

Quelle ventilation périopératoire ?

Samir JABER¹, Audrey DE JONG¹, Daniel VERZILLI¹, Emmanuel FUTIER²

1. *Department of Anesthesiology and Critical Care Medicine B (DAR B), Saint-Eloi Hospital, University Teaching Hospital of Montpellier, 80 avenue Augustin Fliche, INSERM U1046, CNRS UMR 9214, Montpellier 34000, France*

Email : s-jaber@chu-montpellier.fr

2. *Anesthésie-Réanimation, Pôle Médecine Périopératoire (MPO), Hôpital Estaing, CHU de Clermont-Ferrand, 1 place Lucie Aubrac 63003 Clermont-Ferrand cedex 1*

Email : efutier@chu-clermontferrand.fr

POINTS ESSENTIELS

- Le ventilateur d'anesthésie ou de réanimation délivre une assistance soit en volume (mode volumétrique) soit en pression (mode barométrique). Donc; deux principales modalités de ventilation existent.
- Il n'existe aucune supériorité d'un mode ventilatoire par rapport à l'autre quand ils sont délivrés avec un niveau d'assistance équivalent.
- Le volume contrôlé est le mode le plus recommandé pour sa simplicité chez le patient sédaté-curarisé aussi bien au bloc opératoire qu'en réanimation.
- Si l'on utilise un mode en volume ; il faut surveiller les pressions des voies aériennes (pic, moyenne, plateau) ; et si l'on utilise un mode en pression, il faut surveiller la spirométrie (volume et ventilation minute) et la capnographie.
- Le volume courant (VT) doit être réglé en fonction de la taille du patient (i.e, taille du poumon) et plus précisément en fonction du poids idéal théorique (PIT) et non le poids réel.

- L'utilisation d'un volume courant réduit (<10 ml/kg PIT) ne peut être dissociée de l'utilisation concomitante d'un niveau suffisant de pression de fin d'expiration positive (PEP).
- La "ventilation protectrice" prophylactique est l'association d'un petit volume courant ($6 < VT < 8$ ml/kg PIT), d'une PEP ($5 < PEP < 10$ cmH₂O) et de manœuvres de recrutements.
- L'aide inspiratoire est le mode en pression le plus utilisé au cours du sevrage en réanimation car le plus physiologique. Il est singulier car c'est le seul mode conventionnel dans lequel le patient choisit la durée de son temps inspiratoire, en plus de sa fréquence respiratoire et son débit inspiratoire. Il peut être utilisé au bloc opératoire au cours de sédation légère.

1. Introduction

La ventilation mécanique (invasive et non-invasive) est le support d'organe le plus utilisé au bloc opératoire et en réanimation. Plus de 230 millions d'interventions chirurgicales majeures sont pratiquées chaque année dans le monde sous anesthésie générale (1). Les complications respiratoires postopératoires, en particulier l'infection broncho-pulmonaire et/ou l'insuffisance respiratoire aiguë, augmentent la durée d'hospitalisation et conditionnent le pronostic à court et moyen termes du patient opéré (2). Il a été rapporté que 5 à 10% de tous les patients opérés, et que 9 à 40% de ceux ayant bénéficié d'une chirurgie abdominale, développent au moins une complication respiratoire postopératoire (3, 4). Une étude du Massachusetts General Hospital de Boston a montré sur une cohorte de 29924 patients que l'apparition d'une complication respiratoire nécessitant une ré-intubation dans les 3 jours postopératoires était responsable d'une mortalité de 16% en comparaison à une mortalité de 0,3% chez les patients n'ayant pas développé d'insuffisance respiratoire aiguë (5).

La ventilation mécanique a longtemps été considérée comme une simple modalité de suppléance des effets respiratoires centraux liés aux agents anesthésiques utilisés pendant la période opératoire et d'assurer simplement les échanges gazeux. Pourtant, certaines données expérimentales et cliniques ont montré que la ventilation mécanique en pression positive (volume ou pression)

pouvait être délétère pour le système respiratoire et être à l'origine de lésions pulmonaires, y compris chez des patients aux poumons antérieurement sains. La ventilation mécanique lors de la période périopératoire est un continuum (6) allant de la préoxygénation du patient, avant intubation trachéale (7), jusqu'à son extubation en fin d'intervention chirurgicale. Comme nous le verrons, de nouvelles données plaident pour l'utilisation au bloc opératoire, comme ceci est désormais réalisé en réanimation, d'une stratégie prophylactique de ventilation protectrice afin de limiter le risque de complications pulmonaires postopératoires (6) (**Figure 1**).

2. Quelles modalités ventilatoires: mode en volume ou en pression?

Les études ayant comparé les modes dits "Ventilation en Volume Contrôlé" (VVC) et "Ventilation en Pression Contrôlée" (VPC) rapportent des résultats controversés (8). Cela s'explique en partie par les critères de jugements choisis. L'essentiel des travaux ayant comparé les deux modes (VVC vs VPC) a été réalisé chez le patient obèse. Il n'existe pas de données en faveur de la supériorité de l'une ou de l'autre de ces modalités ventilatoires au bloc opératoire quand l'assistance délivrée aux alvéoles est équivalente (8). Il faut comprendre que, dans la mesure où l'on délivre un volume courant (VT) équivalent (c'est-à-dire un même niveau d'assistance), la pression alvéolaire, estimée par la pression de plateau (mesurée en condition quasi statique), est la même (**Figure 2**). Seul le débit diffère entre les modes, avec un débit décélérant en mode barométrique et un débit carré en mode volumétrique (**Tableau 1**). Cette forme de débit explique les différences de pression observées sur le ventilateur (**Figure 2**). Toutefois, il convient de retenir que (1) la pression de crête, qui est en fait le reflet des facteurs résistifs (comme la sonde d'intubation) est différente de la pression alvéolaire et (2) que pour un même niveau d'assistance ventilatoire, la pression alvéolaire sera identique en VVC et en VPC (Figure 2). Il est en revanche très important de savoir quels éléments surveiller et quelles alarmes régler en fonction du mode utilisé (Tableau 1). Le choix dépendra essentiellement des habitudes de chaque équipe.

