à 10 mmHg ou d'une surface télédiastolique du ventricule gauche (STDVG) inférieure à 5 cm²/m² peuvent éventuellement inciter à un remplissage vasculaire [2] car ces valeurs se trouvent en général sur la partie ascendante de la courbe de Frank-Starling (Figure 1) [2-5].

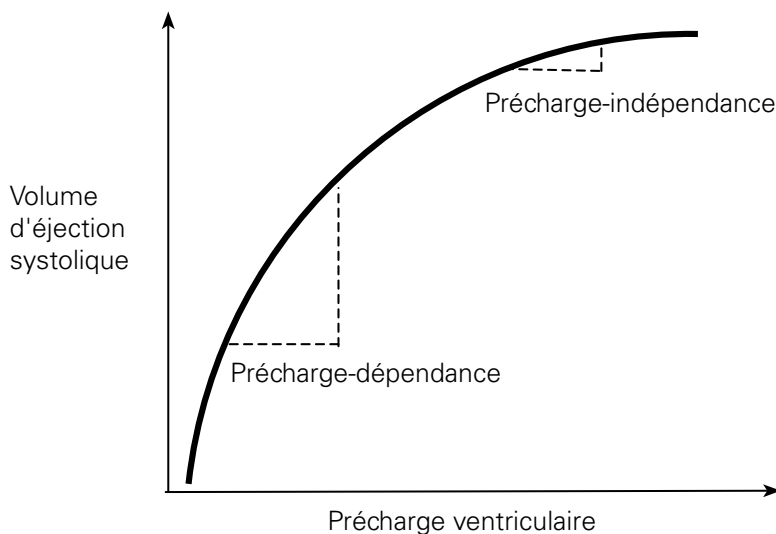


Figure 1 : la relation de Frank-Starling

La relation entre la précharge ventriculaire et le volume d'éjection systolique est une relation curviligne. De ce fait, si le ventricule travaille au niveau de la partie ascendante de la courbe, toute augmentation de la précharge induira une augmentation du volume d'éjection systolique (condition de précharge dépendance). Cependant si le ventricule travaille au niveau de la partie plate de la courbe (exemple : dilatation ventriculaire) l'augmentation de la précharge n'induirait pas d'augmentation du volume d'éjection systolique (condition de précharge indépendance). Le remplissage vasculaire induira une augmentation du volume d'éjection si les deux ventricules travaillent sur la partie ascendante de la courbe.

Néanmoins, la valeur prédictive des indices statiques pour tester la réponse au remplissage reste très limitée. En effet, entre des valeurs extrêmes - assez rarement rencontrées en réanimation - il existe une « zone grise » de valeurs d'indices statiques de précharge pour lesquelles les patients peuvent être répondeurs ou non au remplissage vasculaire [1, 2]. Deux explications peuvent être données :

- Les indices statiques de précharge disponibles, que ce soient les pressions ou les dimensions cardiaques sont loin d'être de parfaits marqueurs de précharge [6], et
- La pente de la courbe de Frank-Starling dépend aussi de la contractilité ventriculaire (Figure 2).

Ainsi, sauf pour des niveaux très bas de précharge cardiaque, une valeur donnée de précharge peut être associée aussi bien à une précharge-dépendance en cas de fonction systolique normale (portion initiale et ascendante de la relation de Frank-Starling) qu'à une précharge-indépendance en cas de contractilité cardiaque abaissée (portion distale et plate de la relation). Or, dès lors que la prise en charge tout à fait initiale de l'état de choc est passée, le patient de réanimation a déjà souvent reçu des solutés de remplissage. Dans ces cas, même si le niveau de précharge cardiaque n'est plus extrêmement bas, il peut persister un état de précharge-dépendance que la simple observation d'un niveau de précharge donné n'est pas en mesure de détecter.

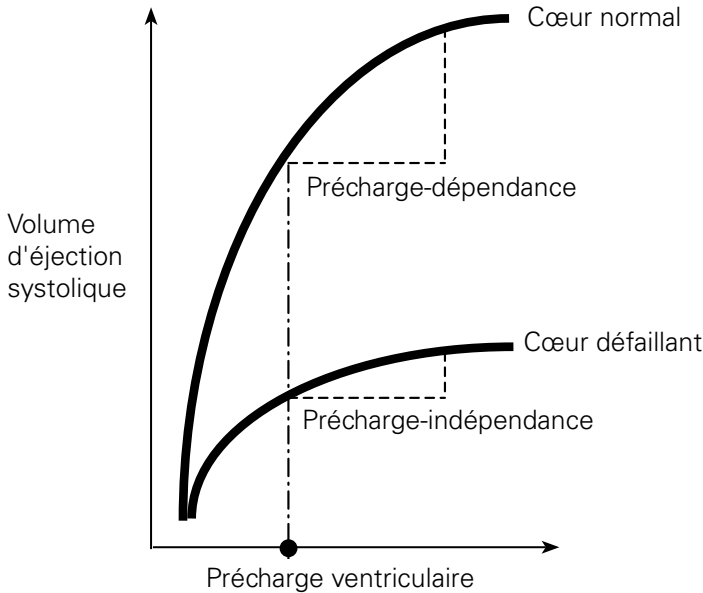


Figure 2 : la relation de Frank-Starling en fonction de la contractilité cardiaque. La forme de la courbe de Frank-Starling dépend de la contractilité cardiaque. Un remplissage vasculaire peut induire soit une augmentation significative du volume d'éjection systolique si la contractilité ventriculaire est normale (précharge dépendance/réponse au remplissage), soit aucun effet en cas de contractilité ventriculaire altérée (précharge indépendance/absence de réponse au remplissage). Ceci explique la très faible fiabilité des indices statiques à prédire la réponse au remplissage.

