



Disponible en ligne sur www.sciencedirect.com



journal homepage: <http://france.elsevier.com/direct/REURG/>



MISE AU POINT

Évolution des ventilateurs de réanimation

Evolution of intensive care unit ventilators

A.-W. Thille*, A. Lyazidi, J.-C.M. Richard, L. Brochard

Inserm U841, réanimation médicale, groupe hospitalier Albert-Chenevier–Henri-Mondor, AP–HP, université Paris-XII, 51, avenue du Maréchal-de-Lattre-de-Tassigny, 94000 Créteil, France

Disponible sur Internet le 26 décembre 2007

MOTS CLÉS

Ventilateurs ;
Ventilation
mécanique ;
Aide inspiratoire ;
Trigger

Résumé Les ventilateurs de réanimation ont bénéficié d'améliorations technologiques spectaculaires au cours des dernières années. Bien que l'impact clinique soit difficile à évaluer, l'amélioration des performances des ventilateurs permet une meilleure prise en charge des patients ventilés. En ventilation contrôlée, la précision des nouvelles valves et la compensation de compliance du circuit permettent de délivrer un volume courant plus précis. En aide inspiratoire, la qualité du *trigger* inspiratoire et de la pressurisation ont un impact sur le confort, le travail respiratoire et la synchronisation patient–ventilateur. Le développement des modes spécifiques dédiés à la ventilation non invasive (détection et compensation des fuites, algorithmes de fin d'inspiration) pourrait favoriser la réussite de la ventilation non invasive. En plus des performances techniques, les constructeurs ont amélioré l'ergonomie et le monitoring, avec notamment des larges écrans de surveillance qui permettent de mieux comprendre les interactions patient–ventilateur. Les ventilateurs de nouvelle génération proposent aussi des nouvelles explorations telles que la mesure de la capacité résiduelle fonctionnelle, du travail respiratoire ou la réalisation des courbes pression–volume qui en font de véritables outils d'exploration physiologique au lit du patient. De plus, de nouveaux modes ventilatoires ont été développés pour favoriser le sevrage ventilatoire et la synchronisation patient–ventilateur (système Smartcare®, *proportional assist ventilation*, *adaptative support ventilation*, *neurally adjusted ventilatory assist*). Les tests sur banc d'essai permettent d'évaluer les performances des ventilateurs de façon rigoureuse et standardisée. Malgré une amélioration globale des performances, les résultats sont souvent hétérogènes d'un ventilateur à l'autre et doivent être accessibles pour les cliniciens. De plus, la grande complexité des systèmes proposés nécessite d'être vigilant sur les caractéristiques des nouveaux ventilateurs lors de leur mise sur le marché. © 2007 Société de réanimation de langue française. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : arnaud.thille@hmn.aphp.fr (A.-W. Thille).

KEYWORDS

Ventilators;
Mechanical
ventilation;
Pressure support
ventilation;
Trigger

Summary New generations of intensive care unit (ICU) ventilators have markedly improved their performances over recent years. Although beneficial effects on outcome are difficult to show, improvement of ICU ventilators allows a better management of ventilated patients. During controlled ventilation, the accuracy of new electromagnetic valves and compensation for compressed gas volume improve the accuracy of delivered volumes. During pressure support ventilation, quality of trigger and pressurization functions can influence comfort, work of breathing and patient–ventilator synchrony. The development of specific non-invasive ventilation modes to minimize and manage leaks (detection and compensation of leaks, adaptation to leaks of cycling off criteria) may enhance the success of non-invasive ventilation. Moreover, manufacturers improved user friendliness and monitoring, especially using large screens allowing a better understanding and diagnosing of patient–ventilator interactions. New generation of ICU ventilators allow new explorations such as measurement of functional residual capacity, work of breathing and alveolar recruitment using pressure–volume curves, transforming ventilators into real pulmonary physiological investigation tool at the bedside. Moreover, new ventilatory modes are available to hasten duration of weaning from mechanical ventilation or improve patient–ventilator synchrony (Smartcare® system, proportional assist ventilation, adaptive support ventilation, neurally adjusted ventilatory assist). Bench test studies permit to assess performances of ventilators using rigorous and standardized methods. Despite a global improvement of ventilator performances, results are heterogeneous and these differences should be available to clinicians. Clinicians should also be prudent regarding the complexity of new ventilatory modes and functions.

© 2007 Société de réanimation de langue française. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Introduction

Les ventilateurs d'aujourd'hui proposent de nouvelles fonctions et de nouveaux modes de ventilation qui en font de véritables outils d'exploration fonctionnelle respiratoire. Les constructeurs ont aussi nettement amélioré l'ergonomie, la facilité d'utilisation et le monitoring. En effet, les signaux du patient sont affichés sur de larges écrans et les différents réglages sont facilement accessibles sur des écrans tactiles. Concernant les performances techniques, plusieurs études expérimentales ont mis en évidence une franche amélioration des performances des ventilateurs les plus récents [1]. Bien qu'il soit difficile de montrer les conséquences cliniques, plusieurs études physiologiques ont démontré l'influence du ventilateur sur les résultats cliniques, en termes de confort, de travail respiratoire et de synchronisation patient–ventilateur [2–6]. Cependant, les résultats restent très différents d'un ventilateur à l'autre et la grande complexité des systèmes proposés nécessite d'être vigilant sur les performances des nouveaux ventilateurs lors de leur mise sur le marché. En effet, un ventilateur peut être commercialisé dès qu'il obtient le marquage technique de conformité (marquage CE), mais les tests sur banc d'essai et les évaluations cliniques des performances ne sont ni obligatoires ni standardisées. Dans ces conditions, une évaluation indépendante des performances techniques semble utile pour mieux détecter les faiblesses des uns et favoriser l'innovation des constructeurs quand elle est performante.