Cependant, lorsque l'anesthésie est réalisée sans intubation trachéale et que la ventilation est délivrée à travers un masque laryngé (fuites "quasi-obligatoires"), la ventilation en pression contrôlée ou en pression assistée (=Aide Inspiratoire)(9) peut être plus intéressante que la ventilation en volume contrôlé. En effet, la pression de

crête générée par le volume courant avec un débit carré peut être plus souvent à l'origine de fuites majeures.

3. Quel volume courant : le plus petit possible ?

Depuis la publication princeps de Bendixen et al (10) de 1963, l'utilisation de hauts VT, c'est à dire un VT de 10 à 15 ml/kg, a été proposée dans de nombreux ouvrages de référence pour limiter le risque d'hypoxémie et la formation d'atélectasies lors d'une anesthésie générale (11). Plusieurs travaux ont montré que, chez des patients de réanimation présentant un syndrome de détresse respiratoire aigu (SDRA), l'utilisation d'une stratégie de ventilation dite « protectrice », en référence à l'utilisation de niveaux de VT réduits (de l'ordre de 6 à 8 ml/kg de poids idéal théorique), était associée à une amélioration du pronostic des patients et une réduction de la mortalité (12). Après avoir été largement débattu, le réglage du niveau de VT fait désormais l'objet d'un consensus tacite en réanimation et l'utilisation d'un VT inférieur à 10 ml/kg de poids idéal théorique (PIT) est désormais fortement recommandée (13). Le VT doit être réglé en fonction de la taille du patient (i.e, taille du poumon) et plus précisément en fonction du PIT évalué (approximativement) par la formule suivante chez l'homme : $PIT (kg) = Taille (cm) - 100$ et la formule suivante chez la femme $PIT (kg) = Taille (cm) - 110$.

Des données récentes issues de travaux expérimentaux et d'études observationnelles, sont également en faveur d'un possible effet délétère de l'utilisation de hauts VT et de la possibilité de lésions pulmonaires induites par la ventilation mécanique (*ventilator-induced lung injury* ou VILI) lors de courtes périodes d'exposition à une ventilation agressive chez des patients ayant des poumons antérieurement sains (14). Il a été montré que des VT trop importants peuvent générer des phénomènes d'étirement alvéolaire (lésions dites de volo-trauma) (15), et également libérer des médiateurs pro-inflammatoires et procoagulants alvéolaires et systémiques (16). L'analyse rétrospective d'une cohorte de 447 patients ayant des poumons sains à leur admission en réanimation a montré que l'utilisation d'un $VT > 12$ ml/kg de PIT était statistiquement associée à une augmentation du risque de survenue de lésions pulmonaires (*acute lung injury* (ALI)) (17). Dans un travail récent réalisé sur un collectif de 3434 patients de chirurgie cardiaque, Lellouche et al. (18) ont montré que l'utilisation d'un $VT \geq 10$ ml/kg de PIT était un facteur de risque indépendant de défaillances multiviscérales en postopératoire et d'augmentation de

la durée d'hospitalisation. Enfin, une méta-analyse synthétisant les données de plus de 3000 patients issus de 20 études randomisées contrôlées (incluant une proportion importante de patients chirurgicaux) a montré qu'une réduction du VT était associée à une diminution du risque de complications pulmonaires et de mortalité (14).

Il est important de considérer que le type d'intervention chirurgicale, au même titre que le risque préopératoire du patient, peuvent conditionner la sévérité de l'atteinte pulmonaire. Il a été démontré qu'au cours d'une chirurgie majeure, des dommages inflammatoires et ischémiques peuvent exercer des effets synergiques (*multiple-hit concept*) avec une modalité délétère de ventilation mécanique et tout particulièrement si l'utilisation d'une ventilation agressive (VT élevé) précède le traumatisme (19).

Il est essentiel de comprendre que l'utilisation d'un VT réduit ne peut être dissociée de l'utilisation concomitante d'un niveau suffisant de pression de fin d'expiration positive (PEP). En d'autres termes, réduire le VT de façon isolée ne correspond pas à faire de la "ventilation protectrice proprement dit" car il faut y associer systématiquement une PEP ce qui permet d'éviter la fermeture des alvéoles en fin d'expiration et de maintenir un niveau de pression moyen dans les alvéoles suffisants pour assurer les échanges gazeux. Réduire le VT seul en ne mettant pas de PEP (=ZEP soit PEP= 0 cmH₂O) peut avoir des effets délétères en particulier en induisant ou en majorant des atélectasies. Il faut d'ailleurs rappeler qu'aucun travail à ce jour n'a démontré un bénéfice clinique de l'utilisation d'une stratégie de ventilation basée sur une réduction du VT sans PEP. A contrario, une ventilation à bas niveau de VT sans PEP (ou avec un trop faible niveau de PEP, c'est à dire <5 cmH₂O) est responsable de phénomènes cycliques d'ouverture-fermeture des alvéoles et d'un dé-recrutement alvéolaire favorisant la formation d'un collapsus alvéolaire et d'atélectasies. Une analyse rétrospective de données collectées chez 29343 patients ayant bénéficié d'une anesthésie générale entre 2008 et 2011 a récemment montré que, par rapport à l'utilisation d'un VT de 8 à 10 ml/kg de PIT, l'utilisation d'un VT de 6 à 8 ml/kg de PIT (dont la proportion était passée de 22,7% en 2008 à 37,7% en 2011) avec une PEP médiane de 4 cmH₂O (intervalle interquartile 2,2–5) était associée, après ajustement sur l'essentiel des variables peropératoires, à une augmentation de la durée d'hospitalisation et de la mortalité postopératoire (20).