2. LES INDICES DYNAMIQUES

Une méthode alternative pour tester la réponse au remplissage est représentée par l'analyse dynamique de la relation de Frank-Starling afin de déterminer sur quelle portion de la courbe de Frank-Starling (précharge-volume d'éjection systolique) fonctionne le cœur d'un patient donné à un moment donné [7]. Le principe en est que si une variation transitoire de la précharge - sans cependant administrer de remplissage - entraîne une variation dans le même sens du volume d'éjection systolique, il est alors vraisemblable que le cœur fonctionne en état de précharge-dépendance et que si une expansion volémique est entreprise elle résultera en une élévation du volume d'éjection systolique. A l'inverse, si le volume d'éjection systolique ne varie pas significativement en réponse à la variation de précharge, le cœur est probablement précharge-indépendant de sorte qu'une expansion volémique n'aurait probablement pas l'effet bénéfique escompté.

Ces indices dynamiques peuvent être répartis en trois groupes selon la méthode utilisée pour obtenir la variation transitoire de la précharge :

- Le premier groupe comporte les indices reflétant la variabilité au cours de la ventilation mécanique du volume d'éjection systolique ou de ses dérivés comme la variabilité de la pression artérielle pulsée ou la variabilité du flux aortique Doppler.

- Le deuxième groupe comporte les indices de variabilité cyclique respiratoire ne se basant pas sur la variabilité cyclique du volume d'éjection systolique comme la variabilité du diamètre de la veine cave inférieure ou supérieure.
- Le troisième groupe comporte des manœuvres visant à provoquer une élévation transitoire de la précharge telles que lever de jambe passif et l'occlusion télé-expiratoire.

2.1. LA VARIABILITÉ AU COURS DE LA VENTILATION MÉCANIQUE DU VOLUME D'ÉJECTION SYSTOLIQUE OU DE SES DÉRIVÉS

2.1.1. RATIONNEL PHYSIOLOGIQUE

Le concept de variabilité respiratoire des paramètres hémodynamiques a été extrapolé des principes physiologiques concernant les interactions cœur-poumon au cours de la ventilation mécanique [8]. L'hypothèse physiologique fondamentale est que la variabilité cyclique de la précharge du ventricule droit résulte en des variations plus marquées du volume d'éjection systolique de ce ventricule si celui-ci travaille sur la portion ascendante plutôt que sur le plateau de la relation curvilinéaire de Frank-Starling. La variabilité cyclique du volume d'éjection ventriculaire droit induira à son tour une variation cyclique de précharge ventriculaire gauche qui résultera en une variation cyclique du volume d'éjection systolique gauche que si le ventricule gauche est également précharge-dépendant. Ainsi, la ventilation mécanique en pression positive devrait induire une ample variation du volume d'éjection systolique gauche en cas de précharge-dépendance des deux ventricules. En revanche, si un des deux ventricules n'est pas précharge-dépendant, aucun effet sur le volume d'éjection systolique ne pourra être observé [1, 8].

2.1.2. LES INDICES REFLÉTANT LA VARIABILITÉ RESPIRATOIRE DU VOLUME D'ÉJECTION SYSTOLIQUE

De très nombreuses études ont démontré que la variabilité respiratoire des paramètres dérivés du volume d'éjection systolique permet une prédiction précise de la réponse au remplissage chez les patients ventilés avec un volume courant normal, parfaitement adaptés à leurs ventilateurs et en rythme sinusal [1, 8, 9].

2.1.2.1. La variabilité respiratoire de la pression artérielle pulsée (ΔPP)

La variabilité respiratoire de la pression artérielle pulsée (ΔPP) a été largement étudiée car facile à obtenir. La pression pulsée est directement proportionnelle au volume d'éjection systolique et inversement proportionnelle à la compliance des gros vaisseaux. En assumant que durant un cycle respiratoire la compliance des gros vaisseaux reste inchangée, ΔPP est donc directement proportionnelle à la variabilité du volume d'éjection systolique, elle-même indicative du degré de la précharge-dépendance bi-ventriculaire (Figure 3) et donc de la réponse au remplissage [10]. Plusieurs études, dans différentes situations cliniques (sepsis, syndrome de détresse respiratoire aigue, période péri-opératoire), ont confirmé l'excellente valeur prédictive de ΔPP pour prédire la réponse au remplissage chez des patients sous ventilation mécanique avec des volumes courants normaux, sans aucune activité respiratoire spontanée et en rythme sinusal [10, 33]. La majorité de ces études a de surcroît montré la supériorité de ΔPP pour prédire la réponse au remplissage par comparaison aux indices statiques. Dans ces études, la valeur seuil retrouvée de ΔPP est comparable et varie entre 10 et 15 % [8], fourchette qui constitue en quelque sorte une zone grise d'interprétation [34]. La valeur de ΔPP peut être obtenue manuellement en divisant la différence entre la

valeur maximale et la valeur minimale de la pression pulsée par la moyenne de ces deux valeurs. Il est à noter que plusieurs dispositifs de monitoring hémodynamique permettent le calcul automatique de ΔPP et son affichage à l'écran en temps réel. Des dispositifs de mesure non invasive de pression artérielle sont en cours de développement et/ou de commercialisation. A partir de ces dispositifs, des indices de variabilité de pression artérielle non invasive ont été évalués pour la prédiction de la réponse au remplissage. Les résultats publiés sont plutôt encourageants [19, 35].

