

Quelle technique d'humidification pour la ventilation invasive et non invasive ?

Which Humidification Technology Should Be Used for Invasive and Noninvasive Ventilation?

F. Lellouche

Reçu le 23 août 2015 ; accepté le 27 octobre 2015
© SRLF et Lavoisier SAS 2015

Résumé L'humidification des gaz délivrés aux patients est toujours nécessaire au cours de la ventilation invasive (avec un niveau minimum d'humidité délivrée de 30 mgH₂O/l) et le plus souvent au cours de la ventilation non invasive (VNI) (il n'y a actuellement pas de recommandation claire sur le niveau d'humidité à délivrer). Les filtres humidificateurs et les humidificateurs chauffants peuvent être utilisés. Contrairement aux idées reçues, les humidificateurs chauffants ne sont pas toujours les plus performants pour humidifier les gaz. Il faut savoir que dans certaines situations (température élevée dans la pièce ou soleil direct sur l'humidificateur), les gaz délivrés peuvent être insuffisamment humidifiés, et il n'y a pas de monitoring de l'humidité proposé en routine actuellement. Les filtres humidificateurs ont des performances hygrométriques très hétérogènes, qu'il faut connaître avant de choisir un filtre pour humidifier les gaz. Leurs performances d'humidification sont réduites, principalement en cas d'hypothermie. Leur autre limite réside dans l'espace mort additionnel qui réduit l'élimination du CO₂, au cours de la ventilation contrôlée, en particulier dans les situations où la fréquence respiratoire est élevée et les volumes courants diminués (comme dans le syndrome de détresse respiratoire aiguë [SDRA]). Au cours de la ventilation spontanée, cet espace mort additionnel peut majorer le travail respiratoire qui doit être compensé par une augmentation de la pression d'aide inspiratoire, en particulier au cours des tests de sevrage. L'analyse des différentes données de la littérature nous fait recommander l'utilisation de filtres humidificateurs performants en première intention, en respectant les contre-indications (en particulier l'hypothermie). Les humidificateurs chauffants devraient être utilisés en cas de ventilation protectrice, en particulier au cours du SDRA.

Mots clés Ventilation mécanique · Systèmes d'humidification · Filtres humidificateurs · Humidité passive · Humidificateurs chauffants · Humidité active

Abstract Humidification of gases delivered to patients is always necessary during invasive mechanical ventilation (with a minimum humidity of 30 mg H₂O/l) and most often during noninvasive ventilation (there is currently no clear recommendation on the humidity level required in this situation). Heat and moisture exchangers (HME) and heated humidifiers (HH) can be used. Contrary to usual belief, HH are not always the most efficient to humidify gases. Clinicians should be aware that in some situations (high temperature in the room or sun directly on the humidifier), gases are not sufficiently humidified and there is no efficient monitoring of the moisture currently proposed routinely. Before choosing a HME to humidify the gases, the very heterogeneous humidity performance of the devices proposed on the market must be known. Their humidification performance is reduced mainly in case of hypothermia. Their other limitation is the additional dead space that reduces CO₂ elimination during controlled mechanical ventilation, especially in situations where the respiratory rate is high and the tidal volumes low (as in acute respiratory distress syndrome, ARDS). During spontaneous ventilation, this additional dead space may increase the respiratory work of breathing. This may be compensated by an increase in pressure support levels especially during weaning tests. Based on the analysis of the various data in the literature, we recommend the use of HME as first-line, following the contra-indications (especially hypothermia). The heated humidifiers should be used in case of protective ventilation, especially in ARDS.

F. Lellouche (✉)

Centre de recherche de l'Institut universitaire de cardiologie et de pneumologie de Québec, 2725, chemin Sainte-Foy, Québec G1V 4G5, Ville de Québec, Canada
e-mail : francois.lellouche@cricupq.ulaval.ca

Keywords Mechanical ventilation · Humidification devices · Heat and moisture exchangers · Passive humidification · Heated humidifiers · Active humidification

Introduction

Le choix du système d'humidification peut influencer la qualité de la prise en charge des patients au cours de la ventilation mécanique [1,2]. Les principaux systèmes d'humidification que nous discuterons sont les filtres humidificateurs (ou échangeurs de chaleur et d'humidité) et les humidificateurs chauffants. Ces deux systèmes sont apparus il y a environ 60 ans, à un an d'intervalle immédiatement après les débuts de la ventilation mécanique moderne, et ils restent encore aujourd'hui les principales méthodes d'humidification au cours de la ventilation mécanique [3]. D'autres systèmes ont été proposés, comme les filtres « actifs », mais leur intérêt est incertain [4]. Actuellement, les filtres humidificateurs et les humidificateurs chauffants sont utilisés de manière hétérogène selon les régions du monde [5]. Si leur utilisation a pu obéir à des modes, un choix rationnel fondé sur la connaissance des avantages et des limites de chacun de ces systèmes dans les différentes situations cliniques est possible. La principale fonction des systèmes d'humidification est de réchauffer et d'humidifier les gaz délivrés aux patients sous ventilation mécanique, et les performances d'humidification varient beaucoup en fonction des systèmes et des conditions d'utilisation. Par ailleurs, du fait de la différence d'espace mort qui existe entre les filtres humidificateurs et les humidificateurs chauffants, ces systèmes peuvent influencer les échanges gazeux au cours de la ventilation contrôlée, comme cela a été montré au cours de la ventilation du syndrome de détresse respiratoire aiguë (SDRA) [6–10]. Au cours de la ventilation assistée, la différence d'espace mort aura principalement un impact sur la fréquence respiratoire, la ventilation minute et le travail respiratoire, mais aussi sur les échanges gazeux (comme au cours de la ventilation non invasive (VNI) [11–13] ou au cours du sevrage ventilatoire [14]). Ce sont ces principaux aspects (différences des performances d'humidification et impact de l'espace mort) que nous aborderons ici. D'autres questions qui ont alimenté les débats seront abordées plus brièvement, en particulier les controverses, avec beaucoup d'idées reçues maintenant démenties, sur les risques de pneumopathies associées aux humidificateurs ou l'impossibilité d'utiliser les filtres humidificateurs pour des durées prolongées.

Performances d'humidification

Rationnel physiologique. Pourquoi faut-il humidifier les gaz délivrés au cours de la ventilation mécanique ?

Au cours de la ventilation invasive

Magendie aurait été le premier en 1829 à évoquer le rôle des voies aériennes supérieures dans le réchauffement et l'humidification des gaz inspirés, et de nombreuses études physiologiques ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de l'humidification des gaz en ventilation spontanée et au cours de la ventilation mécanique invasive [15–25]. Une synthèse des principales données a été faite dans une revue sur l'humidification il y a plus de 40 ans [25], et ces données n'ont pas été remises en cause. Les voies aériennes supérieures, qui humidifient et réchauffent les gaz en ventilation spontanée, sont court-circuitées au cours de la ventilation mécanique invasive (Fig. 1). Les toutes premières descriptions des effets de la sous-humidification des gaz sont apparues dès les débuts de la ventilation mécanique moderne, qui sont généralement associés aux grandes épidémies de polio-myélite [26,27]. Dès 1950, Heyden montrait une hyperréactivité des cellules productrices de mucus chez des patients trachéotomisés [28]. Rapidement après ces descriptions, plusieurs auteurs proposaient d'humidifier les gaz délivrés aux patients trachéotomisés pour éviter ces problèmes [29–33].

Burton fut le premier à décrire la possibilité de lésions de l'arbre bronchique lors de l'intubation endotrachéale [34]. Sur des données animales et des descriptions cliniques, il montrait clairement que des lésions bronchiques (en particulier de la fonction mucociliaire) pouvaient intervenir même après quelques heures seulement de ventilation mécanique avec des gaz secs. De même, il montrait que l'utilisation de gaz réchauffés et humidifiés (35 à 37 °C et saturés) permettait d'éviter ces lésions. On sait maintenant que plusieurs types de lésions peuvent survenir en cas d'humidification insuffisante des voies aériennes au cours de la ventilation mécanique : destruction ciliaire, desquamation des cellules épithéliales bronchiques, ulcération de la muqueuse