4. Comment régler la Pression Expiratoire Positive (PEP) et la FiO₂ ?

Nous ne reviendrons pas en détail sur les modifications de la mécanique ventilatoire résultant d'une anesthésie générale et d'une intervention chirurgicale. Il est possible de retenir que sous les effets combinés de la position déclive, de la diminution du tonus musculaire et de l'ascension diaphragmatique, le volume pulmonaire de fin d'expiration (ou capacité résiduelle fonctionnelle lorsque celui-ci est mesuré à la pression atmosphérique) est réduit de façon importante, que le patient soit obèse ou non (21). Ces modifications, communes lors de toute anesthésie générale, exposent à un collapsus des voies aériennes distales (lorsque le volume pulmonaire de fin d'expiration devient inférieur au volume de fermeture) et au développement d'atélectasies dans les zones dites dépendantes du poumon. La formation d'atélectasies est observée chez 90% des patients bénéficiant d'une anesthésie générale (22). Toutes ces modifications peuvent être à l'origine d'une hypoxémie.

L'utilisation d'une PEP chez un patient sous anesthésie générale répond à une logique physiologique et il n'existe aucun argument scientifique pour ne pas appliquer de PEP lors d'une intervention chirurgicale, même si une PEP seule est évidemment insuffisamment discriminante en terme de réduction de mortalité postopératoire (23). L'application d'une PEP va s'opposer au collapsus des voies aériennes et à la réduction du volume pulmonaire de fin d'expiration. Une PEP de 5 à 10 cmH₂O chez le patient non-obèse, et une PEP d'au moins 10 cmH₂O chez le patient obèse, est efficace pour limiter la perte de volume pulmonaire et améliore la PaO₂ et les paramètres mécaniques respiratoires après intubation trachéale (21, 24). De même, une PEP permet de limiter la perte de volume pulmonaire induite par un pneumopéritoine et améliore la compliance pulmonaire et thoracique en chirurgie laparoscopique (25, 26).

En revanche, les niveaux de PEP habituellement appliqués en routine clinique (c'est-à-dire ≤ 15 cmH₂O) sont insuffisants pour permettre la réexpansion d'un collapsus pulmonaire et permettre la réexpansion d'une atélectasie. A cet effet, il a été montré qu'une augmentation transitoire de la pression transpulmonaire (manœuvre de recrutement alvéolaire, MRA) obtenue par l'application d'une pression d'au moins 30 cmH₂O, pendant une période de 15-20 secondes, est nécessaire pour permettre la réexpansion partielle d'une atélectasie (27) (cf. infra). De même, quelques travaux ont suggéré que l'effet du recrutement alvéolaire pourrait être

transitoire justifiant d'une répétition des MRAs au cours de l'intervention chirurgicale (28-30).

5. Faut-il appliquer des manœuvres de recrutement alvéolaire (MRA) ?

La PEP s'oppose aux forces de compressions extrinsèques qui s'exercent sur l'appareil respiratoire. Une fois le collapsus constitué, la PEP ne permet pas de « ré-ouvrir » les alvéoles pulmonaires collabées. L'application d'une pression importante et contrôlée (MRA) pendant une courte période (15 à 45 s permet de lever ces troubles constitués. Les modalités d'application des MRA (type, fréquence, durée, niveau de pression...) durant l'anesthésie est en cours d'évaluation. À ce jour, il a été montré dans un travail qu'une CPAP de 40 cmH₂O durant 40 s permettait d'annuler les effets de l'anesthésie et du pneumopéritoine chez les patients obèses (31). En dehors de cette population, et des patients de réanimation pris en charge au bloc opératoire, on ne peut recommander l'utilisation routinière des MRA, sauf dans le cadre d'une stratégie dite de "ventilation protectrice" (cf. infra).

Les réglages de la FiO₂ et de la PEP doivent être combinés selon un objectif de saturation en oxygène. Certains abaques ont été proposés chez les patients ayant un SDRA (12) mais il n'existe pas de combinaison de PEP/FiO₂ à ce jour ayant montré une supériorité.

6. Le concept de la "Ventilation protectrice prophylactique" est l'association d'un petit volume courant, d'une PEP et de manœuvres de recrutements: quelles preuves d'un bénéfice clinique ?

Deux études randomisées contrôlées ont récemment démontré le bénéfice de l'utilisation d'une stratégie de ventilation protectrice prophylactique (c'est à dire chez des patients dénués de pathologie pulmonaire) pendant la période opératoire en chirurgie abdominale. Dans un travail incluant 56 patients opérés d'une chirurgie abdominale lourde, Severgnini et al. (32) ont montré que, par rapport à une stratégie de ventilation dite "conventionnelle" utilisant un VT de 9 ml/kg PIT sans PEP, l'application d'une stratégie de ventilation protectrice utilisant un VT de 7 ml/kg de PIT, une PEP de 10 cmH₂O et des manœuvres de recrutement alvéolaire (réalisées après intubation, avant extubation et lors de toute déconnexion du ventilateur) permettait 1) d'améliorer l'oxygénation à j1, j2 et j5 postopératoire ; 2) d'améliorer les paramètres spirométriques postopératoires (capacité vitale forcée, capacité vitale

forcée en 1sec) ; et 3) de diminuer le score d'infection pulmonaire postopératoire modifié (*modified clinical pulmonary infection score* ou mCPIS).