Fonctionnement des ventilateurs de nouvelle génération

Les deux principaux systèmes de pressurisation utilisés pour générer un débit de gaz sont les gaz muraux et les turbines. La présence d'une valve située en aval de la source

de pression permet de contrôler précisément le débit délivré. Sur les anciennes générations de ventilateurs, c'est un moteur qui contrôle la valve et qui permet son obstruction progressive. Par opposition, les ventilateurs de nouvelle génération utilisent des servovalves le plus souvent électromagnétiques. Par exemple, un élément métallique se déplace dans un champ magnétique d'intensité réglable qui permet le contrôle continu de l'ouverture de la valve et donc du débit d'insufflation. Ce type de valve est fiable et précis, grâce au développement des microprocesseurs. Les progrès technologiques ont permis d'améliorer aussi les performances des turbines, particulièrement adaptées pour les modes ventilatoires en pression (la turbine est un compresseur qui délivre une pression constante pour une vitesse de rotation constante) et le transport des patients puisqu'elle ne dépend pas des gaz muraux. Les ventilateurs à turbine peuvent fonctionner en autonomie complète simplement avec une batterie et une bouteille d'oxygène pour enrichir la FiO₂. Beaucoup de ces ventilateurs utilisent maintenant des valves suffisamment sophistiquées pour permettre de contrôler parfaitement le débit d'insufflation et ainsi proposer tous les modes ventilatoires. Les performances des ventilateurs à turbine se rapprochent des ventilateurs lourds de réanimation et permettent d'améliorer significativement les conditions de transport des patients. Exemples de ventilateurs de réanimation qui fonctionnent au moyen d'une turbine : Elisée 250, 350 (Resmed-Saime, North Ryde, Australie), Savina (Dräger, Lübeck, Allemagne), T-Bird ou Vela (Viasys Healthcare, Conshohocken, PA, États-Unis).

Monitoring et convivialité

En plus des performances techniques et des nouvelles fonctions disponibles, les constructeurs ont développé

l'ergonomie et la convivialité des ventilateurs. La plupart des ventilateurs de nouvelle génération permettent une surveillance continue du débit et des pressions des voies aériennes sur de larges écrans. L'analyse de ces courbes est un outil de surveillance clinique et permet de détecter les principales asynchronies patient-ventilateur, dont les fuites [7], la présence d'une pression expiratoire positive (PEP) intrinsèque, des signes de surdistension alvéolaire [8] ou d'orienter le diagnostic lors d'une détresse respiratoire [9]. Pour cela, les manœuvres d'occlusion doivent être directement accessibles à partir de l'écran principal afin de mesurer facilement la pression de plateau (pause téléinspiratoire) et la PEP intrinsèque (pause téléexpiratoire). Les mesures d'occlusion peuvent être automatiques ou manuelles avec des curseurs mobiles qui permettent une mesure précise.

Bien que les fonctions des ventilateurs modernes soient plus nombreuses, le réglage des paramètres vitaux doit rester simple et intuitif dans l'urgence. La convivialité des ventilateurs peut être évaluée par le temps nécessaire pour

réglage différents paramètres, par un médecin qui ne connaît pas le ventilateur, tels que le changement de mode ventilatoire, la FiO_2 , le débit d'insufflation ou la mesure d'une pression de plateau. Ces tests montrent de nombreux pièges et difficultés, avec par exemple, l'impossibilité de mettre en marche certains ventilateurs ou l'impossibilité de passer d'un mode spontané à un mode contrôlé. Ces pièges ont notamment été mis en évidence pour les ventilateurs de domicile [10].

Performances des ventilateurs

Performances en ventilation contrôlée : précision du volume courant

En ventilation contrôlée, une partie de volume courant insufflée par le ventilateur reste comprimé dans le circuit sous l'effet de la pression et n'est donc pas délivrée au

Tableau 1 Caractéristiques des ventilateurs de réanimation proposés à l'appel d'offre 2006 pour les marchés de l'AP-HP.

Constructeur et site internet	Nom des ventilateurs	Système de pressurisation	Débit maximum (L/min)	Compensation compliance circuit	Taille écran (pouces)
Dräger Medical, Lübeck, Allemagne http://www.draegermedical.com	Evita 4	Gaz muraux	180	Oui	10/Tactile
	Evita XL	Gaz muraux	180	Oui	15/Tactile
	Savina	Turbine	180	Non	6
Maquet, Solna, Suède http://www.maquet.com	Servo I – Servo S	Gaz muraux	200	Option	12/Tactile
Puritan Bennett, Carlsbad, CA, États-Unis http://www.puritanbennett.com	PB 840	Gaz muraux	150	Oui	15/Tactile
Viasys, Conshohocken, PA, États-Unis http://www.viasyshealth.com	Avea	Gaz muraux	200	Option	12/Tactile
	Vela	Turbine	140	Non	10/Tactile
Resmed-Saime, North Ryde, Australie http://www.resmed.com	Elisée 350	Turbine	180	Oui	15/Tactile
	Elisée 250	Turbine	180	Oui	5/Tactile
Taema, Antony, France http://www.airliquide.com/taema	Extend	Gaz muraux	200	Oui	15/Tactile
Hamilton Medical, Rhäzuns, Suisse http://www.hamilton-medical.com	Galiléo	Gaz muraux	180	Non (mesure proximale du débit)	11
General Electric, Fairfield, Co, États-Unis http://www.gehealthcare.com	Engström	Gaz muraux	200	Oui	12
	Centiva	Gaz muraux	180	Oui	12
Respironics, Murryville, PA, États-Unis http://www.respironics.com	Esprit	Turbine	200	Oui	10
	Vision	Turbine	200	Non	9
Newport medical instruments, Costa Mesa, CA, États-Unis http://www.newportnmi.com	E 500	Gaz muraux	180	Non	10