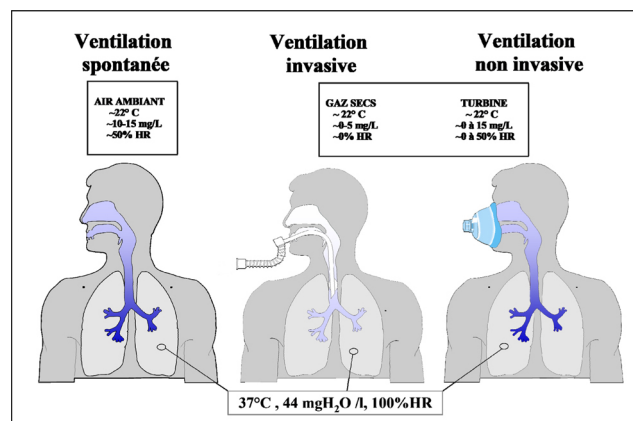


Fig. 1 Température et hygrométrie des gaz inspirés lors de la ventilation spontanée (air ambiant) et de la ventilation mécanique invasive ou non invasive (air sec en cas de ventilateur de réanimation ou intermédiaire si un ventilateur à turbine est utilisé). Dans tous les cas, le gaz arrive dans les alvéoles pulmonaires à la température corporelle (ici 37 °C) et saturé en vapeur d'eau (ce qui correspond à une humidité absolue de 44 mgH₂O/l). HR : humidité relative

bronchique avec comme conséquences une atteinte de la fonction mucociliaire, une augmentation de la viscosité du mucus, une augmentation de la résistance des voies aériennes, une diminution de la compliance pulmonaire et des atelectasies [35–39]. Chez des patients sous ventilation mécanique prolongée, il a été montré que l'utilisation d'un filtre hydrophobique (ayant de faibles performances d'humidification) entraînait un risque important d'occlusion de la sonde d'intubation. Dans les études où un filtre hydrophobique était utilisé (BB2215, Pall Ultipor), la fréquence des occlusions de sondes était de 10 à 20 % [40–44]. Il s'agit de complications graves, potentiellement mortelles. Kapadia et al. ont rapporté une série de 13 occlusions de sondes sur une période de trois ans, dont plus de la moitié avaient entraîné un arrêt cardiocirculatoire [45,46]. Probablement encore plus fréquentes, bien que difficiles à chiffrer, des subocclusions de sonde [44,47,48] peuvent augmenter de façon significative les résistances des sondes d'intubation [49], ce qui pourrait avoir un impact sur le sevrage de la ventilation. Dans une étude publiée récemment, Moran et al. ont évalué les résistances des sondes d'intubation avant et après utilisation chez des patients sous ventilation mécanique environ dix jours en moyenne (22 ayant été humidifiées avec un filtre et 22 avec un humidificateur chauffant) [49]. Les résistances étaient en moyenne augmentées de 53 % après utilisation, et ce de façon équivalente avec les filtres humidificateurs et avec les humidificateurs chauffants [49]. Chez plusieurs patients, les résistances des sondes d'intubation étaient plus que triplées avec les deux types d'humidification par rapport à l'état de base. Ces différentes complications (occlusions et subocclusions des sondes d'intubation) sont favorisées par des niveaux d'humidification des gaz insuffisants. Il faut donc bien connaître les performances des différents systèmes et ce qui les conditionne, compte tenu de l'impact clinique potentiellement important [40–49].

Au cours de la ventilation non invasive

La problématique de l'humidification des voies aériennes au cours de la VNI est moins évidente, puisque les voies aériennes ne sont pas court-circuitées (Fig. 1). Pour autant, les conditions respiratoires sous VNI ne sont pas identiques à celles de la respiration spontanée physiologique. Les débits respiratoires sont souvent plus élevés, avec un gaz beaucoup plus sec (en particulier en cas d'utilisation d'un ventilateur de soins intensifs), et les populations concernées par la VNI ont souvent une hyperréactivité bronchique [50–52] qui peut être majorée par les gaz secs [53–55]. L'effet des gaz secs sur la muqueuse bronchique est connu depuis longtemps [56,57], et les gaz secs tout comme la métacholine sont parfois utilisés pour déclencher une hyperréactivité bronchique [58]. Bien que le niveau optimal d'humidification nécessaire au cours de la VNI ne soit pas connu, il semble nécessaire

d'humidifier les gaz, au moins lorsque la VNI est délivrée avec des ventilateurs de soins intensifs (qui utilisent des gaz médicaux très secs) ou en cas d'utilisation d'un ventilateur à turbine avec une FiO_2 d'au moins 50 %, ou encore lorsque le patient se plaint de sécheresse des muqueuses lorsqu'un système d'humidification ne semblait pas a priori nécessaire (turbine avec FiO_2 basse).

Évaluation des performances des systèmes d'humidification dans la littérature. Recommandations actuelles pour les niveaux d'humidification au cours de la ventilation invasive

Chamney a défini en 1969 les conditions auxquelles devaient répondre les systèmes d'humidification utilisés chez les patients intubés ou trachéotomisés [25]. Parmi ces conditions, cet auteur recommandait que les gaz arrivent à la trachée entre 30 et 36 °C et dans la fourchette de 30 à 40 mgH₂O/l. Ces recommandations restent valables plus de 40 ans plus tard. Dans un éditorial de 1987, « A Rational Basis for Humidity Therapy », Chatburn et Primiano proposaient de délivrer des gaz saturés à 32–34 °C (33,9–37,7 mgH₂O/l), niveau d'hygrométrie auquel les gaz arrivent dans la trachée chez les sujets sains [59]. Il concluait dans le même éditorial qu'il n'existait pas de rationnel pour proposer de délivrer des gaz saturés à 37 °C.

Plusieurs sociétés et organismes différents ont donné des recommandations assez proches pour l'humidification des gaz. Le British Standards Institute a recommandé de délivrer une humidité absolue de 33 mgH₂O/l en 1970 [60]. En 1979, l'ANSI (American National Standards Institute) a recommandé un niveau minimum d'humidité délivrée pour les humidificateurs chauffants de 30 °C à 100 % d'humidité relative (ce qui correspond à 30,4 mgH₂O/l) [61]. Par ailleurs, l'AARC (American Association of Respiratory Care) recommande de délivrer un gaz à 30 mgH₂O/l et a étendu cette recommandation à l'ensemble des systèmes d'humidification [62]. La norme ISO 8185 recommande également 30 mg/l pour les systèmes d'humidification [63].

Évaluation des performances d'humidification au cours de la ventilation invasive

La littérature sur les performances d'humidification des différents systèmes d'humidification est riche. Elle comprend des études comparatives des systèmes d'humidification sur leurs capacités à réchauffer et à humidifier les gaz insufflés [64–66] (Tableau 1) et également beaucoup de données cliniques comparant les différents systèmes (Tableau 2). La mise en relation des données sur les performances d'humidification et les résultats cliniques donne un ensemble cohérent qui permet de comprendre les limites de chacun des

Tableau 1 Performances hygrométriques de l'ensemble des filtres et filtres humidificateurs représentés à l'appel d'offres de l'Assistance publique des Hôpitaux de Paris obtenues sur banc de mesure d'hygrométrie et données du fabricant pour les performances hygrométriques et l'espace mort. Le filtre BB2215 ne participait pas à cet appel d'offres mais a été testé sur le même banc au cours de la même période [65]

Dispositif	Fabricant	HA mesurée (mgH ₂ O/l)	HA fabricant (mgH ₂ O/l)	Espace mort fabricant (ml)
Hygrovent	Peters	31,9 ± 0,6	34,6	95
Hygrobac	Mallinckrodt	31,7 ± 0,7	32,7	95
Hygrovent S	Peters	31,7 ± 0,5	34,5	55
Hygrobac S	Mallinckrodt	31,2 ± 0,2	30,7	45
HMEF 1000	Datex	31,2 ± 0,7	33	77
9000/100	Allégiance	31,2 ± 1,4	33,8	90
Servo Humidifier 172 (173)	Siemens	30,9 ± 0,3	ND	ND
Humid Vent Filter Compact	Hudson	30,8 ± 0,3	31	35
All Round Filter MAP05	Peters	30,7 ± 0,2	30	89,5
Hygroster	Mallinckrodt	30,7 ± 0,6	32,8	95
Slimeline HMEF 9040/01	Sodis	30,3 ± 0,3	33	45
BACT HME	Ansell	30,1 ± 0,5	34,3	70
Filtraflux	Vygon	29,9 ± 0,9	31	22
HME 12 BASIC	Ansell	29,8 ± 0,4	33	81
Humid Vent 2	Hudson	29,7 ± 0,4	28	29
Servo Humidifier 162 (163)	Siemens	29,7 ± 0,8	ND	ND
FE52A	Rüsch	29,3 ± 0,4	ND	84
Humid Vent 2S	Hudson	29,2 ± 0,4	28	29
9040/01	Allégiance	28,6 ± 1,1	ND	47
9000/01	Allégiance	28,5 ± 0,8	31,4	90
Thermovent 1200	Sims	27,8 ± 0,0	ND	32
BB100E	Pall	27,2 ± 0,7	31	85
BB100	Pall	26,8 ± 0,5	31	90
Clear Therm+	Intersurgical	26,2 ± 2,1	32	52
Filta Therm	Intersurgical	24,9 ± 1,1	30	42
Stérivent	Mallinckrodt	23,8 ± 0,9	23,1	92
Iso Gard Hepa Light	Hudson	23,6 ± 0,3	25,8	80
Filtraflux	Vygon	22,4 ± 0,4	ND	ND
Stérivent S	Mallinckrodt	22,2 ± 0,2	21,2	62
BB 2215	Pall	21,8 ± 1,5	Hors appel d'offres	Hors appel d'offres
8222/01	Allégiance	20,5 ± 0,2	ND	74
Maxipleat	Sodis	20,1 ± 0,6	24,9	74
HME 10	Ansell	20,0 ± 0,6	28,9	27
BB25	Pall	19,6 ± 1,4	26	35
All Round Filter MAP01	Peters	19,0 ± 0,3	ND	70
BB2000AP	Pall	18,9 ± 0,4	26	35
BACT TRAP HEPA	Ansell	18,4 ± 0,7	ND	ND
Clear Therm Midi	Intersurgical	17,3 ± 0,3	23	24
Barr Vent	Peters	16,8 ± 1,1	ND	101
Stérivent Mini	Mallinckrodt	16,6 ± 1,0	17	35
4444/66	Allégiance	16,4 ± 0,6	ND	47
Filta Guard	Intersurgical	16,2 ± 1,0	ND	56
4000/01	Allégiance	15,1 ± 0,9	ND	38
Clear Guard II	Intersurgical	14,9 ± 0,6	ND	42