Les résultats positifs de ce travail ont été confirmés par une large étude multicentrique française (étude IMPROVE) (33) conduite par notre groupe de recherche (6, 21, 25, 29, 33-41). Cette étude prospective (33), randomisée, stratifiée, en double aveugle et en groupes parallèles a été conduite dans 7 centres hospitaliers universitaires français chez 400 patients avec un âge >40 ans proposés pour une chirurgie abdominale par laparotomie ou par laparoscopie d'une durée estimée supérieure à 2h et ayant un risque intermédiaire ou élevé de complications pulmonaires postopératoires. Les patients ont été randomisés en 2 groupes : groupe ventilation non-protectrice (n=200) avec un VT de 10 à 12 ml/kg de PIT sans PEP ni manœuvre de recrutement alvéolaire (MRA)(42); groupe ventilation protectrice (n=200) avec un VT de 6 à 8 ml/kg de PIT, une PEP de 6 à 8 cmH₂O et des MRA (CPAP de 30 cmH₂O pendant 30 s) appliquées après intubation trachéale puis toutes les 30-45 min jusqu'à la fin de l'intervention chirurgicale. Dans les 2 groupes, les patients étaient ventilés en mode VVC, avec une pression de plateau maximale de 30 cmH₂O et la FiO₂ minimale pour maintenir la SpO₂ ≥95%. Une stratification était réalisée sur l'utilisation ou non d'une analgésie péridurale postopératoire. Tous les autres aspects de la prise en charge per et postopératoire du patient, incluant l'anesthésie générale, l'administration des liquides de remplissage, l'antibiothérapie prophylactique et la gestion de l'analgésie postopératoire, étaient laissés à la discrétion du médecin en charge du patient, en accord avec l'expertise clinique et les habitudes de chaque centre. Le critère de jugement principal était un critère composite de complications majeures pulmonaires (pneumopathie, nécessité d'une assistance ventilatoire invasive ou non-invasive pour traitement d'une IRA postopératoire) et extra-pulmonaires (survenue d'un sepsis, sepsis sévère, choc septique, décès) à j7 postopératoire. Sur les 400 patients inclus dans l'analyse en intention de traiter modifiée, des complications pulmonaires et extra-pulmonaires majeures étaient retrouvées chez 55 patients (27,5%) dans le groupe ventilation non-protectrice et chez 21 patients (10,5%) dans le groupe ventilation protectrice (risque relatif ajusté = 0,40 ; intervalle de confiance (IC) 95% 0,24-0,78, P=0,001). Pendant les 7 jours postopératoires, 34 patients (17%) du groupe ventilation non-protectrice ont nécessité une assistance ventilatoire invasive ou non-invasive contre 10 patients (5%) dans le groupe ventilation protectrice (P=0,001). La durée d'hospitalisation était

plus courte dans le groupe ventilation protectrice que dans le groupe ventilation non-protectrice ($P = 0,006$).

Ces données ont été récemment complétées par les résultats de l'étude multicentrique PROVHILO dans laquelle 900 patients opérés d'une chirurgie abdominale par laparotomie ont été inclus (43). Afin de mieux évaluer les bénéfices de l'application d'un haut ou d'un bas niveau de PEP chez les patients ventilés avec un VT réduit, les patients étaient randomisés en 2 groupes : groupe basse PEP (application d'une PEP ≤ 2 cmH₂O, $n = 447$ patients), groupe haute PEP (PEP = 12 cmH₂O et réalisation de manœuvres de recrutement alvéolaire après intubation, avant extubation et lors de toute déconnexion du ventilateur, $n = 453$ patients). Tous les patients étaient ventilés avec un VT de 8 ml/kg de PIT. Le critère de jugement principal était un critère composite de complications pulmonaires postopératoires dans les 5 jours après chirurgie. Des complications pulmonaires étaient enregistrées chez 174 (40%) patients dans le groupe haute PEP et 172 (39%) patients dans le groupe basse PEP. Par rapport à la stratégie basse PEP, l'application d'une stratégie associant haute PEP et réalisation de MRA était associée à plus d'hypotension artérielle, à un recours plus fréquent aux vasopresseurs et en l'administration d'un volume liquidien plus important. La conclusion des auteurs de ce travail était que le bénéfice d'une stratégie de ventilation prophylactique provient essentiellement de la réduction du VT et que, en conséquence, l'application d'une (très) haute PEP et la réalisation de manœuvres de recrutement alvéolaire ne peuvent être envisagées. Si le bénéfice d'une réduction du VT ne peut être remis en question (44), plusieurs remarques importantes méritent d'être considérées (45). Premièrement, il convient de garder à l'esprit que l'étude PROVHILO ne démontre pas la supériorité de la stratégie utilisant un VT de 8 ml/kg de PIT et une PEP ≤ 2 cmH₂O sans recrutement alvéolaire (Equipoise). Il est d'ailleurs troublant de constater une incidence aussi élevée de complications pulmonaires dans ce travail (40% vs 39%) alors qu'une incidence de l'ordre de 13% pouvait être attendue chez des patients présentant un risque intermédiaire de complications pulmonaires (score ARISCAT de 26-44 points, pour 75% des patients inclus), sur les données de l'étude PERISCOPE (46). Deuxièmement, comme évoqué plus avant, il n'existe pas de données ayant démontrées la supériorité d'une stratégie de ventilation utilisant uniquement un bas VT par rapport à l'association d'un bas VT et d'une PEP. Dans une méta-analyse conduite par les mêmes auteurs que le travail précédent (14), dont certains résultats

ont été évoqués précédemment, il est important de noter que le niveau moyen de PEP appliqué dans les études retenues, et ayant montré une supériorité d'une ventilation à bas niveau de VT, était en moyenne de $6,4 \pm 2,4$ cmH₂O. S'il n'existe pas de rationnel physiologique en faveur de l'absence de l'utilisation d'une PEP, il n'existe pas non plus d'arguments en faveur de l'application d'une PEP de 12 cmH₂O chez des patients à poumons sains, tel que ceci a été évalué dans l'étude PROVHILO. Il est d'ailleurs assez curieux d'envisager l'application, en routine clinique au bloc opératoire chez des patients ne présentant pas de pathologie pulmonaire, d'un tel niveau de PEP alors même que les données récentes issues d'une large étude cohorte (47) ont rapporté l'utilisation d'un niveau moyen de PEP de $9,2 \pm 3,8$ cmH₂O chez des patients ayant un SDRA. Ainsi, il est de notre avis que les résultats de l'étude PROVHILO, bien qu'apportant des informations importantes notamment quant au risque d'événements indésirables hémodynamiques lors de l'application de niveaux trop élevés de PEP, ne peuvent soutenir l'interprétation qui en est faite par ses auteurs.