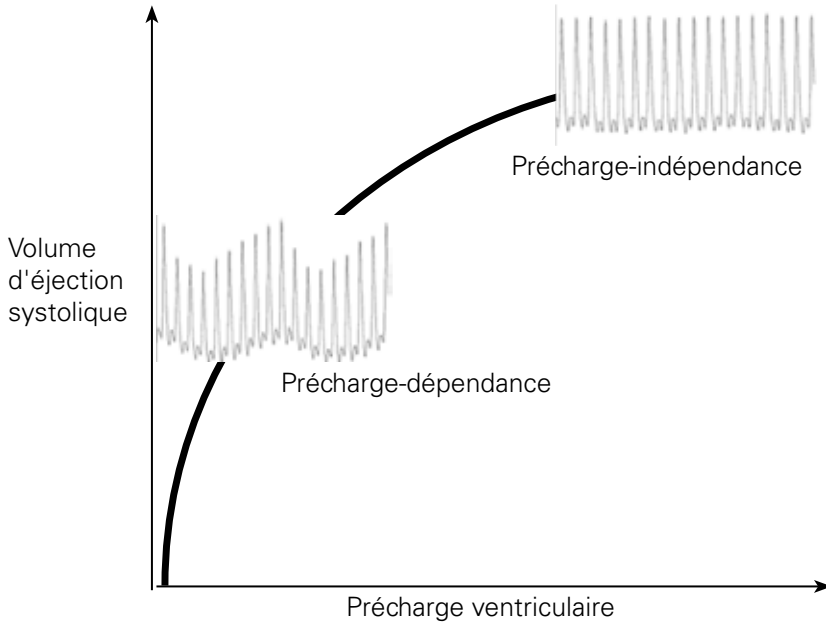


Figure 3 : la pression pulsée et la courbe de Frank-Starling.

Chez les patients sous ventilation mécanique sans aucune activité respiratoire spontanée, une variabilité élevée de la pression pulsée (ΔPP) suggère la présence d'une précharge-dépendance ou réserve de précharge (partie ascendante de la courbe de Frank-Starling). A contrario, une faible variabilité de la pression pulsée suggère une situation de précharge-indépendance (partie plate de la courbe Frank-Starling).

2.1.2.2. La variabilité du volume d'éjection systolique (VVE)

La variabilité du volume d'éjection systolique (VVE) estimée par l'analyse du contour de l'onde de pouls, peut aussi être automatiquement calculée et affichée soit en utilisant un moniteur PiCCO™ soit en utilisant un dispositif FloTrac/Vigileo™. Chez les patients sous ventilation mécanique la valeur de VVE affichée par ces moniteurs a été montrée être fiable pour identifier les répondeurs au remplissage vasculaire [14, 15, 29-33, 36]. La plupart des travaux publiés ont été réalisés dans le contexte opératoire ou péri-opératoire. Les valeurs seuil se situent aux alentours de 10 à 12 %.

Une méta-analyse publiée en 2009 a repris les résultats d'une trentaine d'études ayant testé soit ΔPP soit VVE pour la prédiction de la réponse au remplissage chez des patients ventilés [9]. Au total 685 patients ont été inclus. Globalement, ΔPP apparaissait significativement plus pertinent (avec une valeur

seuil moyenne de 12,5 %) que VVE pour prédire la réponse au remplissage [9]. Ces paramètres étaient tous deux supérieurs aux paramètres statiques comme la pression veineuse centrale et la surface télédiastolique du ventricule gauche mesurée à l'échocardiographie [9].

2.1.2.3. La variabilité de l'amplitude du signal pléthysmographique

La variabilité de l'amplitude du signal pléthysmographique obtenue par oxymétrie de pouls a été utilisée pour prédire la réponse au remplissage [21-24] partant de l'hypothèse que cette variation est un reflet de celle du volume d'éjection même si des limites méthodologiques et techniques doivent en rendre prudente son interprétation [37]. Un dispositif a été récemment commercialisé (Masimo Set™) qui permet de calculer et d'afficher automatiquement l'indice de variabilité respiratoire de l'amplitude du signal de pléthysmographie pulsée (PVI). Ce paramètre semble fiable pour prédire la réponse au remplissage chez les patients en peropératoire [27]. Cependant ce paramètre reste encore à valider chez les patients en réanimation, même si une étude récente en suggère l'intérêt [38]. Néanmoins, sa fiabilité en cas d'utilisation de vasopresseurs est fortement remise en cause [39].

2.1.2.4. La variabilité du flux sous-aortique

La variabilité du flux aortique déterminée par le Doppler œsophagien ou la variabilité du flux sous-aortique déterminée par l'échocardiographie-Doppler ont aussi été démontrées avoir une bonne valeur prédictive pour prédire la réponse au remplissage avec des valeurs seuils de 18 % pour la variabilité du débit sanguin aortique déterminée par le doppler œsophagien de 18 % [40] et de 12 % pour le pic de vélocité du flux sous-aortique [4].

2.1.3. LES INDICES REFLÉTANT LA VARIABILITÉ RESPIRATOIRE INDUITE PAR LA VENTILATION MÉCANIQUE MAIS NON DÉRIVÉE DU VOLUME D'ÉJECTION SYSTOLIQUE

L'analyse de la variabilité au cours de la ventilation mécanique du diamètre de la veine cave inférieure ou de la veine cave supérieure a été aussi montrée utile pour prédire la réponse au remplissage vasculaire. Chez des patients septiques, un seuil de « collapsibilité » de la veine cave supérieure [(diamètre maximal-diamètre minimal)/diamètre maximal] de 36 % [12], un seuil de « distensibilité » de la veine cave inférieure de [(diamètre maximal-diamètre minimal)/diamètre minimal] de 18 % [41] et un seuil de variabilité de la veine cave inférieure [(diamètre maximal-diamètre minimal)/diamètre moyen] de 12 % [42] permettent de prédire de façon fiable la réponse au remplissage.