(Suite page suivante)

Tableau 1 (suite)

Dispositif	Fabricant	HA mesurée (mgH ₂ O/l)	HA fabricant (mgH ₂ O/l)	Espace mort fabricant (ml)
Clear Guard Midi	Intersurgical	13,7 ± 0,8	ND	24
ISO GUARD FILTER S	Hudson	13,4 ± 0,6	ND	26
Barr Vent S	Peters	13,3 ± 0,8	ND	37
Barrierbac S	Mallinckrodt	13,2 ± 0,2	ND	35

HA : humidité absolue ; ND : non disponible.

principaux systèmes et de nuancer certaines idées communément admises [65].

Concernant les propriétés d'humidification, les humidificateurs chauffants sont souvent considérés comme étant plus efficaces. Certains auteurs [40–44,67] ont mis en évidence une fréquence plus élevée d'obstruction des sondes d'intubation avec les filtres humidificateurs. Mais il s'agissait toujours de filtres hydrophobiques ayant des performances d'humidification insuffisantes (environ 21 mgH₂O/l selon la référence [68]), qui ne devraient plus être utilisés. Cette faible efficacité est généralement vraie pour la plupart des filtres hydrophobiques. Il a pourtant été montré récemment que certains filtres hydrophobiques avaient des performances équivalentes aux filtres mixtes (hydrophobiques et hygroscopiques) [69,70]. Avec des filtres de dernière génération, plus performants, la fréquence des occlusions de sondes est bien moindre [71–75]. Si l'on exclut les filtres hydrophobiques, la fréquence des occlusions de sonde rapportées dans la littérature est moins importante avec les filtres humidificateurs qu'avec les humidificateurs chauffants (Tableau 2). Dans la littérature, les cas d'occlusion de sondes avec les humidificateurs chauffants sont plus rares qu'avec les filtres hydrophobiques [40,42,47,75–77]. En revanche, si l'on exclut les études concernant le filtre BB2215, le nombre d'occlusions était légèrement plus faible avec les filtres humidificateurs (0,4 vs 1,1 %) (Tableau 2). Dans les études ayant rapporté des occlusions de sonde avec les humidificateurs chauffants, il s'agissait le plus souvent d'humidificateurs chauffants avec fils chauffants [47,75,76]. À l'inverse des filtres, les humidificateurs chauffants de dernière génération semblent avoir des taux d'occlusions plus importants que les humidificateurs de la génération précédente [47,75]. Dans l'étude de Jaber et al., comparant l'évolution du diamètre interne des sondes d'intubation par la méthode acoustique entre les humidificateurs chauffants avec fils chauffants et des filtres mixtes (hydrophobiques et hygroscopiques), les occlusions de sondes étaient de 2/34 (5,8 %) avec les humidificateurs et de 1/26 (3,8 %) avec les filtres humidificateurs [47]. Avec un plus gros collectif de patients, dans l'étude publiée par Lacherade et al. où le taux de pneumopathies acquises sous ventilation était comparé entre les

filtres humidificateurs et les humidificateurs chauffants de dernière génération avec fils chauffants, les occlusions étaient plus fréquentes avec les humidificateurs chauffants qu'avec des filtres mixtes sans que cette différence soit néanmoins significative. En effet, la fréquence des obstructions de sonde était de 1/185 dans le groupe des filtres (0,5 %) et de 5/184 dans le groupe humidificateur chauffant (2,7 %) [$p = 0,12$] [75]. Une autre étude a rapporté sept cas d'occlusion de sonde avec des humidificateurs chauffants avec fils chauffants (MR 600). Les auteurs déclaraient dans ce papier ne plus avoir de problème d'occlusion après un retour aux humidificateurs chauffants sans fils chauffants [76]. Ces résultats ne sont pas surprenants au regard des résultats des évaluations sur banc démontrant de très mauvaises performances d'humidification des humidificateurs avec fils chauffants dans certaines conditions d'utilisation [66] (lorsque la température dans la chambre d'humidification est élevée : lorsqu'il fait chaud dans la pièce, lorsque le soleil tape directement sur l'humidificateur ou avec certains ventilateurs délivrant des gaz chauds). Avec les améliorations technologiques reliées aux systèmes de compensation [66], ces problèmes devraient être moins fréquents.

En revanche reste le problème, moins grave pour les patients, des obstructions (ou occlusions partielles) des filtres par des sécrétions. Lorsque les filtres étaient surélevés au-dessus de la sonde d'intubation pour limiter le passage des sécrétions dans le filtre, ce risque était de 10 % dans l'étude de Ricard et al. malgré une durée d'utilisation prolongée des filtres jusqu'à sept jours [74]. Lorsqu'aucune précaution n'était prise, le remplacement des filtres secondaires à une obstruction était de 15 % dans l'étude de Kollef et al. [78] où les filtres étaient utilisés sept jours. Dans l'étude de Davis et al. où il n'y avait pas non plus de précaution spécifique, la fréquence de ces occlusions partielles était de 3 % lorsque les filtres étaient changés toutes les 24 heures et de 9 % lorsque les filtres étaient changés tous les cinq jours [69]. Il est néanmoins difficile de comparer les résultats de l'étude de Davis avec les études de Kollef et al. et de Ricard et al. étant donné la durée d'utilisation différente des filtres dans ces études. Autre donnée intéressante de l'étude de Davis et al., les résistances de 12 filtres partiellement occlus

Humidificateurs chauffants							Filtres humidificateurs			
Étude [référence]	Système utilisé	Nombre de patients/nombre d'occlusions	Pourcentage d'occlusions	Système utilisé	Nombre de patients/nombre d'occlusions	Pourcentage d'occlusions	Humidité Absolue (psychrométrie)			
Cohen et al. [40]	Cascade	81/1	1,2	BB2215	170/15	8,8	21,8			
Martin et al. [41]	HHBW (32 °C)	42/0	0,0	BB2215	31/6	19,4	21,8			
Misset et al. [42]	MR 450 (32–34 °C)	26/2	7,7	BB2215	30/4	13,3	21,8			
Roustan et al. [43]	Aquapor (31–32 °C)	61/0	0,0	BB2215	55/9	16,4	21,8			
Branson [113]	Conchaerm III (32–34 °C)	32/0	0,0	Aqua+	88/0	0,0	ND			
Dreyfuss et al. [72]	MR 450	70/0	0,0	Hygrobac	61/1	1,6	31,7			
Villafane et al. [44]	MR 310 (32 °C)	7/1	14,3	BB2215	8/3	37,5	21,8			
				Hygrobac	8/0	0,0	31,7			
Boots et al. [119]	MR 730 (37/35)	41/0	0,0	Humid Vent Light	75/0	0,0	30,8			
Hurni et al. [77]	F&P (32 °C)	56/1	1,8	Hygroster	59/0	0,0	30,7			
Kirton et al. [85]	Marquest	140/1	0,7	BB100	140/0	0,0	26,8			
Kollef et al. [78]	MR 730 (35–36)	147/0	0,0	Duration	163/0	0,0	ND			
Thomachot et al. [127]	Cascade 2 (32 °C)	20/0	0,0	Humid Vent Light	9/0	0,0	30,8			
Jaber et al. [47]	MR 730 (37/40)	34/2	5,9	Hygrobac	26/1	3,8	31,7			
Lacherade et al. [75]	MR 730 (37/40)	185/5	2,7	Hygrobac	185/1	0,5	31,7			
Boots et al. [115]	MR 730 (37/40 ou 37/35)	191/0	0,0	Humid Vent Light	190/0	0,0	30,8			
	Total	1 133/13	1,1	Total 1	1298/40	3,1				
Thomachot et al. [86]				Total 1 (hors BB2215)	814/3	0,4				
				Humid Vent Light	66/1	1,5	30,8			
Thomachot et al. [143]				BB100	70/1	1,4	26,8			
				Humid Vent	77/1	1,3	30,8			
Boisson et al. [129]				Clear Therm	63/0	0,0	26,2			
Davis et al. [69]				Maxipleat	12/0	0,0	20,1			
				Aqua + (24 h)	100/0	0,0	ND			
				Duration (120 h)	60/0	0,0	ND			
				Aqua + (120 h)	60/0	0,0	ND			
Markowicz et al. [73]				Hygrobac	21/0	0,0	31,7			
				Humid Vent	20/0	0,0	30,8			