Conclusion

Au bloc opératoire, comme en réanimation, de nombreux arguments physiologiques et cliniques plaident désormais pour une utilisation raisonnée de la ventilation mécanique (48). En raison du nombre de patients exposés chaque année, il est important de garder à l'esprit que des réglages inadaptés, particulièrement l'utilisation d'un VT trop important, mais également l'utilisation d'un VT trop réduit sans PEP (49), peuvent participer à l'apparition de complications pulmonaires postopératoires, y compris chez des patients ayant des poumons antérieurement sains. À cet effet, les résultats disponibles désormais dans la littérature doivent nous inciter à modifier notre approche de la ventilation mécanique lors de chirurgies abdominales en associant un VT de 6 à 8 ml/kg de PIT, une PEP modérée (de 6 à 8 cmH₂O) et l'utilisation de manœuvres de recrutement alvéolaire appliquées précocement après intubation trachéale et, probablement, répétées au cours de l'intervention chirurgicale. Cette approche multi-facette de la ventilation mécanique peut être élégamment intégrée dans une stratégie globale périopératoire (concept de POP ventilation) (6) (Figure 1) visant à limiter le risque de collapsus alvéolaire lors de la période à risque chirurgicale en associant une utilisation de la VNI lors de la phase

de préoxygénation et l'application d'une pression positive après extubation (CPAP ou VNI)(50), particulièrement chez les patients les plus à risques de complications pulmonaires postopératoires.

Références

1. Weiser TG, Regenbogen SE, Thompson KD, Haynes AB, Lipsitz SR, Berry WR, Gawande AA. An estimation of the global volume of surgery: A modelling strategy based on available data. *Lancet* 2008;372:139-144.
2. Khuri SF, Henderson WG, DePalma RG, Mosca C, Healey NA, Kumbhani DJ. Determinants of long-term survival after major surgery and the adverse effect of postoperative complications. *Ann Surg* 2005;242:326-341.
3. Lawrence VA, Dhanda R, Hilsenbeck SG, Page CP. Risk of pulmonary complications after elective abdominal surgery. *Chest* 1996;110:744-750.
4. Pearse RM, Moreno RP, Bauer P, Pelosi P, Metnitz P, Spies C, Vallet B, Vincent JL, Hoefft A, Rhodes A. Mortality after surgery in europe: A 7 day cohort study. *Lancet* 2012;380:1059-1065.
5. Brueckmann B, Villa-Urbe JL, Bateman BT, Grosse-Sundrup M, Hess DR, Schlett CL, Eikermann M. Development and validation of a score for prediction of postoperative respiratory complications. *Anesthesiology* 2013;118:1276-1285.
6. Futier E, Marret E, Jaber S. Perioperative positive pressure ventilation: An integrated approach to improve pulmonary care. *Anesthesiology* 2014;121:400-408.
7. Delay JM, Sebbane M, Jung B, Nocca D, Verzilli D, Pouzeratte Y, Kamel ME, Fabre JM, Eledjam JJ, Jaber S. The effectiveness of noninvasive positive pressure ventilation to enhance preoxygenation in morbidly obese patients: A randomized controlled study. *Anesth Analg* 2008;107:1707-1713.
8. Aldenkortt M, Lysakowski C, Elia N, Brochard L, Tramer MR. Ventilation strategies in obese patients undergoing surgery: A quantitative systematic review and meta-analysis. *Br J Anaesth* 2012;109:493-502.
9. Capdevila X, Jung B, Bernard N, Dadure C, Biboulet P, Jaber S. Effects of pressure support ventilation mode on emergence time and intra-operative ventilatory function: A randomized controlled trial. *PloS one* 2014;9:e115139.

10. Bendixen HH, Hedley-Whyte J, Laver MB. Impaired oxygenation in surgical patients during general anesthesia with controlled ventilation. A concept of atelectasis. *N Engl J Med* 1963;269:991-996.
11. Shapiro BA, Peruzzi WT. Respiratory care. In: Miller RD, editor. *Anesthesia*, 5th ed. Philadelphia, Pennsylvania: Churchill Livingstone; 2000. p. 2403-2443.
12. The acute respiratory distress syndrome network. Ventilation with lower tidal volumes as compared with traditional tidal volumes for acute lung injury and the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med* 2000;342:1301-1308.
13. Putensen C, Theuerkauf N, Zinserling J, Wrigge H, Pelosi P. Meta-analysis: Ventilation strategies and outcomes of the acute respiratory distress syndrome and acute lung injury. *Ann Intern Med* 2009;151:566-576.
14. Serpa Neto A, Cardoso SO, Manetta JA, Pereira VG, Esposito DC, Pasqualucci Mde O, Damasceno MC, Schultz MJ. Association between use of lung-protective ventilation with lower tidal volumes and clinical outcomes among patients without acute respiratory distress syndrome: A meta-analysis. *Jama* 2012;308:1651-1659.
15. Carney D, DiRocco J, Nieman G. Dynamic alveolar mechanics and ventilator-induced lung injury. *Crit Care Med* 2005;33:S122-128.
16. Choi G, Wolthuis EK, Bresser P, Levi M, van der Poll T, Dzoljic M, Vroom MB, Schultz MJ. Mechanical ventilation with lower tidal volumes and positive end-expiratory pressure prevents alveolar coagulation in patients without lung injury. *Anesthesiology* 2006;105:689-695.
17. Gajic O, Dara SI, Mendez JL, Adesanya AO, Festic E, Caples SM, Rana R, St Sauver JL, Lymp JF, Afessa B, Hubmayr RD. Ventilator-associated lung injury in patients without acute lung injury at the onset of mechanical ventilation. *Crit Care Med* 2004;32:1817-1824.
18. Lellouche F, Dionne S, Simard S, Bussieres J, Dagenais F. High tidal volumes in mechanically ventilated patients increase organ dysfunction after cardiac surgery. *Anesthesiology* 2012;116:1072-1082.
19. Bouadma L, Dreyfuss D, Ricard JD, Martet G, Saumon G. Mechanical ventilation and hemorrhagic shock-resuscitation interact to increase inflammatory cytokine release in rats. *Crit Care Med* 2007;35:2601-2606.