2.1.4. BÉNÉFICE CLINIQUE DES INDICES DE VARIABILITÉ

Les indices de variabilité ont un intérêt certain pour les cliniciens quant à l'évaluation de la réponse au remplissage chez les patients sous ventilation mécanique, en particulier lorsque ces indices sont fournis par des moniteurs permettant leur calcul automatique et leur affichage en temps réel. Cependant, la question du bénéfice réel pour le patient se pose encore. Lopes et al. ont tenté de répondre à cette question dans une étude randomisée chez des patients soumis à une chirurgie à haut risque [43]. Ces auteurs ont comparé un groupe de 16 patients qui recevaient un remplissage vasculaire selon les habitudes du service (groupe « contrôle ») à un deuxième groupe (groupe « intervention ») de 17 patients qui recevaient un remplissage vasculaire à chaque fois que ΔPP était

> 10 %, remplissage interrompu quand la valeur de ΔPP repassait au-dessous de la valeur seuil [43]. De façon intéressante, le groupe « intervention » a reçu une quantité supérieure de solutés de remplissage à celle reçue par le groupe « contrôle » ($4,618 \pm 1,557$ vs. $1,694 \pm 705$ ml) [43]. La durée de la ventilation mécanique, la durée de séjour en réanimation ainsi que la durée d'hospitalisation ont été plus courtes dans le groupe « intervention » par rapport au groupe « contrôle » [43]. De toute évidence, ces résultats restent à confirmer par des études de plus grande échelle.

2.1.5. LIMITES D'UTILISATION DES INDICES DE VARIABILITÉ

Une première limite est évidemment le maintien d'une respiration spontanée qui rend caduque toute interprétation de ces indices comme cela a été confirmé dans des études cliniques [17, 44, 45]. Mineure chez les patients anesthésiés au bloc opératoire, cette limite est importante chez les patients de réanimation qui sont souvent ventilés avec des modes ventilatoires autorisant une respiration spontanée.

Une deuxième limite est la présence d'un rythme cardiaque irrégulier en particulier d'une arythmie complète par fibrillation auriculaire [17].

Une troisième limite est l'utilisation de volumes courants bas ($< 7-8$ ml.kg⁻¹). Dans ces situations fréquentes en réanimation (syndrome de détresse respiratoire aiguë) mais beaucoup moins au bloc opératoire, la variation respiratoire de la pression intrathoracique n'est pas suffisante pour générer une variation respiratoire de volume d'éjection même en cas d'hypovolémie patente et a fortiori de précharge-dépendance. Il a été montré que dans ce cas, la valeur prédictive de ces indices est moins forte et la valeur seuil est plus basse [13].

Une quatrième limite est l'existence d'une compliance pulmonaire réduite et ce même en cas de volume courant peu abaissé [46]. Dans cette situation, la transmission réduite de la pression alvéolaire à l'intérieur du thorax peut en effet être responsable d'une variation respiratoire faible de la pression intrathoracique, insuffisante pour générer une variation respiratoire significative du volume d'éjection.

Une cinquième limite est le contexte de chirurgie à thorax ouvert [47] puisque dans cette situation la variation respiratoire de la pression intrathoracique est annulée.

Une sixième limite est l'existence d'une fréquence respiratoire trop élevée par rapport à la fréquence cardiaque. Il a été montré qu'en cas de rapport fréquence cardiaque/fréquence respiratoire < 3.6 , ΔPP peut être très faible même en cas de précharge-dépendance [48].

Une septième limite possible est la présence d'une dysfonction ventriculaire droite, où des faux positifs de ΔPP ont été rapportés peut-être en rapport avec une « post-charge dépendance » du ventricule droit dans cette situation [49]. Cependant, cette limite nous semble être plus théorique que réelle en pratique clinique.

Une huitième limite enfin est l'existence d'une hyperpression abdominale. Dans cette situation, la variabilité du volume d'éjection ou de ses dérivés reste indicative d'une précharge-dépendance mais les valeurs seuil sont plus élevées que dans les conditions normales [50].

Enfin, il faut insister sur le fait que la présence d'une réserve de précharge est un phénomène normal dans la mesure où le cœur d'un sujet normal travaille physiologiquement sur la partie pentue de la relation de Frank-Starling. Ainsi, mesurer une variabilité respiratoire forte du volume d'éjection ne doit pas faire réaliser systématiquement un remplissage vasculaire. Celui-ci ne devra être décidé que sur la présence de critères cliniques et biologiques d'hypoperfusion périphérique et/ou de dysfonctions d'organes.

2.2. MANŒUVRES VISANT À PROVOQUER UNE ÉLÉVATION TRANSITOIRE DE LA PRÉCHARGE

2.2.1. LE LEVER DE JAMBE PASSIF

En surélevant les jambes par rapport à la position horizontale, une quantité de sang veineux est transférée selon la loi de la gravité, depuis les membres inférieurs vers le compartiment intrathoracique (Figure 4). Une augmentation de la pression veineuse centrale et une augmentation de la pression artérielle pulmonaire d'occlusion [51] sont observées confirmant le fait que cette quantité de sang transférée est suffisante pour augmenter la précharge du cœur gauche. Au-delà de sa simplicité, le lever de jambes passif entraîne un transfert transitoire de sang qui s'annule en abaissant les jambes n'entraînant par conséquent aucun des effets nocifs potentiels d'un remplissage vasculaire classique. C'est ainsi qu'on peut considérer cette manœuvre comme une « auto-transfusion » transitoire [52, 53].