(Suite page suivante)

Tableau 2 (suite)								
Humidificateurs chauffants					Filtres humidificateurs			
Étude [référence]	Système utilisé	Nombre de patients/nombre d'occlusions	Pourcentage d'occlusions	Système utilisé	Nombre de patients/nombre d'occlusions	Pourcentage d'occlusions	Humidité Absolue (psychrométrie)	
Ricard et al. [74]				Clear Therm	20/0	0,0	26,2	
				Hygrobac	33/0	0,0	31,7	
Thomachot et al. [87]				Thermovent Hepa+ (1 j)	84/0	0,0	27,8	
				Thermovent Hepa+ (7 j)	71/0	0,0	27,8	
Boyer et al. [70]				Edithflex	22/0	0,0	ND	
				Hygrolife	21/0	0,0	ND	
				Total 2	800/3	0,4		
				Total 1 + 2	2 098/43	2,0		
				Total 1 + 2 (hors BB2215)	1 614/6	0,4		
ND : non disponible.								

ont été mesurées [69]. Celles-ci passaient en moyenne de 1,1 avant utilisation à 2,8 cmH₂O/l par seconde. Les résistances les plus élevées concernaient deux cas d'occlusion partielle par des sécrétions hémorragiques où les résistances passaient de 0,85 avant utilisation à 5,8 cmH₂O/l par seconde.

L'utilisation concomitante d'un filtre humidificateur avec un humidificateur chauffant qui semble être plus fréquente que l'on pourrait penser n'est jamais recommandée et peut être dangereuse [79] !

Facteurs influençant les différents systèmes d'humidification au cours de la ventilation invasive

Les humidificateurs chauffants avec fil chauffant (ceux actuellement utilisés le plus souvent) sont soumis à l'influence de facteurs extérieurs comme la température ambiante et la température de sortie de ventilateur [66]. Dans certaines situations défavorables (température ambiante élevée et température de sortie de ventilateur élevée), ces systèmes délivrent une humidité absolue inférieure à 20 mgH₂O/l, ce qui entraîne une humidification très insuffisante et un risque important d'occlusion de sondes pour les patients (Fig. 2). Nous avons démontré que ces performances insuffisantes étaient en rapport avec le système de régulation complexe des humidificateurs de dernière génération fondé sur la température à la sortie de la chambre d'humidification, les performances étant inversement proportionnelles à la température d'entrée de chambre d'humidification (Fig. 3). Plus la température d'entrée de chambre est élevée, et moins la plaque chauffante va chauffer, ce qui va réduire les performances d'humidification. Les améliorations technologiques des humidificateurs chauffants de dernière génération ont permis de compenser en partie ce problème [66]. De même, de nouveaux humidificateurs chauffants ayant des principes de fonctionnement originaux (humidificateurs à contre-courant) semblent plus performants et stables [80].

Nous avons évalué les performances d'humidification de 48 **filtres humidificateurs** [65]. Cette évaluation indépendante, la plus large réalisée à ce jour, a permis de démontrer :

- une hétérogénéité majeure dans les performances d'humidification de ces systèmes ;
- une différence parfois importante avec les données fournies par les constructeurs, ce qui suggère qu'une évaluation indépendante de ces dispositifs médicaux est souhaitable (Tableau 1).

Certains auteurs avaient évoqué de moins bonnes performances en cas de ventilation minute élevée, mais ces données étaient obtenues avec des filtres humidificateurs peu performants, alors qu'avec des filtres plus performants, l'humidification des gaz était maintenue, même avec des ventilations minutes élevées [81–83]. Nous avons montré

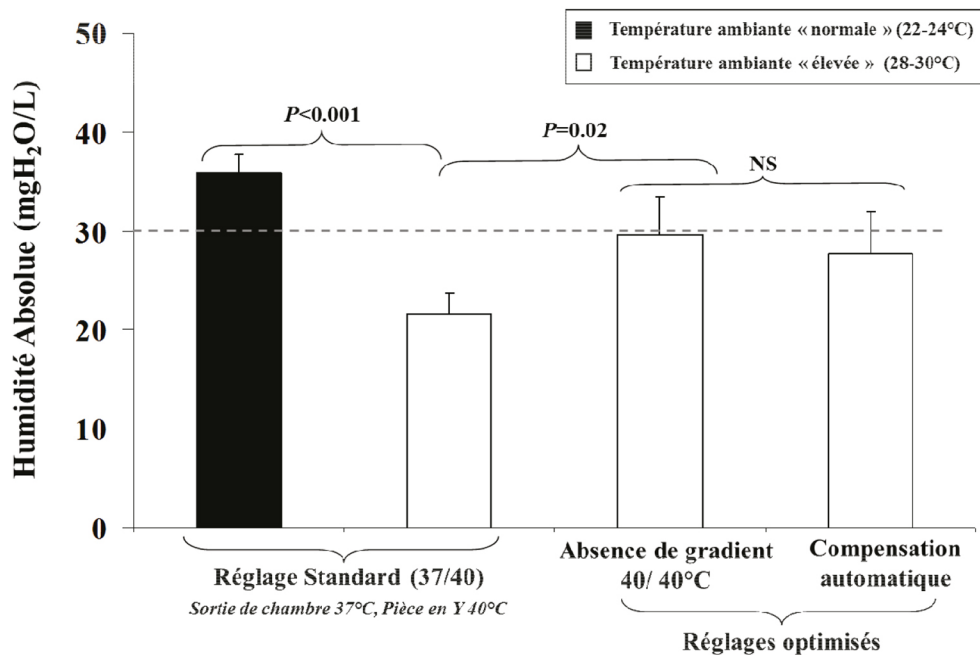


Fig. 2 Impact de la température ambiante sur les performances (humidité absolue inspiratoire) des humidificateurs chauffants avec fils chauffants. Avec le réglage standard, les performances de ces systèmes sont significativement diminuées lorsque la température ambiante est élevée en comparaison avec une température ambiante normale (barre en noir). Les réglages optimisés améliorent partiellement les performances. La ligne horizontale en pointillé représente la limite inférieure de l'humidité absolue des gaz inspiratoires recommandée pour la ventilation mécanique invasive (30 mgH₂O/l) (modifié d'après [66])

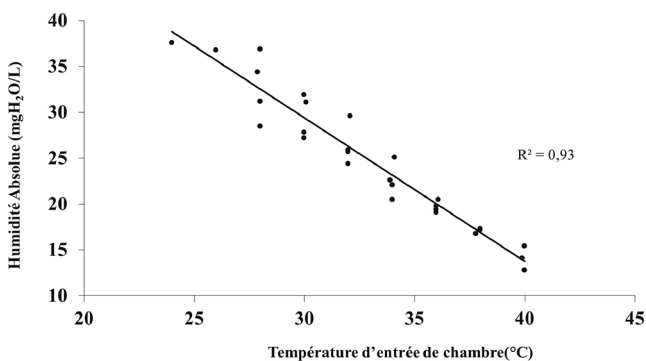


Fig. 3 Humidité absolue délivrée par les humidificateurs chauffants en fonction de la température d'entrée de chambre d'humidification, les autres conditions (en particulier les réglages ventilatoires) étant stables. L'humidité absolue délivrée par les humidificateurs chauffants avec fils chauffants est inversement proportionnelle à la température d'entrée de chambre (modifié d'après [66])

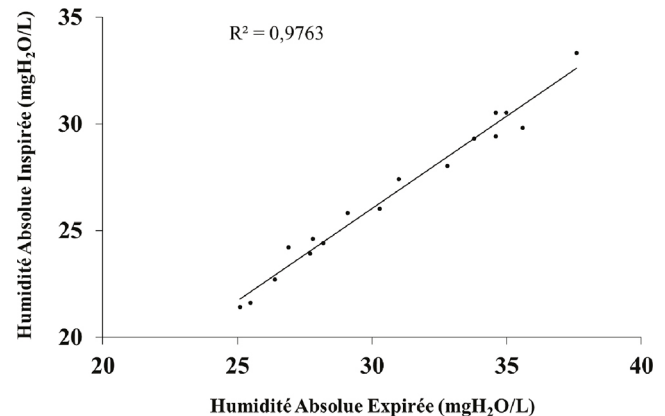


Fig. 4 Humidité absolue délivrée par les filtres humidificateurs en fonction de l'humidité absolue expiratoire. Il existe une forte corrélation entre l'humidité absolue inspirée (mgH₂O/l) en fonction de l'humidité expirée avec les filtres humidificateurs (modifié d'après [84])

récemment que ni la température ambiante ni la ventilation minute n'influençaient les performances des filtres humidificateurs de dernière génération [4]. Par ailleurs, compte tenu de leur principe de fonctionnement, qui dépend beaucoup de l'humidité expirée (Fig. 4), les filtres humidificateurs sont moins efficaces au cours de l'hypothermie [84]. Dans cette étude, il était montré que les humidificateurs pouvaient déli-

vrer des gaz avec un contenu en eau supérieur au contenu maximum aux températures rencontrées au cours de l'hypothermie thérapeutique. Cela entraînait un risque théorique de condensation des gaz dans les voies aériennes des patients [84]. Il n'existe cependant pas assez de données cliniques sur l'impact des différents systèmes d'humidification au cours de l'hypothermie. En cas de température corporelle

inférieure à 35 °C, il reste recommandé de ne pas utiliser de filtre humidificateur [1,2].