patient. Le volume comprimé est d'autant plus important que la pression d'insufflation est élevée, ce qui peut jouer un rôle majeur dans des conditions de petit volume et forte pression (syndrome de détresse respiratoire aigu, asthme et ventilation pédiatrique). À titre d'exemple, si les pressions maximales (pression de pic) atteignent 50 cm H₂O et que la compliance du circuit est de 2 ml/cm H₂O, le volume comprimé est de l'ordre de 100 ml (pression × compliance), ce qui représente 25% du volume courant d'un homme de 170 cm ventilé avec un volume de 400 ml (6 ml/kg). La plupart des ventilateurs de nouvelle génération ont intégré un algorithme qui permet de calculer et de compenser automatiquement ce volume. Cette fonction est indispensable car les ventilateurs qui ne font pas cette compensation délivrent un volume courant très inférieur au volume réglé, avec une marge d'erreur de plus de 20% [11]. Les modalités exactes de compensations sont perfectibles car des erreurs de l'ordre de 5 à 15% sont observées sur des ventilateurs pourtant récents. De plus, cette compensation est parfois optionnelle et doit être activée au démarrage (Tableau 1). C'est le ventilateur Galiléa (Hamilton, Rhodans, Suisse) qui permet l'ajustement le plus précis puisqu'il mesure et ajuste automatiquement le volume courant à la mesure faite par un capteur de débit situé au niveau de la sonde d'intubation. Exemples de ventilateurs qui ne compensent pas la compliance du circuit : Bird 8400, T-Bird (Viasys Healthcare, Conshohocken, PA, États-Unis), Savina, Evita 2 (Dräger, Lübeck, Allemagne), Servo 900C, Servo 300 (Maquet, Solna, Suède). En ventilation assistée contrôlée, le Servo I peut au contraire délivrer un volume courant supérieur au volume de consigne. L'objectif de cette fonction est d'éviter la sous-assistance et survient quand le patient fait

de grands efforts inspiratoires. Il en résulte une augmentation automatique du débit d'insufflation, mais aussi du volume courant qui peut être très supérieur au volume réglé. Cette approche pourrait présenter des avantages, mais aussi des risques, nécessitant que le clinicien soit bien informé de cette particularité de fonctionnement.

Performances en aide inspiratoire : *trigger* inspiratoire et montée en pression

La ventilation assistée en aide inspiratoire est de plus en plus utilisée, aussi bien en ventilation invasive pour le sevrage ventilatoire qu'en ventilation non invasive. Les performances du ventilateur (détection des efforts du patient et qualité de pressurisation et passage à l'expiration) peuvent avoir un impact majeur sur le confort et le travail respiratoire du patient [2]. Au cours de la ventilation assistée, le ventilateur doit rapidement détecter l'effort du patient (*trigger*), reconnu par une dépression et une différence de débit dans le circuit. Deux systèmes de *triggers* sont disponibles : les *triggers* basés sur la pression ou sur le débit. En pratique clinique, les *triggers* en débit sont plus sensibles que les *triggers* en pressions et permettent de réduire l'effort du patient [12]. Cependant, le travail respiratoire lié au *trigger* inspiratoire ne représente pas plus que 10 à 15% de l'effort du patient [12]. Par ailleurs, certains ventilateurs proposent un système mixte, combinant une première consigne en pression puis une consigne en débit (Dräger, Lübeck, Allemagne). La performance du *trigger* peut être évaluée de façon standardisée en mesurant certains critères dans des conditions variées mais standardisées et reproductibles (délai de *trigger* et temps de réponse) (Fig. 1A). La