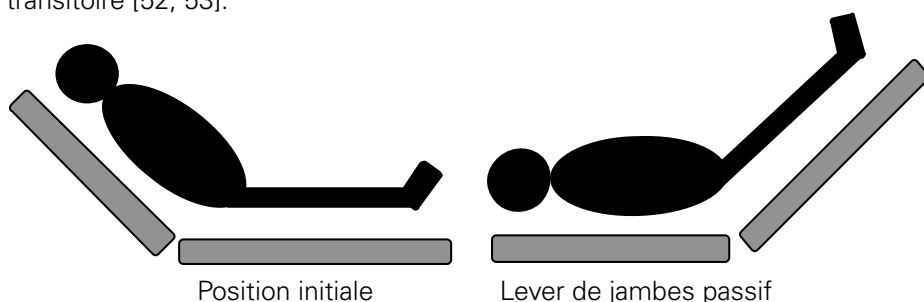


Figure 4 : le lever de jambes passif.

Le test de lever de jambes passif consiste à tester les effets hémodynamiques d'une surélévation des jambes de 45°. Le lever de jambes passif peut être réalisé simplement par le transfert du patient depuis la position proclive à 45° jusqu'à une position dans laquelle le tronc se trouve à l'horizontale et les membres inférieurs surélevés de 45°. Ce transfert est facilement réalisé par une bascule automatique du lit.

Le concept du lever de jambes passif pour tester la réponse au remplissage a émergé d'une étude qui avait inclus des patients sous ventilation mécanique pour lesquels a été observée une corrélation entre l'augmentation du volume d'éjection systolique et l'augmentation de la pression artérielle pulsée lors du lever de jambes passif [51]. La capacité du test de lever de jambes à détecter la réponse au remplissage a été largement démontrée par plusieurs études chez les patients de réanimation [5, 17, 18, 54-60], même chez ceux en arythmie ou en ventilation spontanée, conditions où ΔPP et VVE perdent leur fiabilité [17]. Il est important de signaler que l'effet maximal du lever de jambes passif apparaît lors de la première minute [17] d'où l'importance d'utiliser des méthodes de

mesures qui permettent une détection rapide et en temps réel de la variation du débit cardiaque et/ou du volume d'éjection systolique [52]. Ainsi, la réponse du flux sanguin aortique mesuré par le doppler œsophagien dans l'aorte thoracique descendante [17, 18], de l'intégrale temps-vitesse, du flux sous-aortique mesuré par l'échographie transthoracique [5, 54] ou du flux artériel fémoral mesuré par le doppler artériel [58] s'avèrent performants pour tester la réponse au remplissage au moyen du lever de jambes passif. D'autres dispositifs de monitoring battement à battement du débit cardiaque tel que le PiCCO™ ou le FloTrac/Vigileo™ peuvent être utiles dans ce contexte [56, 58]. Une récente méta-analyse qui a concerné huit études a confirmé l'excellente valeur prédictive du lever de jambes pour tester la réponse au remplissage avec une aire sous la courbe de 0,95 [60]. Le lever de jambes passif peut être réalisé simplement par le transfert du patient depuis la position proclive à 45° jusqu'à une position dans laquelle le tronc se trouve à l'horizontale et les membres inférieurs surélevés de 45°, ce transfert étant facilement réalisé par un mouvement automatique du lit [53]. Débuter cette manœuvre à partir d'une position horizontale peut induire un transfert d'une quantité insuffisante de sang (provenant seulement des membres inférieurs) pour induire une élévation du débit cardiaque [53]. A contrario, débuter la manœuvre à partir d'une position demi-assise permet un transfert d'une quantité suffisante de sang (provenant des membres inférieurs et de l'abdomen) pour induire une augmentation de la précharge cardiaque indispensable à la fiabilité de ce test pour l'évaluation de la réponse au remplissage [61].

2.2.2. LE TEST D'OCCLUSION TÉLÉ-EXPIRATOIRE (FIGURE 5)

Au cours de la ventilation mécanique, chaque insufflation induit une augmentation de la pression intrathoracique qui réduit le retour veineux systémique. Ainsi, il peut être fait l'hypothèse qu'en interrompant l'insufflation mécanique par une occlusion télé-expiratoire, la précharge cardiaque augmentera suffisamment pour permettre l'utilisation de ce test afin de prédire la réponse au remplissage [56]. Nous avons testé cette hypothèse, dans une étude ayant inclus 34 patients sous ventilation mécanique, y compris ceux présentant une arythmie cardiaque ou une activité respiratoire spontanée n'empêchant pas de réaliser une occlusion télé-expiratoire des voies aériennes de 15 secondes. Les patients qui avaient augmenté de plus de 5 % leur pression pulsée ou leur débit cardiaque (déterminé en continu par l'analyse de l'onde de pouls) au cours de ce test étaient le plus souvent ceux qui allaient répondre à un remplissage ultérieur et vice versa [56]. Ce test d'occlusion télé-expiratoire est simple à réaliser en pratique clinique au lit du malade et reste valide chez les patients ventilés avec des petits volumes courants, en arythmie cardiaque ou présentant un certain degré d'activité respiratoire spontanée [56], et ce même en cas de compliance pulmonaire réduite [46], toutes conditions où les indices de variabilité perdent de leur fiabilité [62].

CONCLUSION

Chez les patients de réanimation présentant une instabilité hémodynamique, prédire leur réponse au remplissage est important pour éviter un remplissage excessif pouvant se compliquer d'œdème aigu du poumon. Chez les patients ventilés et adaptés à leur respirateur, l'amplitude de la variabilité du volume d'éjection systolique ou de ses dérivés a été démontrée être la meilleure option pour tester la réponse au remplissage sauf en cas de volume courant trop bas

ou de compliance pulmonaire réduite. Dans ces dernières conditions comme en cas de ventilation spontanée ou d'arythmie, des tests dynamiques tels que de lever de jambes passif ou l'occlusion télé-expiratoire représentent des options parfaitement valides.