Il faut donc savoir que certains systèmes d'humidification présentent un risque réel de sous-humidification pour les patients (filtres hydrophobiques peu performants et humidificateurs chauffants avec fils chauffants et sans système de compensation en cas de température ambiante élevée). Ces systèmes devraient être évités.

L'ensemble de nos évaluations hygrométriques et la comparaison avec les données de la littérature nous ont permis d'estimer le niveau optimal souhaitable pour les patients sous ventilation invasive (Fig. 5). Le niveau minimum de 30 mgH₂O/l actuellement recommandé nous semble satisfaisant. Malgré tout, il n'existe que peu de données avec des systèmes d'humidification ayant des performances intermédiaires (entre 25 et 30 mgH₂O/l). Les quelques études disponibles démontrent que le risque d'occlusion de sonde est également faible dans cette zone [85–87], mais il semble préférable dans l'état actuel des connaissances de recommander de se maintenir au-dessus de 30 mgH₂O/l. L'intérêt d'atteindre des niveaux plus élevés (proches de 40 mgH₂O/l) reste sans réponse claire. Les filtres humidificateurs performants peuvent délivrer les niveaux recommandés d'humidification, de même que les humidificateurs chauffants en dehors des situations défavorables et en l'absence de mécanismes de compensation. Néanmoins, les filtres sont plus stables et moins influencés par les conditions de température, de ventilation minute, et seule l'hypothermie est une

véritable contre-indication à leur utilisation. Avec une température corporelle inférieure à 35 °C, l'humidité délivrée est inférieure à 25 mgH₂O/l, et cela avec un des filtres les plus performants [84]. D'autres contre-indications, comme la présence de fistule bronchopleurale, d'hémoptysie sont moins claires, de même que l'utilisation de filtre en cas d'intoxications à des substances ayant une élimination respiratoire (cyanure, H₂S...), situations pour lesquelles il n'existe pas de recommandation claire. En revanche, les humidificateurs chauffants semblent moins stables et peuvent être influencés par les conditions extérieures, en particulier celles qui peuvent entraîner une température élevée dans la chambre d'humidification. Malheureusement, le monitoring actuel (température de sortie de chambre) ne renseigne aucunement sur l'humidité délivrée, et il n'existe pas de méthode facilement accessible pour évaluer le bon fonctionnement des humidificateurs chauffants. Avec les humidificateurs MR850, nous avons montré une excellente corrélation entre la température de plaque et l'hygrométrie délivrée lorsqu'on tient compte de la ventilation minute. Avec une ventilation minute de 7,5 l/min, une température de plaque de plus de 58 °C garantissait une humidité absolue au-dessus de 30 mgH₂O/l ; avec une ventilation minute de 15 l/min, il faut une température de plaque de plus de 65 °C pour garantir cette hygrométrie inspiratoire. Actuellement, cette méthode n'est cependant pas encore facilement mise à disposition des cliniciens (<https://www.youtube.com/watch?v=ccAosMYr3Vw>) [88].

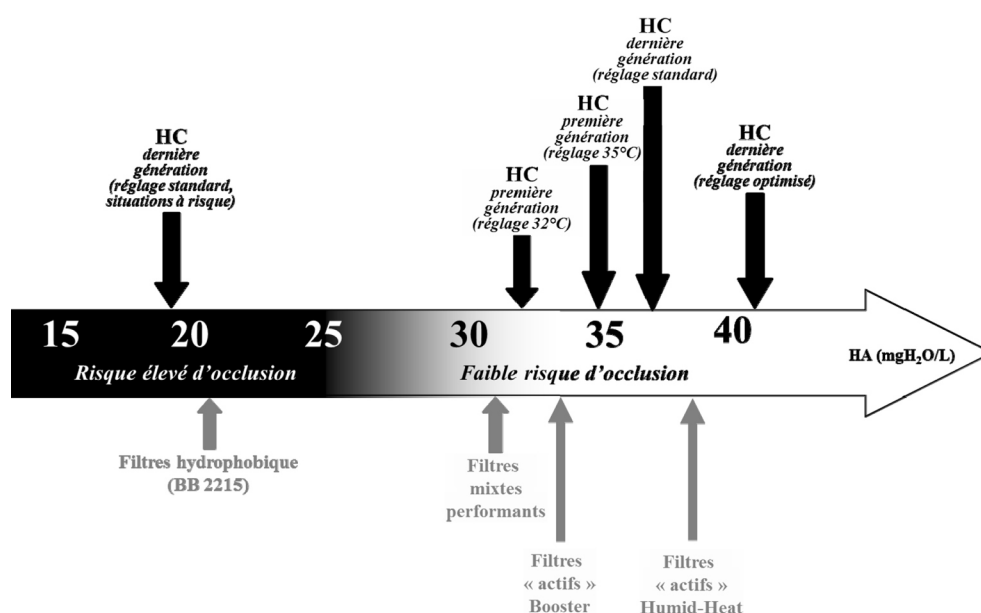


Fig. 5 Échelle de risque d'occlusion de sonde d'intubation (modifié d'après [2]). Position des différents systèmes d'humidification existant en rapport avec leurs performances hygrométriques et avec les données de la littérature. Entre 25 et 30 mgH₂O/l existe une zone d'ombre où le risque d'occlusion existe mais est moins connu. En dessous de 25 mgH₂O/l, ce risque est important [40–44], et au-delà de 30 mgH₂O/l, le risque est faible [71,72,74,75]. Par ailleurs, le risque de surhumidification avec les systèmes les plus performants est actuellement difficile à estimer. HC : humidificateur chauffant

Évaluations au cours de la ventilation non invasive

Au cours de la VNI, il n'existe pas de recommandation claire quant au niveau d'humidité à délivrer [89,90], mais il faut probablement éviter les gaz très secs (inférieurs à 10 mgH₂O/l) qui peuvent être mal tolérés [91] et majorer les résistances bronchiques [53–55] et l'hyperréactivité bronchique [58]. Par ailleurs, le type de respiration au cours de la VNI peut avoir une influence sur l'humidification des gaz, la respiration buccale étant considérée moins efficace pour l'humidification des gaz [21,22]. Un article récent ayant évalué la sécheresse buccale au cours de la VNI a également retrouvé plus de sécheresse buccale chez les patients respirant par la bouche [92]. Il n'existe que très peu de données d'hygrométrie au cours de la VNI [91–93], et seules quelques études ont évalué les performances d'humidificateurs chauffants au cours de la CPAP [94,95]. Les niveaux très bas d'humidification (< 10 mgH₂O/l) sont atteints dans plusieurs situations : lorsque des ventilateurs de soins intensifs utilisant de l'air et de l'oxygène mural sont utilisés sans système d'humidification ou lorsque des ventilateurs à turbine sont utilisés avec des FiO₂ de 50 % ou plus [91]. Par ailleurs, dans certaines situations critiques (température ambiante et ventilation minute élevées), les humidificateurs chauffants peuvent conduire à des niveaux d'humidité inférieurs à 10 mgH₂O/l, équivalents à l'absence de système d'humidification [91]. Cependant, avec des humidificateurs chauffants de dernière génération réglés en position « VNI », l'humidité délivrée est le plus souvent supérieure à 20 mgH₂O/l [91]. Avec un filtre humidificateur, et en l'absence de fuite, le niveau d'humidification est équivalent à celui délivré par les humidificateurs chauffants, mais l'humidité délivrée est réduite en cas de fuites [91]. Dans une évaluation de courte durée (dix minutes) chez des sujets sains, des niveaux inférieurs à 10 mgH₂O/l étaient significativement moins bien tolérés qu'une humidité de 15 ou 25 mgH₂O/l. Il n'y avait pas de différence significative entre ces deux niveaux d'humidification [91]. Dans une étude randomisée contrôlée incluant 247 patients, les patients recevaient de la VNI avec une humidification délivrée soit par un filtre humidificateur, soit par un humidificateur chauffant [96]. Dans cette étude, il n'y avait pas de différence de sécheresse des muqueuses dans les deux groupes de j1 à j7. Moins de 15 % des patients dans chaque groupe se plaignaient de sécheresse muqueuse importante [96]. Nous pensons donc que la VNI, lorsqu'elle est conduite avec des ventilateurs de soins intensifs ou avec des turbines en cas de FiO₂ supérieure à 50 %, devrait être réalisée avec un système d'humidification. Les filtres ou les humidificateurs chauffants semblent équivalents en termes d'humidification des gaz délivrés [91,96]. Une étude randomisée contrôlée multicentrique a comparé l'utilisation de filtres humidificateurs et d'humidificateurs chauffants au cours de la VNI chez 247