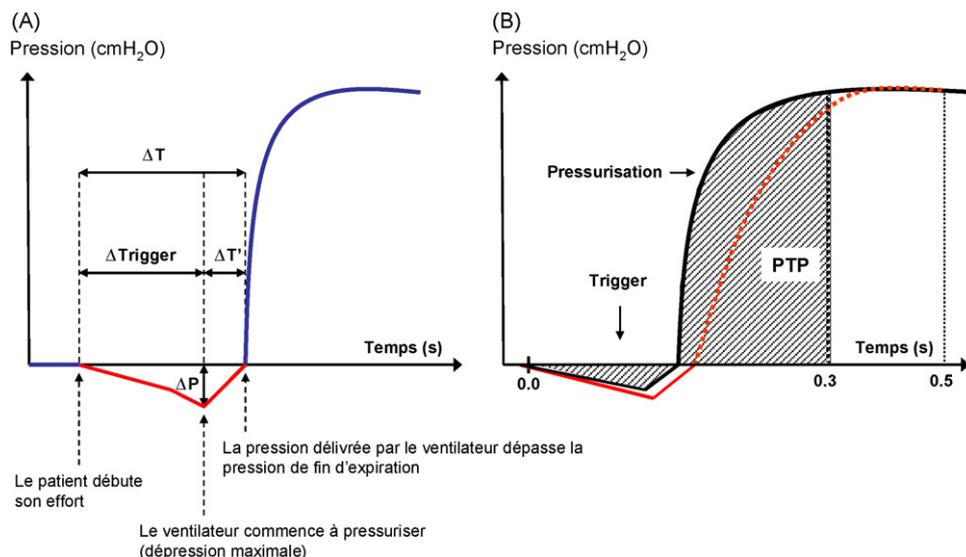


Figure 1 A Qualité du *trigger* inspiratoire. À gauche, signal de pression qui montre le temps de réponse du ventilateur lors d'un cycle assisté en aide inspiratoire. Il existe un délai (Δ *trigger*) entre le début de l'effort et la dépression maximale (ΔP), puis un délai pour que la pression devienne positive ($\Delta T'$). Le temps de réponse représente le temps pendant lequel la pression reste négative (ΔT). Le *trigger* est d'autant plus performant (sensible) que le Δ *trigger* est court et que le ΔP est faible. B Qualité de l'aide inspiratoire. Signal de pression en fonction du temps. Le calcul de l'intégrale du signal de pression en fonction du temps (PTP) représente la quantité d'assistance reçue par le patient (partie hachurée) et donc la qualité de la pressurisation. Plus la valeur est élevée et plus la pressurisation du ventilateur est efficace. Le signal de pression en rouge représente un ventilateur moins performant qui délivre une assistance insuffisante.

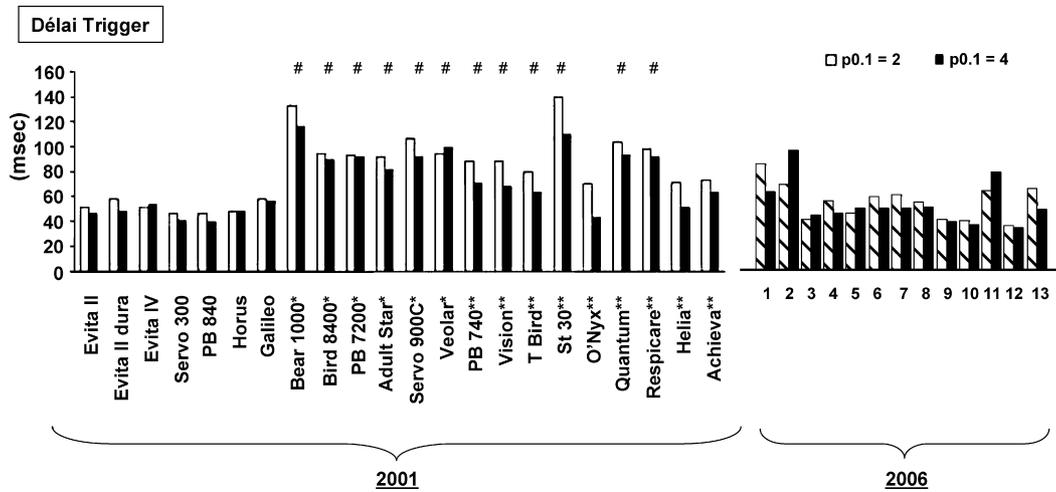


Figure 2 Comparaison du *trigger* inspiratoire (appel d'offre AP–HP 2002 vs. 2006). Valeur moyenne du temps de *trigger* avec deux niveaux d'efforts (effort faible en blanc et fort en noir). Les ventilateurs proposés pour l'appel d'offre 2002 sont placés à gauche et ceux proposés pour l'appel d'offre 2006 sont placés à droite. On remarque une grande hétérogénéité parmi tous les ventilateurs testés avec un temps de *trigger* de l'ordre de 50 ms pour les ventilateurs les plus performants et supérieur à 100 ms pour les ventilateurs moins sensibles. Il existe une amélioration globale du *trigger* bien que les valeurs de *trigger* actuelles restent identiques aux meilleurs de l'époque.

plupart des ventilateurs modernes sont capables de générer un débit positif et une pression supérieure à la pression de fin d'expiration en moins de 100 ms [1, 13]. Les résultats restent cependant relativement hétérogènes d'un ventilateur à l'autre (Fig. 2).

Après avoir détecté l'effort du patient, le ventilateur doit rapidement atteindre sa pression de consigne. Plusieurs études cliniques ont montré que la pente de montée en pression (temps pour atteindre la pression réglée) influençait fortement l'effort du patient [2–6]. Mancebo et al. ont comparé le travail respiratoire chez des patients ventilés avec trois ventilateurs successifs. Malgré un niveau de pression identique en aide inspiratoire, l'effort inspiratoire était très différent selon le ventilateur [2]. Plus le ventilateur atteint rapidement sa pression de consigne (qualité de pressurisation) et plus l'effort du patient est réduit (Fig. 1B).