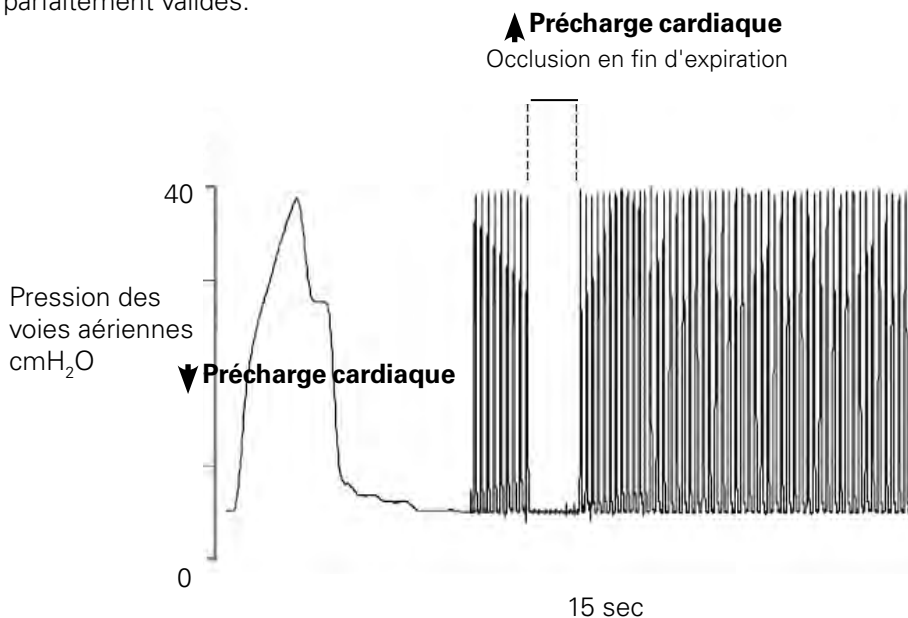


Figure 5 : le test d'occlusion télé-expiratoire :

C'est un test qui consiste en une interruption brève (15 secondes) de la ventilation mécanique en fin d'expiration. Ceci va supprimer l'effet cyclique de la baisse du débit cardiaque à chaque insufflation. Par conséquent cette manœuvre brève et simple peut augmenter le débit cardiaque et ainsi servir à tester la réponse au remplissage des patients.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Michard F, Teboul JL. Predicting fluid responsiveness in ICU patients: a critical analysis of the evidence. *Chest* 2002;121:2000-8
- [2] Teboul JL et le groupe d'experts de la SRLF. Indicateurs du remplissage vasculaire au cours de l'insuffisance circulatoire. *Ann Fr Anesth Reanim* 2005;24:568-76
- [3] Osman D, Ridel C, Ray P, Monnet X, Anguel N, Richard C, Teboul JL. Cardiac filling pressures are not appropriate to predict hemodynamic response to volume challenge. *Crit Care Med* 2007;35:64-8
- [4] Feissel M, Michard F, Mangin I, Ruyer O, Faller JP, Teboul JL. Respiratory changes in aortic blood velocity as an indicator of fluid responsiveness in ventilated patients with septic shock. *Chest* 2001;119:867-73
- [5] Lamia B, Ochagavia A, Monnet X, Chemla D, Richard C, Teboul JL. Echocardiographic prediction of volume responsiveness in critically ill patients with spontaneously breathing activity. *Intensive Care Med* 2007;33:1125-32.
- [6] Monnet X, Teboul JL. Invasive measures of left ventricular preload. *Curr Opin Crit Care* 2006;12:235-40
- [7] Monnet X, Teboul JL. Volume responsiveness. *Curr Opin Crit Care* 2007;13:549-53
- [8] Michard F, Teboul JL. Using heart-lung interactions to assess fluid responsiveness during mechanical ventilation. *Crit Care* 2000;4:282-9