20. Levin MA, McCormick PJ, Lin HM, Hosseinian L, Fischer GW. Low intraoperative tidal volume ventilation with minimal peep is associated with increased mortality. *Br J Anaesth* 2014.
21. Futier E, Constantin JM, Petit A, Jung B, Kwiatkowski F, Duclos M, Jaber S, Bazin JE. Positive end-expiratory pressure improves end-expiratory lung volume but not oxygenation after induction of anaesthesia. *Eur J Anaesthesiol* 2010;27:508-513.
22. Duggan M, Kavanagh BP. Pulmonary atelectasis: A pathogenic perioperative entity. *Anesthesiology* 2005;102:838-854.
23. Imberger G, McIlroy D, Pace NL, Wetterslev J, Brok J, Moller AM. Positive end-expiratory pressure (peep) during anaesthesia for the prevention of mortality and postoperative pulmonary complications. *Cochrane database of systematic reviews* 2010:CD007922.
24. Pelosi P, Ravagnan I, Giurati G, Panigada M, Bottino N, Tredici S, Eccher G, Gattinoni L. Positive end-expiratory pressure improves respiratory function in obese but not in normal subjects during anesthesia and paralysis. *Anesthesiology* 1999;91:1221-1231.
25. Futier E, Constantin JM, Pelosi P, Chanques G, Kwiatkoskwi F, Jaber S, Bazin JE. Intraoperative recruitment maneuver reverses detrimental pneumoperitoneum-induced respiratory effects in healthy weight and obese patients undergoing laparoscopy. *Anesthesiology* 2010;113:1310-1319.
26. Cinnella G, Grasso S, Spadaro S, Rauseo M, Lucia M, Salatto P, De Capraris A, Nappi L, Greco P, Dambrosio M. Effects of recruitment maneuver and positive end-expiratory pressure on respiratory mechanics and transpulmonary pressure during laparoscopic surgery. *Anesthesiology* 2012.
27. Hedenstierna G, Edmark L. The effects of anesthesia and muscle paralysis on the respiratory system. *Intensive Care Med* 2005;31:1327-1335.
28. Reinius H, Jonsson L, Gustafsson S, Sundbom M, Duvernoy O, Pelosi P, Hedenstierna G, Freden F. Prevention of atelectasis in morbidly obese patients during general anesthesia and paralysis: A computerized tomography study. *Anesthesiology* 2009;111:979-987.
29. Futier E, Constantin JM, Pelosi P, Chanques G, Massone A, Petit A, Kwiatkowski F, Bazin JE, Jaber S. Noninvasive ventilation and alveolar recruitment maneuver improve respiratory function during and after intubation of morbidly obese patients: A randomized controlled study. *Anesthesiology* 2011;114:1354-1363.

30. Almarakbi WA, Fawzi HM, Alhashemi JA. Effects of four intraoperative ventilatory strategies on respiratory compliance and gas exchange during laparoscopic gastric banding in obese patients. *Br J Anaesth* 2009;102:862-868.
31. Constantin J, Futier E, Petit A, Cayot-Constantin S, Bazin J. Effects of peep and recruitment maneuver on pneumoperitoneum induced–frc alterations. *Am Soc Anesthesiol* 2008:A1768.
32. Severgnini P, Selmo G, Lanza C, Chiesa A, Frigerio A, Bacuzzi A, Dionigi G, Novario R, Gregoretti C, de Abreu MG, Schultz MJ, Jaber S, Futier E, Chiaranda M, Pelosi P. Protective mechanical ventilation during general anesthesia for open abdominal surgery improves postoperative pulmonary function. *Anesthesiology* 2013;118:1307-1321.
33. Futier E, Constantin JM, Paugam-Burtz C, Pascal J, Eurin M, Neuschwander A, Marret E, Beaussier M, Gutton C, Lefrant JY, Allaouchiche B, Verzilli D, Leone M, De Jong A, Bazin JE, Pereira B, Jaber S. A trial of intraoperative low-tidal-volume ventilation in abdominal surgery. *N Engl J Med* 2013;369:428-437.
34. Futier E, Constantin JM, Jaber S. Protective lung ventilation in operating room: A systematic review. *Minerva Anestesiologica* 2014;80:726-735.
35. Futier E, Constantin JM, Petit A, Chanques G, Kwiatkowski F, Flamein R, Slim K, Sapin V, Jaber S, Bazin JE. Conservative vs restrictive individualized goal-directed fluid replacement strategy in major abdominal surgery: A prospective randomized trial. *Arch Surg* 2010;145:1193-1200.
36. Futier E, Godet T, Millot A, Constantin JM, Jaber S. Mechanical ventilation in abdominal surgery. *Ann Fr Anesth Reanim* 2014;33:472-475.
37. Futier E, Jaber S. Lung-protective ventilation in abdominal surgery. *Curr Opin Crit Care* 2014;20:426-430.
38. Futier E, Jaber S. High-flow nasal cannula following extubation: Is more oxygen flow useful after surgery? *Intensive Care Med* 2015;41:1310-1313.
39. Futier E, Paugam-Burtz C, Constantin JM, Pereira B, Jaber S. The opera trial - comparison of early nasal high flow oxygen therapy with standard care for prevention of postoperative hypoxemia after abdominal surgery: Study protocol for a multicenter randomized controlled trial. *Trials* 2013;14:341.
40. Jaber S, De Jong A, Castagnoli A, Futier E, Chanques G. Non-invasive ventilation after surgery. *Ann Fr Anesth Reanim* 2014;33:487-491.