Résultats des études comparatives

Les principaux ventilateurs de réanimation ont été testés dans le cadre d'une collaboration avec le groupe de travail des respirateurs de l'AP–HP. Les résultats de cette étude comparative ont été publiés en 2002 [1]. Vingt-deux ventilateurs disponibles à cette époque étaient testés sur banc d'essai avec deux tests principaux : qualité du *trigger* (délai du déclenchement) et qualité de la pressurisation. Cette étude avait permis de distinguer deux groupes de ventilateurs : les ventilateurs d'ancienne génération (disponibles avant 1993) et les ventilateurs de nouvelle génération qui présentaient des performances nettement supérieures (après 1993). En effet, le délai de *trigger* était d'environ 50 à 80 ms alors qu'il dépassait 100 ms pour les ventilateurs les plus anciens. Concernant la pressurisation, les anciens ventilateurs étaient souvent pris à défaut lors d'un effort important et le ventilateur était incapable de délivrer une pression positive pendant les 300 premières millisecondes. Une troisième catégorie de ventilateurs, qui présentaient

des performances proches des ventilateurs de dernière génération, comprenaient ceux qui fonctionnaient au moyen d'une turbine et destinés, soit à la réanimation, soit au domicile.

Dans le cadre d'un nouvel appel d'offre de l'AP–HP, tous les ventilateurs proposés pour la réanimation et des salles de réveil ont été testés en 2006 [14] (Figs. 2 et 3). Ces nouveaux tests montrent qu'une majorité des ventilateurs d'aujourd'hui présentent des performances élevées avec des temps de réponse inférieurs à 100 ms quel que soit le type d'effort (Fig. 2). Cependant, deux remarques peuvent être formulées au vu de ces tests. Premièrement, les meilleures performances observées en 2006 ne sont pas supérieures à celles observées en 2001. Un temps de *trigger* d'environ 50 ms semble représenter la limite technologique actuelle. Deuxièmement, les performances sont globalement satisfaisantes mais les résultats sont encore hétérogènes et certains ventilateurs ne répondent pas aux exigences souhaitées, avec notamment des temps de réponse supérieurs à 100 ms ou des qualités de pressurisation insuffisantes (Fig. 3). Tous les ventilateurs de réanimation testés pour le dernier appel d'offre de l'AP–HP (2006) sont listés dans le Tableau 1.

Ces tests sur banc d'essai ont été réalisés pour d'autres types de ventilateurs. Les ventilateurs de domicile ont aussi été testés et comparés avec des ventilateurs de réanimation [13, 15, 16]. Ces évaluations retrouvent des résultats également très hétérogènes : certains présentent des performances proches des ventilateurs de réanimation avec notamment des temps de réponse inférieurs à 100 ms [13, 16], alors que d'autres ventilateurs ont des qualités de pressurisation insuffisantes pour faire face à une détresse respiratoire [15, 16].

Les nouveaux ventilateurs d'anesthésie récemment développés permettent une ventilation en aide inspiratoire. Les tests retrouvent des performances très proches de celles des ventilateurs de réanimation [17].

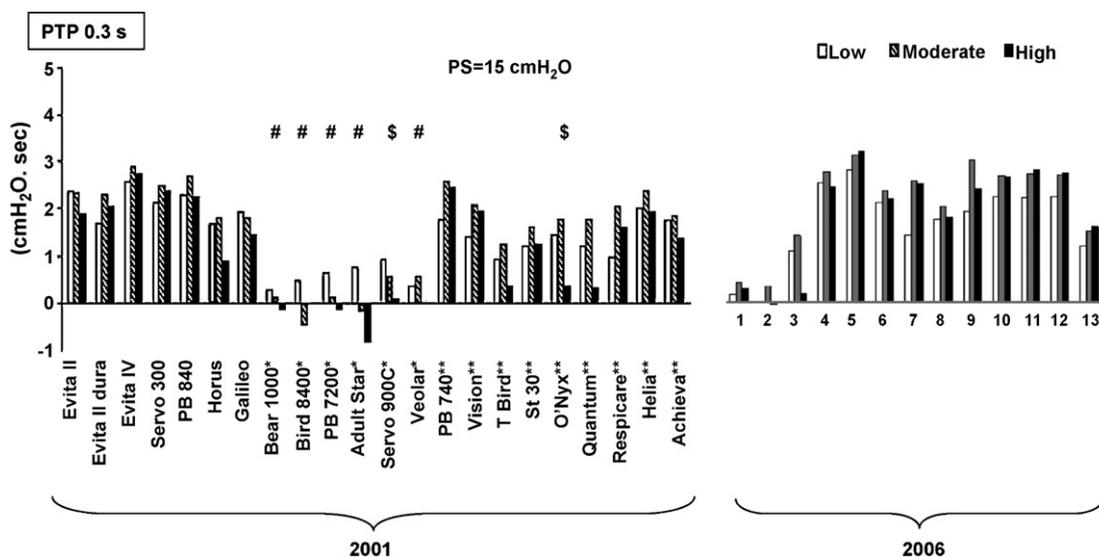


Fig. 3 Comparaison de la qualité d'aide inspiratoire (appel d'offre AP-HP 2002 vs. 2006). Valeur moyenne du produit pression temps (PTP) pour trois niveaux d'efforts (effort faible en blanc et fort en noir). Les ventilateurs proposés pour l'appel d'offre 2002 sont placés à gauche et ceux proposés pour l'appel d'offre 2006 sont placés à droite. On remarque une grande hétérogénéité parmi tous les ventilateurs testés avec notamment certains ventilateurs qui présentent des valeurs négatives : la pressurisation est insuffisante et reste négative 300 ms après le début de l'effort du patient. Il existe cependant une amélioration globale de la pressurisation et certains ventilateurs ont encore augmenté leurs performances.