- [9] Marik PE, Cavallazzi R, Vasu T, Irani A. dynamic changes in arterial waveform derived variables and fluid responsiveness in mechanically ventilated patients: a systematic review of the literature. *Crit Care Med* 2009;37:2642-7.
- [10] Michard F, Boussat S, Chemla D, Anguel N, Mercat A, Lecarpentier Y, Richard C, Pinsky MR, Teboul JL. Relation between respiratory changes in arterial pulse pressure and fluid responsiveness in septic patients with acute circulatory failure. *Am J Respir Crit Care Med* 2000;162:134-8.
- [11] Kramer A, Zygun D, Hawes H, Easton P, Ferland A. Pulse pressure variation predicts fluid responsiveness following coronary artery bypass surgery. *Chest* 2004;126:1563-8.
- [12] Vieillard-Baron A, Chergui K, Rabiller A, Peyrouset O, Page B, Beauchet A, Jardin F. Superior vena caval collapsibility as a gauge of volume status in ventilated septic patients. *Intensive Care Med* 2004;30:1734-9.
- [13] De Backer D, Heenen S, Piagnerelli M, Koch M, Vincent JL. Pulse pressure variations to predict fluid responsiveness: influence of tidal volume. *Intensive Care Med* 2005;31:517-23.
- [14] Hofer CK, Muller SM, Furrer L, Klaghofer R, Genoni M, Zollinger A. Stroke volume and pulse pressure variation for prediction of fluid responsiveness in patients undergoing off-pump coronary artery bypass grafting. *Chest* 2005;128:848-54.
- [15] Preisman S, Kogan S, Berkenstadt H, Perel A. Predicting fluid responsiveness in patients undergoing cardiac surgery: functional haemodynamic parameters including the Respiratory Systolic Variation Test and static preload indicators. *Br J Anaesth* 2005;95:746-55.
- [16] Feissel M, Badie J, Merlani PG, Faller JP, Bendjelid K. Pre-ejection period variations predict the fluid responsiveness of septic ventilated patients. *Crit Care Med* 2005;33:2534-9.
- [17] Monnet X, Rienzo M, Osman D, Anguel N, Richard C, Pinsky MR, Teboul JL. Passive leg raising predicts fluid responsiveness in the critically ill. *Crit Care Med* 2006;34:1402-7.
- [18] Lafanechere A, Pene F, Goulenok C, Delahaye A, Mallet V, Choukroun G, Chiche JD, Mira JP, Cariou A. Changes in aortic blood flow induced by passive leg raising predict fluid responsiveness in critically ill patients. *Crit Care* 2006;10:R132.
- [19] Solus-Biguenet H, Fleyfel M, Tavernier B, Kipnis E, Onimus J, Robin E, Lebuffe G, Decoene C, Pruvot FR, Vallet B. Non-invasive prediction of fluid responsiveness during major hepatic surgery. *Br J Anaesth* 2006;97:808-16.
- [20] Charron C, Fessenmeyer C, Cosson C, Mazoit JX, Hebert JL, Benhamou D, Edouard AR. The influence of tidal volume on the dynamic variables of fluid responsiveness in critically ill patients. *Anesth Analg* 2006;102:1511-7.
- [21] Natalini G, Rosano A, Taranto M, Faggian B, Vittorielli E, Bernardini A. Arterial versus plethysmographic dynamic indices to test responsiveness for testing fluid administration in hypotensive patients: a clinical trial. *Anesth Analg* 2006;103:1478-84.
- [22] Feissel M, Teboul JL, Merlani P, Badie J, Faller JP, Bendjelid K. Plethysmographic dynamic indices predict fluid responsiveness in septic ventilated patients. *Intensive Care Med* 2007;33:993-9.
- [23] Cannesson M, Attof Y, Rosamel P, Desebbe O, Joseph P, Metton O, Bastien O, Lehot JJ. Respiratory variations in pulse oximetry plethysmographic waveform amplitude to predict fluid responsiveness in the operating room. *Anesthesiology* 2007;106:1105-11.
- [24] Wyffels PA, Durnez PJ, Helderweirt J, Stockman WM, De Kegel D. Ventilation-induced plethysmographic variations predict fluid responsiveness in ventilated postoperative cardiac surgery patients. *Anesth Analg* 2007;105:448-52.
- [25] Huang CC, Fu JY, Hu HC, Kao KC, Chen NH, Hsieh MJ, Tsai YH. Prediction of fluid responsiveness in acute respiratory distress syndrome patients ventilated with low tidal volume and high positive end-expiratory pressure. *Crit Care Med* 2008;36:2810-6.
- [26] Auler JO Jr, Galas F, Hajjar L, Santos L, Carvalho T, Michard F. Online monitoring of pulse pressure variation to guide fluid therapy after cardiac surgery. *Anesth Analg* 2008;106:1201-6.
- [27] Cannesson M, Desebbe O, Rosamel P, Delannoy B, Robin J, Bastien O, Lehot JJ. 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* 2008;101:200-6.
- [28] Cannesson M, Sliker J, Desebbe O, Bauer C, Chiari P, Hénaine R, Lehot JJ. The ability of a novel algorithm for automatic estimation of the respiratory variations in arterial pulse pressure to monitor fluid responsiveness in the operating room. *Anesth Analg* 2008;106:1195-200.