41. Neuschwander A, Futier E, Jaber S, Pereira B, Eurin M, Marret E, Szymkewicz O, Beaussier M, Paugam-Burtz C. The effects of intraoperative lung protective ventilation with positive end-expiratory pressure on blood loss during hepatic resection surgery: A secondary analysis of data from a published randomised control trial (improve). *Eur J Anaesthesiol* 2016;33:292-298.
42. Jaber S, Coisel Y, Chanques G, Futier E, Constantin JM, Michelet P, Beaussier M, Lefrant JY, Allaouchiche B, Capdevila X, Marret E. A multicentre observational study of intra-operative ventilatory management during general anaesthesia: Tidal volumes and relation to body weight. *Anaesthesia* 2012;67:999-1008.
43. Hemmes SN, Gama de Abreu M, Pelosi P, Schultz MJ. High versus low positive end-expiratory pressure during general anaesthesia for open abdominal surgery (provhilo trial): A multicentre randomised controlled trial. *Lancet* 2014;384:495-503.
44. Neto AS, Hemmes SN, Barbas CS, Beiderlinden M, Fernandez-Bustamante A, Futier E, Hollmann MW, Jaber S, Kozian A, Licker M, Lin WQ, Moine P, Scavonetto F, Schilling T, Selmo G, Severgnini P, Sprung J, Treschan T, Unzueta C, Weingarten TN, Wolthuis EK, Wrigge H, de Abreu MG, Pelosi P, Schultz MJ. Incidence of mortality and morbidity related to postoperative lung injury in patients who have undergone abdominal or thoracic surgery: A systematic review and meta-analysis. *Lancet Respir Med* 2014;2:1007-1015.
45. Futier E. Positive end-expiratory pressure in surgery: Good or bad? *Lancet* 2014;384:472-474.
46. Mazo V, Sabate S, Canet J, Gallart L, de Abreu MG, Belda J, Langeron O, Hoelt A, Pelosi P. Prospective external validation of a predictive score for postoperative pulmonary complications. *Anesthesiology* 2014;121:219-231.
47. Esteban A, Frutos-Vivar F, Muriel A, Ferguson ND, Penuelas O, Abaira V, Raymondos K, Rios F, Nin N, Apezteguia C, Violi DA, Thille AW, Brochard L, Gonzalez M, Villagomez AJ, Hurtado J, Davies AR, Du B, Maggiore SM, Pelosi P, Soto L, Tomicic V, D'Empaire G, Matamis D, Abroug F, Moreno RP, Soares MA, Arabi Y, Sandi F, Jibaja M, Amin P, Koh Y, Kuiper MA, Bulow HH, Zeggwagh AA, Anzueto A. Evolution of mortality over time in patients receiving mechanical ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 2013;188:220-230.

48. Serpa Neto A, Hemmes SN, Barbas CS, Beiderlinden M, Biehl M, Binnekade JM, Canet J, Fernandez-Bustamante A, Futier E, Gajic O, Hedenstierna G, Hollmann MW, Jaber S, Kozian A, Licker M, Lin WQ, Maslow AD, Memtsoudis SG, Reis Miranda D, Moine P, Ng T, Paparella D, Putensen C, Ranieri M, Scavonetto F, Schilling T, Schmid W, Selmo G, Severgnini P, Sprung J, Sundar S, Talmor D, Treschan T, Unzueta C, Weingarten TN, Wolthuis EK, Wrigge H, Gama de Abreu M, Pelosi P, Schultz MJ. Protective versus conventional ventilation for surgery: A systematic review and individual patient data meta-analysis. *Anesthesiology* 2015.
49. Neto AS, Jaber S. What's new in mechanical ventilation in patients without ards: Lessons from the ards literature. *Intensive care medicine* 2016;42:787-789.
50. Jaber S, Lescot T, Futier E, Paugam-Burtz C, Seguin P, Ferrandiere M, Lasocki S, Mimoz O, Hengy B, Sannini A, Pottecher J, Abback PS, Riu B, Belafia F, Constantin JM, Masseret E, Beaussier M, Verzilli D, De Jong A, Chanques G, Brochard L, Molinari N. Effect of noninvasive ventilation on tracheal reintubation among patients with hypoxemic respiratory failure following abdominal surgery: A randomized clinical trial. *Jama* 2016;315:1345-1353.

Légendes du tableau 1 et des figures:

Table 1
Principales caractéristiques et différences entre
un mode en volume contrôlé (VVC) et un mode en pression contrôlée (VPC)
 PARAMETRES REGLES ET PARAMATRES MONITORES

Paramètres ventilatoires	VOLUME CONTROLE	PRESSION CONTROLEE
VOLUME courant	FIXE (assuré)	variable
PRESSION voies aériennes	variable	FIXE (contrôlée = sécurité)
DEBIT	Carré (constant) 	décélérant 
ALARMES à surveiller (en priorité)	Pressions (Ppic, Pplat, Pmoy)	Volume (VT mini) Ventilation minute EtCO2

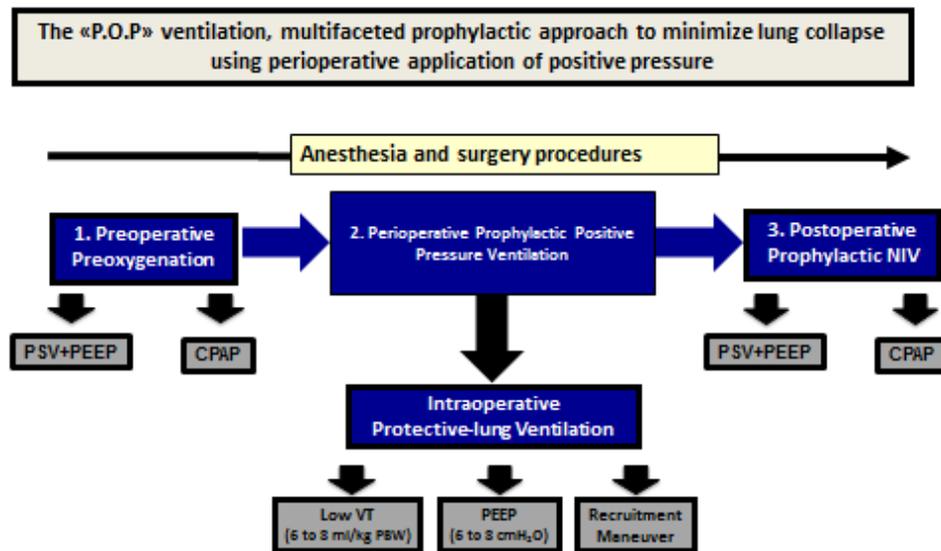
Dans le mode en volume (volumétrique), le respirateur est réglé pour délivrer un volume courant (VT) qui est "fixe" pendant une durée définie (Ti: temps inspiratoire) selon un débit carré défini. L'avantage majeur d'un mode en volume est de garantir la ventilation minute et/ou le volume courant souhaités mais l'inconvénient principal est l'absence de contrôle de la pression qui est "variable" dans les voies aériennes, pouvant exposer au risque de barotraumatisme.