Pour les ventilateurs dits de transport, les ventilateurs adaptés pour le transport intrahospitalier ont des performances comparables aux ventilateurs fixes, mais ceux destinés au transport extrahospitalier présentent des performances très inférieures [18]. Cependant, les constructeurs proposent maintenant dans cette indication des ventilateurs à turbine, avec des performances identiques aux ventilateurs de réanimation (exemple : Elisée 250 ou 350, Resmed-Saime, North Ryde, Australie).

Mode VNI

Le problème spécifique de la ventilation non invasive (VNI) est lié à la présence de fuites autour du masque, qui provoque un inconfort et des asynchronies. En effet, deux asynchronies sont directement liées aux fuites : les inspirations prolongées (fuites inspiratoires) [19] et les auto-déclenchements (fuites expiratoires). Certains ventilateurs de nouvelle génération proposent un mode spécifique pour

Tableau 2 Modes spécifiques pour la ventilation non invasive.

Nom des ventilateurs	Mode VNI	Trigger expiratoire	Ti maximal (s)	Trigger inspiratoire
Savina	Oui	Automatique	0,2–10	Débit (1–15 L/min)
Evita 4-Evita XL	Oui	Automatique	0,1–10	Débit (0,3–15 L/min)
Servo I-Servo S	Oui	1–70 %	Non	Automatique
PB 840	Non	1–80 %	Non	Débit (0,2–20 L/min) Pression (0,1–20 cm H ₂ O)
Vela	Non (compensation fuites)	5–40 %	0,3–3	Débit (1–8 L/min)
Avea	Non (compensation fuites)	5–45 %	0,2–5	Débit (0,1–20 L/min)
Elisée 350	Oui	Automatique 10–90 %	1–3	Automatique
Extend	Oui	1–70 %	0,3–3,5	Pression (0,1–5 cm H ₂ O)
Galiléo	Non (compensation fuites)	5–70 %	0,1–3	Débit (0,5–15 L/min) Pression (0,5–10 cm H ₂ O)
Engström	Non (compensation fuites)	5–50 %	Non	Débit (1–9 L/min) Pression (0,25–10 cm H ₂ O)
Centiva	Non	20–90 %	Non	Débit (0,5–20 L/min)
Vision	Oui	Automatique	0,5–3	Automatique
Esprit	Oui	Automatique 10–45 %	0,1–10	Débit (0,5–20 L/min) Pression (0,1–20 cm H ₂ O)
E 500	Oui	Automatique 5–55 %	0,1–5	Débit (0,6–2 L/min) Pression (0–5 cm H ₂ O)

la VNI (Tableau 2). Les spécificités «VNI» peuvent être différentes d'un ventilateur à l'autre mais reposent essentiellement sur la détection et la compensation des fuites, l'utilisation d'un *trigger* plus ou moins automatique pour le début et/ou la fin de l'inspiration, mais touchent aussi à des possibilités plus larges concernant le réglage des alarmes. La détection des fuites permet d'adapter le seuil du *trigger* inspiratoire pour éviter les autodéclenchements et de limiter le temps d'insufflation pour éviter les inspirations prolongées. Les ventilateurs de domicile ont depuis longtemps intégré des logiciels adaptés à la VNI qui permettent d'obtenir des performances supérieures aux ventilateurs de réanimation en cas de fuites, notamment en termes de détection des efforts [20]. Cependant, les nouvelles générations de ventilateurs destinés à la réanimation ont intégré ces nouvelles fonctions qui pourraient favoriser la réussite de la VNI, permettant une meilleure synchronisation patient–ventilateur. Les performances de ces nouveaux modes VNI ont été comparées sur un banc d'essai en présence de fuites [21]. Les auteurs retrouvent des résultats divers, mais l'activation du mode VNI semble permettre une amélioration significative des performances de certains ventilateurs [21]. Néanmoins, l'appellation «mode VNI» n'est pas homogène et peut correspondre à diverses fonctions, telles que l'adaptation automatique des alarmes, la compensation des fuites, la possibilité de limiter le temps d'insufflation par un réglage plus large du *trigger* expiratoire ou du temps inspiratoire maximal ou la mise en route d'un *trigger* automatique (inspiratoire et/ou expiratoire). En aide inspiratoire, la plupart des nouveaux ventilateurs proposent un réglage du *trigger* expiratoire ou d'un temps inspiratoire maximal, afin de limiter les fuites inspiratoires. Un réglage optimal du temps

inspiratoire permet d'améliorer le confort, le travail respiratoire et la synchronisation patient–ventilateur aussi bien en ventilation non invasive qu'en ventilation invasive [22].

Nouveaux modes et nouvelles fonctions

Plusieurs types d'explorations physiologiques sont disponibles sur les nouveaux ventilateurs (Tableau 3). Avec certains, il est possible de réaliser des courbes pression–volume et de calculer simplement le volume alvéolaire recruté par la PEP. Sur d'autres, il est possible de mesurer la pression œsophagienne, qui permet, d'une part, de calculer précisément la compliance du poumon et de la paroi en ventilation contrôlée, et d'autre part, de calculer le travail respiratoire en ventilation assistée. Plus récemment, un nouveau ventilateur propose de mesurer la capacité résiduelle fonctionnelle par une méthode de dilution à l'azote faisant varier la FiO_2 de seulement 10%.