- [29] Biais M, Nouette-Gaulain K, Cottencaeu V, Revel P, Sztark F. Uncalibrated pulse contour-derived stroke volume variation predicts fluid responsiveness in mechanically ventilated patients undergoing liver transplantation. *Br J Anaesth* 2008;101:761-8
- [30] Derichard A, Robin E, Tavernier B, Costecalde M, Fleyfel M, Onimus J, Lebuffe G, Chambon JP, Vallet B. Automated pulse pressure and stroke volume variations from radial artery: evaluation during major abdominal surgery. *Br J Anaesth* 2009;103:678-84
- [31] Cannesson M, Musard H, Desebbe O, Boucau C, Simon R, Hénaïne R, Lehot JJ. The ability of stroke volume variations obtained with Vigileo/FloTrac system to monitor fluid responsiveness in mechanically ventilated patients. *Anesth Analg* 2009;108:513-7
- [32] Biais M, Nouette-Gaulain K, Rouillet S, Quinart A, Revel P, Sztark F. A comparison of stroke volume variation measured by Vigileo/FloTrac system and aortic Doppler echocardiography. *Anesth Analg* 2009;109:466-9
- [33] Biais M, Bernard O, Ha JC, Degryse C, Sztark F. Abilities of pulse pressure variations and stroke volume variations to predict fluid responsiveness in prone position during scoliosis surgery. *Br J Anaesth* 2010;104:407-13
- [34] Cannesson M, Le Manach Y, Hofer CK, Goarin JP, Lehot JJ, Vallet B, Tavernier B. Assessing the diagnostic accuracy of pulse pressure variations for the prediction of fluid responsiveness: a "gray zone" approach. *Anesthesiology* 2011;115:231-41
- [35] Monnet X, Dres M, Ferré A, Le Teuff G, Jozwiak M, Bleibtreu A, Le Deley MC, Chemla D, Richard C, Teboul JL. Prediction of fluid responsiveness by a continuous non-invasive assessment of arterial pressure in critically ill patients: Comparison with four other dynamic indices. *Br J Anesth* 2012 (in press)
- [36] Reuter DA, Felbinger TW, Schmidt C, Kilger E, Goedje O, Lamm P, Goetz AE. 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
- [37] Monnet X, Lamia B, Teboul JL. Pulse oximeter as a sensor of fluid responsiveness: do we have our finger on the best solution? *Crit Care* 2005;9:429-30
- [38] Loupec T, Nanadoumgar H, Frasca D, Petitpas F, Laksiri L, Baudouin D, Debaene B, Dahyot-Fizelier C, Mimoz O. Pleth variability index predicts fluid responsiveness in critically ill patients. *Crit Care Med* 2011;39:294-9
- [39] Biais M, Cottencaeu V, Petit L, Masson F, Cochard JF, Sztark F. Impact of norepinephrine on the relationship between pleth variability index and pulse pressure variations in ICU adult patients. *Crit Care* 2011;15:R168
- [40] Monnet X, Rienzo M, Osman D, Anguel N, Richard C, Pinsky MR, Teboul JL. Esophageal Doppler monitoring predicts fluid responsiveness in critically ill ventilated patients. *Intensive Care Med* 2005;31:1195-201
- [41] Barbier C, Loubières Y, Schmit C, Hayon J, Ricôme JL, Jardin F, Vieillard-Baron A. Respiratory changes in inferior vena cava diameter are helpful in predicting fluid responsiveness in ventilated septic patients. *Intensive Care Med* 2004;30:1740-6
- [42] Feissel M, Michard F, Faller JP, Teboul JL. The respiratory variation in inferior vena cava diameter as a guide to fluid therapy. *Intensive Care Med* 2004;30:1834-7
- [43] Lopes MR, Oliveira MA, Pereira VO, Lemos IP, Auler JO Jr, Michard F. Goal-directed fluid management based on pulse pressure variation monitoring during high-risk surgery: a pilot randomized controlled trial. *Crit Care* 2007;11:R100
- [44] Heenen S, De Backer D, Vincent JL. How can the response to volume expansion in patients with spontaneous respiratory movements be predicted? *Crit Care* 2006;10:R102
- [45] Perner A, Faber T. Stroke volume variation does not predict fluid responsiveness in patients with septic shock on pressure support ventilation. *Acta Anaesthesiol Scand* 2006;50:1068-73
- [46] Monnet X, Bleibtreu A, Ferré A, Dres M, Gharbi R, Richard C, Teboul JL. Passive leg-raising and end-expiratory occlusion tests perform better than pulse pressure variation in patients with low respiratory system compliance. *Crit Care Med* 2012;40:152-7
- [47] de Waal EE, Rex S, Kruitwagen CL, Kalkman CJ, Buhre WF. Dynamic preload indicators fail to predict fluid responsiveness in open-chest conditions. *Crit Care Med* 2009;37:510-5
- [48] De Backer D, Taccone FS, Holsten R, Ibrahim F, Vincent JL. Influence of respiratory rate on stroke volume variation in mechanically ventilated patients. *Anesthesiology* 2009;110:1092-7

- [49] Mahjoub Y, Pila C, Friggeri A, Zogheib E, Lobjoie E, Tinturier F, Galy C, Slama M, Dupont H. Assessing fluid responsiveness in critically ill patients: False-positive pulse pressure variation is detected by Doppler echocardiographic evaluation of the right ventricle. *Crit Care Med*. 2009;37:2570-5
- [50] Jacques D, Bendjelid K, Duperret S, Colling J, Piriou V, Viale JP. Pulse pressure variation and stroke volume variation during increased intra-abdominal pressure: an experimental study. *Crit Care* 2011;15:R33
- [51] Boulain T, Achard JM, Teboul JL, Richard C, Perrotin D, Ginies G. Changes in BP induced by passive leg raising predict response to fluid loading in critically ill patients. *Chest* 2002;121:1245-52
- [52] Teboul JL, Monnet X. Prediction of volume responsiveness in critically ill patients with spontaneous breathing activity. *Curr Opin Crit Care* 2008;14:334-9
- [53] Monnet X, Teboul JL. Passive leg raising. *Intensive Care Med* 2008;34:659-63
- [54] Maizel J, Airapetian N, Lorne E, Tribouilloy C, Massy Z, Slama M. Diagnosis of central hypovolemia by using passive leg raising. *Intensive Care Med* 2007;33:1133-8.
- [55] Biais M, Vidil L, Sarabay P, Cottenceau V, Revel P, Sztark F. Changes in stroke volume induced by passive leg raising in spontaneously breathing patients: comparison between echocardiography and Vigileo/FloTrac device. *Crit Care* 2009;13:R195
- [56] Monnet X, Osman D, Ridel C, Lamia B, Richard C, Teboul JL. Predicting volume responsiveness by using the end-expiratory occlusion in mechanically ventilated ICU patients. *Crit Care Med* 2009;37:951-6
- [57] Thiel SW, Kollef MH, Isakow W. Non-invasive stroke volume measurement and passive leg raising predict volume responsiveness in medical ICU patients: an observational cohort study. *Crit Care* 2009;13:R111
- [58] Préau S, Saulnier F, Dewavrin F, Durocher A, Chagnon JL. Passive leg raising is predictive of fluid responsiveness in spontaneously breathing patients with severe sepsis or acute pancreatitis. *Crit Care Med* 2010;38:819-25
- [59] Cavallaro F, Sandroni C, Marano C, La Torre G, Mannocci A, De Waure C, Bello G, Maviglia R, Antonelli M. Diagnostic accuracy of passive leg raising for prediction of fluid responsiveness in adults: systematic review and meta-analysis of clinical studies. *Intensive Care Med* 2010;36:1475-83
- [60] Jabot J, Teboul JL, Richard C, Monnet X. Passive leg raising for predicting fluid responsiveness: importance of the postural change. *Intensive Care Med* 2009;35:85-90
- [61] Monnet X, Teboul JL. Passive leg raising: keep it easy! *Intensive Care Med* 2010;36:1445
- [62] Marik PE, Monnet X, Teboul JL. Hemodynamic parameters to guide fluid therapy. *Ann Intensive Care* 2011;1:1