Dans un mode en pression (barométrique), le paramètre régulé est la pression d'insufflation qui est "fixe" dans les voies aériennes et le débit est décélérant. L'avantage majeur d'un mode en pression est de garantir une limite de pression évitant ainsi le risque de barotraumatisme mais l'inconvénient principal est l'absence de contrôle du volume courant qui est "variable" et de la ventilation minute en cas de changement des propriétés mécaniques du système respiratoire (atélectasie, encombrement bronchique, encrassement de la sonde...).

Il est important de surveiller les pressions des voies aériennes (en particulier la pression de plateau pour le risque barotraumatique) lorsqu'on utilise un mode en

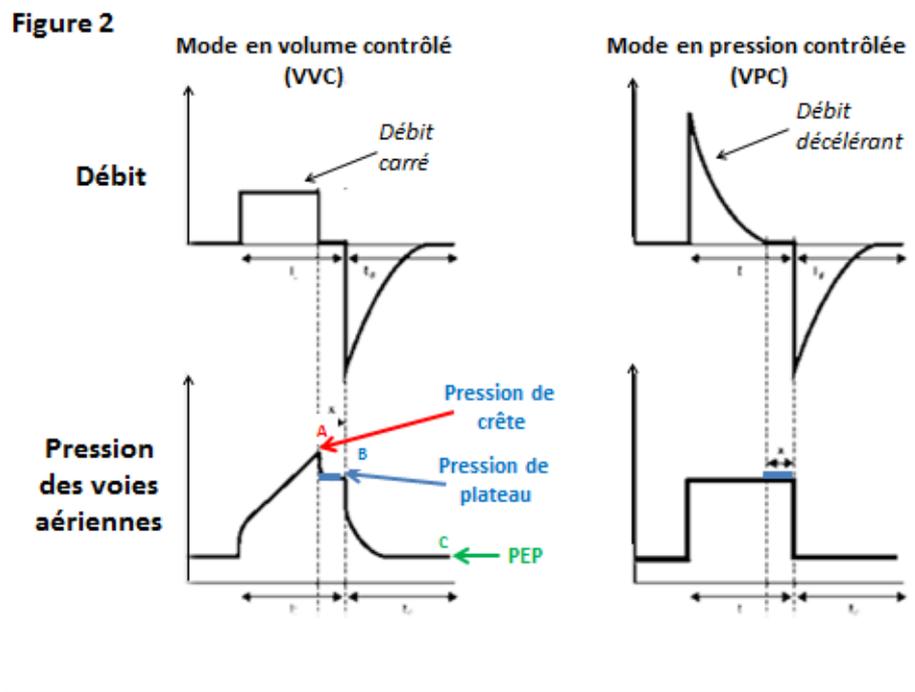
volume et de surveiller le volume courant, la ventilation minute et la capnographie lorsqu'on utilise un mode en pression.

Figure 1



The multifaceted longitudinal bundle of prophylactic Peri-Operative Positive pressure ventilation (the “P.O.P.-ventilation”) to minimize lung collapse using positive pressure during the perioperative period. Intraoperative lung-protective mechanical ventilation is the core of a multifaceted perioperative bundle of pulmonary care, which should ideally include pre- and postoperative application of noninvasive respiratory support aimed at minimizing lung volume reduction during the perioperative period. Individual ranges for tidal volume and positive end-expiratory pressure (PEEP) are indicative. CPAP = continuous positive airway pressure; NIV = noninvasive ventilation; PBW = predicted body weight; PSV = pressure support ventilation; VT = tidal volume.

Figure 2. Caractéristiques des courbes des pressions des voies aériennes et du débit dans le mode en volume contrôlé (VVC) et le mode en pression contrôlée (VPC)



À gauche de la figure, dans le mode en volume (VVC), le respirateur délivre un volume courant (V_T) qui est "fixe" pendant une durée définie (T_i : temps inspiratoire) selon un débit carré défini réglable uniquement sur les respirateurs modernes. Dans le mode en volume, les pressions dans les voies aériennes (Pression de crête et pression de plateau) sont "variables" en fonction des propriétés mécaniques du système respiratoire (compliance et résistance).

A droite de la figure, dans le mode en pression (VPC), le respirateur délivre le paramètre réglé qui est la pression d'insufflation et qui est "fixe" dans les voies aériennes quelles que soient les propriétés mécaniques du système respiratoire. La forme du débit est décélérante.

Figure 3.

Figure 3

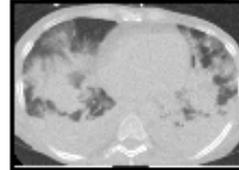
Objectifs de la ventilation en volume contrôlée (VVC)

A. Poumons Sains (non-lésionnels)



Réglages initiaux
6 < VT < 8 ml/kg PIT
6 < PEP < 8 cmH ₂ O
Manœuvres de recrutement (répétées toutes les 30-45 min et lors de chaque procédure à l'origine d'un dérecrutement (aspiration trachéale...))
12 < FR < 25 c/min
30% < FiO ₂ < 50%
Valeurs cibles et surveillance du monitoring
Pression de plateau < 25 cmH ₂ O
35 < EtCO ₂ < 45 mmHg (Gaz du sang si EtCO ₂ > 45 mmHg)
SpO ₂ ≥ 95%

B. Poumons SDRA (lésionnels)



Réglages initiaux
4 < VT ≤ 6 ml/kg PIT
8 < PEP < 15 cmH ₂ O
Manœuvres de recrutement (Chez des patients sélectionnés)
15 < FR < 35 breath/min
50% < FiO ₂ < 80%
Target values and monitoring
Pression de plateau < 30 cmH ₂ O
40 < PaCO ₂ < 60 mmHg and 7.30 < Ph < 7.40 (Gaz du sang répétés pour optimisation)
SpO ₂ ≥ 92%