Plusieurs ventilateurs proposent des modes ventilatoires spécifiques. Le système Smartcare® permet une adaptation continue et automatique du niveau d'aide inspiratoire qui peut favoriser le sevrage de la ventilation [23]. L'objectif de ce mode est de maintenir le patient dans une zone de confort en fonction de sa fréquence respiratoire, son volume courant et sa PCO_2 [24]. L'*adaptive support ventilation* (ASV) détermine automatiquement la fréquence respiratoire et le volume courant optimal du patient à partir de sa constante de temps du système respiratoire. L'objectif est de réduire le travail respiratoire théorique et de minimiser la PEP intrinsèque [25]. La *proportional assist ventilation* (PAV) délivre un niveau d'aide proportionnelle à l'effort

Tableau 3 Exemples de nouvelles fonctions proposées sur quelques ventilateurs de réanimation.

Nom des ventilateurs	Modes ventilatoires et fonctions spéciales pour l'exploration ou le monitoring
Evita XL (Dräger)	Système automatisé Smartcare® pour le sevrage ventilatoire Ventilation assistée proportionnelle (PAV) Pression d'occlusion en continue Courbes pression–volume
SERVO I (Maquet)	<i>Neurally adjusted ventilatory assist</i> (électromyogramme diaphragmatique) Courbes pression–volume
PB 840 (Puritan Bennett)	Ventilation assistée proportionnelle avec mesure automatisée de la résistance et de la compliance (PAV+)
AVEA (Viasys)	Mesure de la pression œsophagienne et du travail respiratoire (système Bicare®) Mesure de la pression trachéale Courbes pression–volume
Engström Care station (General Electric)	Mesure de la capacité résiduelle fonctionnelle (CRF) Calorimétrie Courbes pression–volume Spirodynamique (relation pression alvéolaire–pression dynamique) Mesure de la pression trachéale
Extend (Taema)	Courbes pression–volume Mesure automatique de compliance et résistance
Galiléo (Hamilton)	<i>Adaptive support ventilation</i> (ASV) Courbes pression–volume (inspiratoire/expiratoire) avec possibilité de mesurer le recrutement alvéolaire induit par la PEP

du patient, basée sur la mesure de sa compliance et sa résistance. Ce mode permet d'améliorer la synchronisation patient-ventilateur et le travail respiratoire du patient [26,27]. Le système PAV+ disponible sur le PB 840 (Puritan Bennett, Carlsbad, CA, États-Unis) permet de plus une mesure automatisée et continue de la mécanique respiratoire facilitant probablement l'utilisation de ce mode complexe [28]. La *neurally adjusted ventilatory assist* (NAVA) est un nouveau mode ventilatoire d'assistance proportionnelle basé sur l'électromyogramme du diaphragme [29]. Le ventilateur détecte l'effort du patient à partir du signal électrique du diaphragme grâce à des électrodes placées sur une sonde gastrique d'alimentation. Ce mode pourrait améliorer la synchronisation patient-ventilateur mais aucune évaluation clinique n'est disponible à ce jour.

Conclusion

Le choix d'un ventilateur de réanimation peut dépendre de plusieurs critères tels que les performances techniques, l'ergonomie, la facilité d'utilisation, les outils de monitoring, les nouvelles fonctions d'exploration, sans oublier le coût et la fiabilité du matériel. Il est fondamental de pouvoir tester tous les ventilateurs de façon rigoureuse afin de vérifier l'absence de dysfonctionnement. Les tests sur banc d'essai permettent une comparaison standardisée des performances techniques et montrent une grande hétérogénéité des performances malgré une amélioration globale. Ces résultats, qui peuvent avoir un impact dans la prise en charge clinique, doivent être disponibles et mis à jour pour faciliter le choix des réanimateurs dans le cadre des appels d'offres.