patients hypoxiques ou hypercapniques [96]. Il n'y avait pas de différence significative sur le taux d'intubation (29,7 % avec les filtres et 36,9 % avec les humidificateurs chauffants, $p = 0,28$), et la mortalité était de 14,1 % avec les filtres et de 21,5 % avec les humidificateurs chauffants ($p = 0,18$). La PaCO₂ à la troisième heure était plus basse avec les humidificateurs chauffants dans le sous-groupe de patients hypercapniques, mais la différence n'était pas significative (PaCO₂ = 66 vs 72 mmHg, $p = 0,08$). L'aggravation de l'encéphalopathie conduisant à l'intubation était plus fréquente dans le groupe filtre. De même, l'évaluation de la sécheresse des muqueuses ne montrait pas de différence significative. L'étude concluait que les filtres pouvaient être utilisés en première intention au cours de la VNI, quelle que soit la population concernée, et que la réduction d'espace mort pouvait être considérée en cas d'encéphalopathie hypercapnique menaçante [96].

Comparaison des effets mécaniques des systèmes d'humidification

Concernant la comparaison des effets mécaniques des filtres humidificateurs et des humidificateurs chauffants, presque toutes les études sont concordantes. La différence majeure entre ces systèmes concerne la différence d'espace mort, les filtres placés après la pièce en Y pouvant augmenter de façon significative l'espace mort (de 30 à 100 ml) au cours de la ventilation invasive ou non invasive (Figs 6–8). Il faut distinguer les effets chez les patients en ventilation spontanée de ceux en ventilation contrôlée (Tableau 3). Au cours de la ventilation spontanée, les études ont montré que l'utilisation d'un filtre humidificateur augmentait la ventilation minute, diminuait la ventilation alvéolaire [6,97–99] et augmentait le travail respiratoire [14,100]. Les auteurs estiment qu'il faudrait augmenter le niveau d'aide inspiratoire de 5 à 10 cmH₂O pour compenser l'effet de l'espace mort des filtres. Certains auteurs proposent de ne pas utiliser les filtres pour le sevrage des patients BPCO [101]. Pourtant, si l'on compense pour l'espace mort, il n'y a actuellement pas d'argument clair en défaveur de l'utilisation des filtres au cours du sevrage chez ces patients. Au cours de la ventilation spontanée en VNI, les résultats sont concordants et montrent une augmentation du travail respiratoire et de la PaCO₂ avec les filtres humidificateurs [11–13], sauf dans une étude où des filtres avec un faible espace mort étaient utilisés de manière concomitante avec de très grands volumes courants (> 700 ml) [102].

Au cours de la ventilation contrôlée, c'est plus une diminution de la ventilation alvéolaire et donc une augmentation de la PaCO₂ qui a été démontrée avec les filtres humidificateurs, et cela de manière proportionnelle à leur volume [6–10,103]. En particulier, au cours du SDRA,

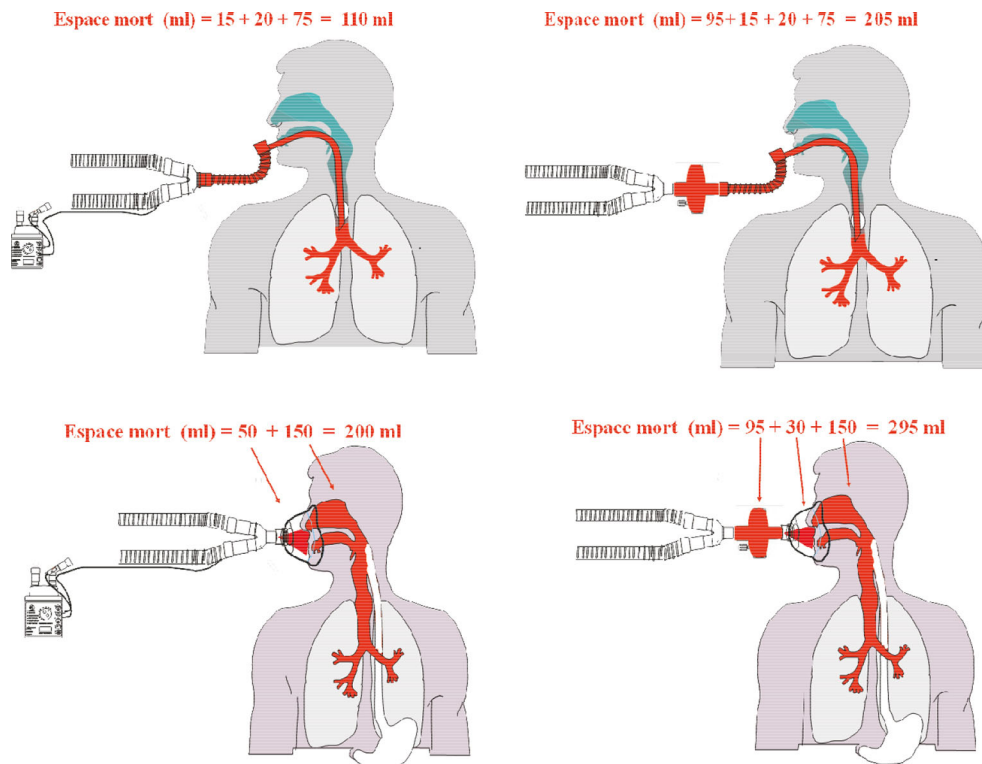


Fig. 6 Espace mort physiologique et instrumental au cours de la ventilation invasive (schémas en haut) et au cours de la ventilation non invasive (schémas en bas) avec un humidificateur chauffant (à gauche) ou avec un filtre humidificateur (à droite). *Ventilation invasive* : espace mort thoracique ~ 75 ml (pour un patient de 75 kg de poids idéal) [144] ; espace mort de la sonde d'intubation (pour un diamètre de 8 mm) ~ 20 ml [145] ; espace mort du raccord annelé ~ 10-15 ml ; espace mort du filtre humidificateur (30 à 100 ml) [filtre Hygrobac = 95 ml]. *Ventilation non invasive* : espace mort physiologique ~ 150 ml (pour un patient de 75 kg de poids idéal) [144] ; « espace mort » des masques ~ 70 à 160 ml pour les masques buconasaux usuels, près de 1000 ml pour les masques intégraux, mais probablement plus faible que leur volume interne [146,147] ; espace mort du raccord annelé ~ 10-15 ml ; espace mort du filtre humidificateur (30 à 100 ml) [filtre Hygrobac = 95 ml]

l'effet espace mort du filtre est plus important en raison de l'utilisation de faibles volumes courants. Compte tenu de fréquences respiratoires élevées, cet effet est répété plus souvent (Figs 7, 8). De façon intéressante, Moran et al. ont montré que chez des patients ayant un SDRA, l'utilisation d'un humidificateur chauffant au lieu d'un filtre humidificateur permettait de diminuer le volume courant tout en restant à une même PaCO_2 , ce qui permettait de baisser la pression de plateau de 4 cmH_2O [9]. Dans ce contexte de ventilation protectrice associant de faibles volumes courants et une fréquence respiratoire élevée, lorsqu'il existe une limitation des débits expiratoires pouvant être responsables d'auto-PEEP, il peut parfois être difficile d'augmenter encore la fréquence respiratoire, et la diminution de l'espace mort peut être la seule solution pour augmenter l'élimination de CO_2 .

Parmi les caractéristiques mécaniques des filtres et des humidificateurs, c'est la différence d'espace mort plus que la différence des résistances qui est à considérer (Figs 6–8). Dans les premières études, les filtres avaient des résistances

et un espace mort plus élevés [98–100]. Dans les études les plus récentes, les humidificateurs utilisés étaient des humidificateurs de dernière génération avec un fil chauffant dans le circuit inspiratoire [6,14]. Dans ce cas, les résistances sont au moins équivalentes, voire supérieures, à celles de la plupart des filtres (soit de 2,5 à 3 $\text{cmH}_2\text{O/l}$) [12]. Les différences existantes sont donc principalement liées à la différence de l'espace mort.

Malgré le grand nombre de données démontrant l'impact du système d'humidification sur le profil respiratoire au cours de la ventilation assistée qui devrait nécessiter d'augmenter le support respiratoire, ces pratiques ne semblent pas encore être appliquées. Dans une enquête récente sur le sevrage de la ventilation mécanique réalisée au Canada, le niveau d'aide inspiratoire le plus utilisé au cours des tests de ventilation spontanée était de 5 à 7 cmH_2O , que le système d'humidification utilisé soit le filtre humidificateur ou l'humidificateur chauffant [104]. Dans la conférence de consensus de la Société de réanimation de langue française sur le sevrage de la ventilation mécanique [105], il est

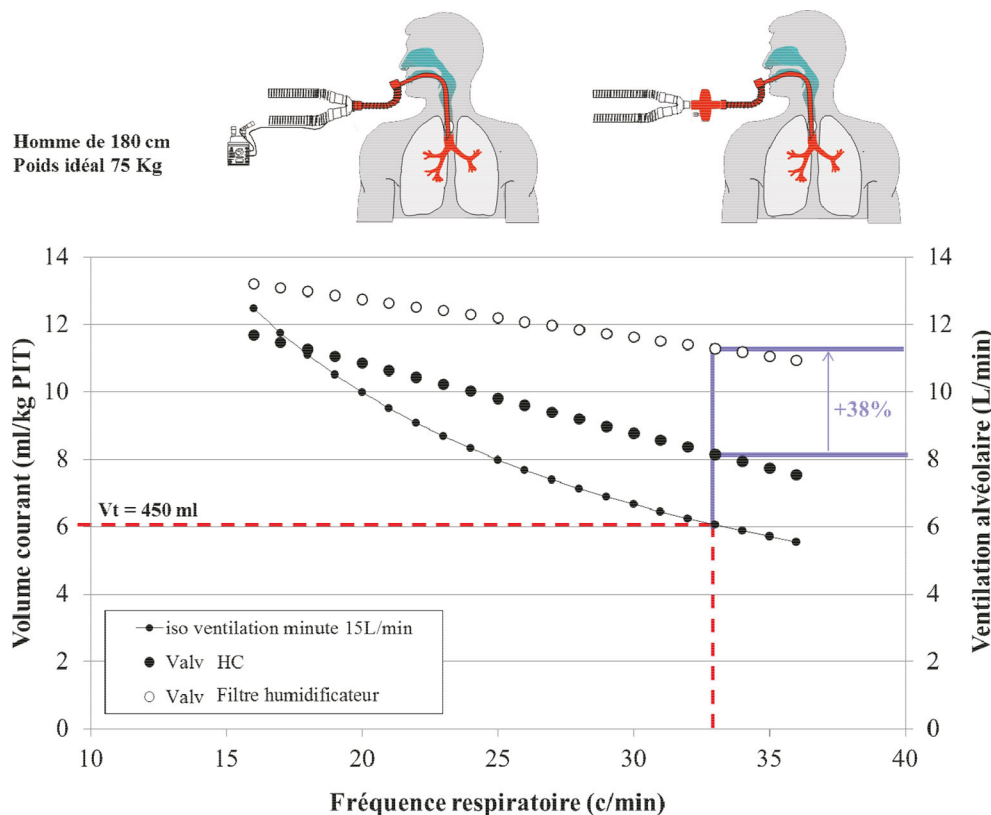


Fig. 7 Impact de l'espace mort lié au système d'humidification sur la ventilation alvéolaire au cours de la ventilation invasive. Le volume courant en fonction de la fréquence respiratoire est indiqué sur la courbe isoventilation minute (15 l/min). La ventilation alvéolaire avec un filtre humidificateur de 95 ml (ronds noirs) et celle avec un humidificateur chauffant (cercles blancs) en fonction de la fréquence respiratoire sont représentées. Exemple chez un homme de 180 cm (poids idéal 75 kg), ventilé à 6 ml/kg ($V_t = 450$ ml) avec une ventilation minute de 15 l/min, un raccord annelé et un filtre ayant un volume de 95 ml. Le changement de système d'humidification pour un humidificateur chauffant augmente dans ce cas la ventilation alvéolaire de 38 %. Abréviations : PIT = poids idéal théorique ; HC = humidificateur chauffant

recommandé de réaliser le test de ventilation spontanée soit avec une pièce en T, soit en aide inspiratoire à 7 cmH₂O et d'augmenter ce niveau d'aide inspiratoire en cas d'utilisation d'un filtre humidificateur. En revanche, lors de la dernière conférence de consensus sur le sevrage, il n'est pas fait référence au système d'humidification pour ajuster le niveau d'aide inspiratoire utilisé [106]. Le système automatisé de sevrage (SmartCare™) tient compte du système d'humidification pour déterminer le niveau d'aide inspiratoire minimum utilisé lors des tests de ventilation spontanée en aide inspiratoire : avec un filtre humidificateur, le niveau d'aide minimum est de 12 cmH₂O, et avec un humidificateur chauffant, il est de 7 cmH₂O [107,108].

Autres considérations

D'autres aspects différencient les filtres humidificateurs des humidificateurs chauffants et ont fait l'objet de nombreux

débats. Concernant les **risques infectieux**, la réduction de la condensation dans les circuits avec les filtres humidificateurs et les propriétés antibactériennes des filtres ont pu faire croire que le risque de pneumopathies acquises sous ventilation pouvait être moindre avec ces systèmes. Pourtant, la voie de colonisation principale des voies aériennes est en rapport avec les microaspirations d'origine gastrique ou oropharyngée autour du ballonnet de la sonde d'intubation [109–112]. Le taux de colonisation des circuits des ventilateurs est moins important en cas d'utilisation des filtres antibactériens par rapport aux humidificateurs chauffants, mais sans incidence sur la fréquence des pneumonies acquises sous ventilation [72,113]. La majorité des études randomisées contrôlées comparant le taux des pneumopathies acquises sous ventilation avec les filtres humidificateurs ou les humidificateurs chauffants n'ont pas montré de différence [41,43,72,75,114,115]. Il faut noter que seules deux études [72,75] ont utilisé des critères bronchoscopiques quantitatifs pour définir les pneumonies dans ces études.

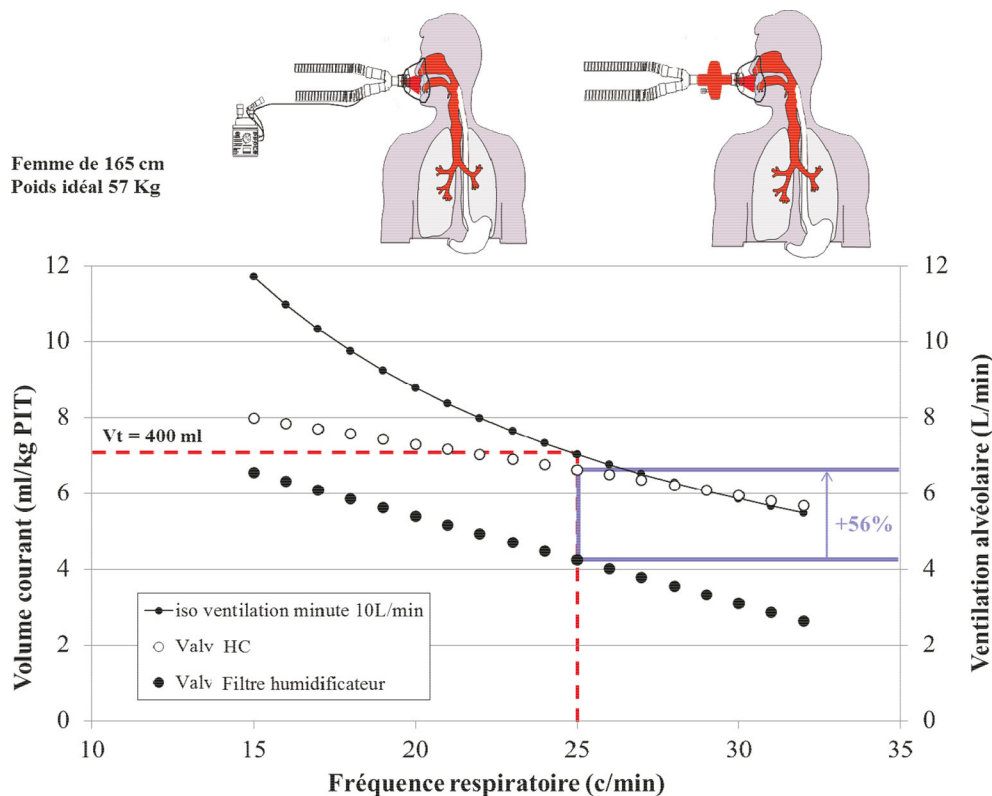


Fig. 8 Impact de l'espace mort lié au système d'humidification sur la ventilation alvéolaire au cours de la ventilation non invasive (VNI). Le volume courant en fonction de la fréquence respiratoire est indiqué sur la courbe iso-ventilation minute (10 l/min). La ventilation alvéolaire avec un filtre humidificateur de 95 ml (ronds noirs) et celle avec un humidificateur chauffant (cercles blancs) en fonction de la fréquence respiratoire sont représentées. Exemple chez une femme de 165 cm (poids idéal 57 kg), ventilée à 7 ml/kg ($V_t = 400$ ml) avec une ventilation minute de 10 l/min, sans raccord annelé et un filtre ayant un volume de 95 ml. Le changement de système d'humidification pour un humidificateur chauffant augmente dans ce cas la ventilation alvéolaire de 56 %. Abréviations : PIT = poids idéal théorique ; HC = humidificateur chauffant