Références

- [1] Richard JC, Carlucci A, Breton L, Langlais N, Jaber S, Maggiore S, et al. Bench testing of pressure support ventilation with three different generations of ventilators. *Intensive Care Med* 2002;28:1049–57.
- [2] Mancebo J, Amaro P, Mollo JL, Lorino H, Lemaire F, Brochard L. Comparison of the effects of pressure support ventilation delivered by three different ventilators during weaning from mechanical ventilation. *Intensive Care Med* 1995;21:913–9.
- [3] Bonmarchand G, Chevron V, Chopin C, Jusserand D, Girault C, Moritz F, et al. Increased initial flow rate reduces inspiratory work of breathing during pressure support ventilation in patients with exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease. *Intensive Care Med* 1996;22:1147–54.
- [4] Bonmarchand G, Chevron V, Menard JF, Girault C, Moritz-Berthelot F, Pasquis P, et al. Effects of pressure ramp slope values on the work of breathing during pressure support ventilation in restrictive patients. *Crit Care Med* 1999;27:715–22.
- [5] Chiumello D, Pelosi P, Croci M, Bigatello LM, Gattinoni L. The effects of pressurization rate on breathing pattern, work of breathing, gas exchange and patient comfort in pressure support ventilation. *Eur Respir J* 2001;18:107–14.
- [6] Chiumello D, Pelosi P, Taccone P, Slutsky A, Gattinoni L. Effect of different inspiratory rise time and cycling off criteria during pressure support ventilation in patients recovering from acute lung injury. *Crit Care Med* 2003;31:2604–10.
- [7] Georgopoulos D, Prinianakis G, Kondili E. Bedside waveforms interpretation as a tool to identify patient-ventilator asynchronies. *Intensive Care Med* 2006;32:34–47.
- [8] Grasso S, Terragni P, Mascia L, Fanelli V, Quintel M, Herrmann P, et al. Airway pressure-time curve profile (stress index) detects tidal recruitment/hyperinflation in experimental acute lung injury. *Crit Care Med* 2004;32:1018–27.
- [9] Alex CG, Fahey PJ, Tobin MJ. What a clinician should do when a patient fight the ventilator. In: Vincent JL, editor. *Update in intensive care medicine. Mechanical ventilation and weaning*. New York, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2003. p. 100–17.
- [10] Gonzalez-Bermejo J, Laplanche V, Hussein FE, Duguet A, Derenne JP, Similowski T. Evaluation of the user-friendliness of 11 home mechanical ventilators. *Eur Respir J* 2006;27:1236–43.
- [11] Lyazidi A, Richard JC, Thille AW, Besson O, Brochard L. How ICU ventilators compensate for compressed gas volume: a bench test [abstract]. *Intensive Care Med* 2007;33:S233.
- [12] Aslanian P, El Atrous S, Isabey D, Valente E, Corsi D, Harf A, et al. Effects of flow triggering on breathing effort during partial ventilatory support. *Am J Respir Crit Care Med* 1998;157:135–43.
- [13] Tassaux D, Strasser S, Fonseca S, Dalmas E, Jolliet P. Comparative bench study of triggering, pressurization, and cycling between the home ventilator VPAP II and three ICU ventilators. *Intensive Care Med* 2002;28:1254–61.
- [14] Lyazidi A, Galia F, Thille AW, Di Marco F, Rodriguez P, Brochard L. Performance of intensive care unit ventilators during pressure support ventilation mode: A bench study [abstract]. *Intensive Care Med* 2006;32:A0337.
- [15] Bunburaphong T, Imanaka H, Nishimura M, Hess D, Kacmarek RM. Performance characteristics of bilevel pressure ventilators: a lung model study. *Chest* 1997;111:1050–60.
- [16] Battisti A, Tassaux D, Janssens JP, Michotte JB, Jaber S, Jolliet P. Performance characteristics of 10 home mechanical ventilators in pressure-support mode: a comparative bench study. *Chest* 2005;127:1784–92.
- [17] Jaber S, Tassaux D, Sebbane M, Pouzeratte Y, Battisti A, Capdevila X, et al. Performance characteristics of five new anesthesia ventilators and four intensive care ventilators in pressure-support mode: a comparative bench study. *Anesthesiology* 2006;105:944–52.
- [18] Zanetta G, Robert D, Guerin C. Evaluation of ventilators used during transport of ICU patients – a bench study. *Intensive Care Med* 2002;28:443–51.
- [19] Calderini E, Confalonieri M, Puccio PG, Francavilla N, Stella L, Gregoretti C. Patient-ventilator asynchrony during noninvasive ventilation: the role of expiratory trigger. *Intensive Care Med* 1999;25:662–7.
- [20] Miyoshi E, Fujino Y, Mashimo T, Nishimura M. Performance of transport ventilator with patient-triggered ventilation. *Chest* 2000;118:1109–15.
- [21] Vignaux L, Tassaux D, Jolliet P. Performance of noninvasive ventilation modes on ICU ventilators during pressure support: a bench model study. *Intensive Care Med* 2007;33:1444–51.
- [22] Tassaux D, Gainnier M, Battisti A, Jolliet P. Impact of expiratory trigger setting on delayed cycling and inspiratory muscle workload. *Am J Respir Crit Care Med* 2005;172:1283–9.
- [23] Lellouche F, Mancebo J, Jolliet P, Roeseler J, Schortgen F, Dojat M, et al. A multicenter randomized trial of computer-driven protocolized weaning from mechanical ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 2006;174:894–900.
- [24] Dojat M, Harf A, Touchard D, Lemaire F, Brochard L. Clinical evaluation of a computer-controlled pressure support mode. *Am J Respir Crit Care Med* 2000;161:1161–6.
- [25] Tassaux D, Dalmas E, Gratadour P, Jolliet P. Patient-ventilator interactions during partial ventilatory support: a preliminary

- study comparing the effects of adaptive support ventilation with synchronized intermittent mandatory ventilation plus inspiratory pressure support. *Crit Care Med* 2002;30:801–7.
- [26] Giannouli E, Webster K, Roberts D, Younes M. Response of ventilator-dependent patients to different levels of pressure support and proportional assist. *Am J Respir Crit Care Med* 1999;159:1716–25.
- [27] Grasso S, Puntillo F, Mascia L, Ancona G, Fiore T, Bruno F, et al. Compensation for increase in respiratory workload during mechanical ventilation. Pressure-support versus proportional-assist ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 2000;161:819–26.
- [28] Kondili E, Prinianakis G, Alexopoulou C, Vakouti E, Klimathianaki M, Georgopoulos D. Respiratory load compensation during mechanical ventilation-proportional assist ventilation with load-adjustable gain factors versus pressure support. *Intensive Care Med* 2006;32:692–9.
- [29] Sinderby C, Navalesi P, Beck J, Skrobik Y, Comtois N, Friberg S, et al. Neural control of mechanical ventilation in respiratory failure. *Nat Med* 1999;5:1433–6.