Une seule étude a retrouvé un taux de pneumopathies acquises sous ventilation supérieur avec les humidificateurs chauffants [85]. Dans cette étude, Kirton et al. ont comparé le taux de pneumopathies avec un humidificateur chauffant ($n = 140$) et avec un filtre Pall BB100 ($n = 140$). Le taux de pneumopathies était significativement moins élevé dans le groupe filtre 6 vs 16 % dans le groupe humidificateur. Cette étude a de nombreux biais méthodologiques. D'une part, le filtre utilisé avait des performances d'humidification médiocres, ce qui peut réduire les sécrétions bronchiques. Or, le diagnostic de pneumopathie étant fait sur un score clinique, et la culture des aspirations trachéales, la sécheresse des sécrétions a pu réduire artificiellement le taux de pneumopathies acquises sous ventilation. D'ailleurs, le taux de 6 % est anormalement bas en comparaison avec les taux habituellement retrouvés, en particulier dans cette population de patients polytraumatisés.

Une autre étude a montré un taux de pneumopathies acquises sous ventilation plus important dans le groupe filtre humidificateur [116]. Dans cette étude, le taux de pneumopathies

était de 15,7 % dans le groupe humidificateur vs 39,6 % dans le groupe filtre, ce qui est inhabituellement élevé. Les autres études n'ont pas trouvé de différence significative entre les filtres et les humidificateurs chauffants quant à la fréquence des pneumopathies acquises sous ventilateur. Deux méta-analyses ont montré une augmentation du risque de pneumopathies avec les humidificateurs chauffants [117,118], mais ces méta-analyses ne prenaient pas en compte l'étude de Lacherade et al., la plus importante en ce qui concerne le nombre de patients et qui ne retrouvait pas de différences [75], ni celle de Lorente et al., qui retrouvait un taux de pneumopathies plus élevé dans le groupe filtre humidificateur [116].

Plusieurs études ont comparé **les coûts des différents systèmes d'humidification** [42,71–74,77,78,113,114,119]. Les études exhaustives sont difficiles à réaliser et doivent prendre en compte :

- les coûts des dispositifs et des circuits ;
- les coûts humains (temps pour monter les humidificateurs chauffants, temps pour changer les filtres, temps pour

Tableau 3 Impact de l'espace mort des filtres au cours de la ventilation assistée et contrôlée

Études	Méthodologie	n	Principales conclusions
Ventilation invasive			
Le Bourdellès et al. 1996 [99]	Cross-over F (75 ml) et HC Patients en VA : sevrage de la ventilation	15	Filtre : ↑ FR, ↑ Vmin, ↑ PaCO ₂
Pelosi et al. 1996 [100]	Cross-over F (65 ml)/HC et F (95 ml)/HC Patients en VA : aide inspiratoire Niveau d'AI : niveau de base, base + 5 cmH ₂ O, base – 5 cmH ₂ O	14	– Filtres (95 et 65 ml) : ↑ Travail respiratoire, ↑ FR, ↑ Vmin, ↑ PaCO ₂ – Compensation de l'impact des filtres par une augmentation de l'AI de +10 cmH ₂ O
Iotti et al. 1997 [98]	Cross-over F (60 ml), F (100 ml) et HC Closed-loop AI-P _{0,1} maintient P _{0,1} constante. VA	10	Filtres : ↑ de l'AI de 2 (F 60 ml) à 5 (F 100 ml) cmH ₂ O pour maintenir la P _{0,1} constante
Girault et al. 2003 [141]	Cross-over F (95 ml) et HC à 2 niveaux d'AI 7 et 15 cmH ₂ O Patients avec insuffisance respiratoire chronique en sevrage. VA	11	– Filtres : ↑ Travail respiratoire, ↑ FR, ↑ Vmin, ↑ PaCO ₂ – Compensation des effets des filtres par une augmentation de l'AI de 8 cmH ₂ O
Campbell et al. 2000 [6]	Cross-over F (28 ml), F (90 ml) et HC 1 groupe de patients curarisés (VC) 1 groupe de patients en ventilation assistée (VA)	11 15	– En VC : filtres ↑ espace mort, ↑ PaCO ₂ – En VA : filtres ↑ FR, ↑ Vmin, ↑ PaCO ₂
Prin et al. 2002 [8]	F (100 ml) remplacé par HC quand la PaCO ₂ > 55 mmHg Patients SDRA. VC	11	Diminution de la PaCO ₂ de 11 ± 5 mmHg avec un HC
Prat et al. 2003 [7]	5 périodes consécutives avec ↓ de l'espace mort (120 à 0 ml) Patients SDRA. VC	10	Diminution de la PaCO ₂ de 80,3 ± 20 mmHg (120 ml) à 63,6 ± 13 mmHg (0 ml)
Moran et al. 2006 [9]	3 périodes consécutives : 1) F (90 ml)-Vt ; 2) HC-Vt id. période 1 ; 3) HC avec ↓Vt pour obtenir la même PaCO ₂ qu'à la période 1 Patients SDRA. VC	17	↓ de la PaCO ₂ entre périodes 1 et 2 ↓ de la Pplateau de 4 cmH ₂ O entre périodes 1 et 3
Hinkson et al. 2006 [10]	Crossing-over périodes avec espace mort de 115, 55 et 0 ml Patients SDRA. VC et VA	7	Filtre et raccord annelés : ↑ espace mort, ↑ PaCO ₂

(Suite page suivante)

Tableau 3 (suite)			
Études	Méthodologie	n	Principales conclusions
Ventilation non invasive			
Lellouche et al. 2002 [12]	Crossing-over F (75 ml) et HC Patients BPCO en VA : ventilation non invasive	9	Filtre : $\uparrow$ Vmin, $\uparrow$ travail respiratoire (WOB/PTPes)
Jaber et al. 2002 [11]	Crossing-over F (75 ml) et HC Patients BPCO en VA : ventilation non invasive	24	Filtre : $\uparrow$ Vmin, $\uparrow$ travail respiratoire ($P_{0,1}$), $\uparrow$ PaCO ₂
Boyer et al. 2010 [102]	Crossing-over (i) avec raccord annelé F (98 ml) et HC (33 ml) (ii) sans raccord annelé F (38 ml) et HC (0 ml) Patients en VA : ventilation non invasive	50	Aucune différence significative sur la FR, Vmin, PaCO ₂ , travail respiratoire Vt moyen avec raccord annelé = 730 ml/sans = 630 ml
Lellouche et al. 2012 [13]	Crossing-over F (75 ml) et HC Patients en VA : ventilation non invasive	81	Filtre : $\uparrow$ FR, $\uparrow$ Vmin, $\uparrow$ PaCO ₂ Impact + marqué chez les patients hypercapniques
n : nombre de patients inclus ; F : Filtre ; HC : humidificateur chauffant ; VA : ventilation assistée ; VC : ventilation contrôlée ; AI : aide inspiratoire ; FR : fréquence respiratoire ; Vmin : ventilation minute ; SDRA : syndrome de détresse respiratoire aiguë.			

vider les pièges à eau pour les humidificateurs sans fils chauffants) ;

- des coûts divers : nettoyage, stockage et maintenance des humidificateurs, eau utilisée, pièges à eau...

Par ailleurs, les coûts dépendent beaucoup des systèmes de santé, et les prix appliqués peuvent varier.

La plupart des évaluations ont montré que les coûts associés aux humidificateurs chauffants sont plus importants que ceux des filtres humidificateurs, mais il n'existe pas d'évaluation récente à notre connaissance. De plus, les pratiques ont évolué en ce qui concerne la fréquence des changements des circuits et des filtres. Les filtres humidificateurs étaient changés toutes les 24 heures dans la plupart des évaluations de coûts. Avec des changements plus espacés (tous les deux à trois jours, et jusqu'à sept jours), les coûts quotidiens des filtres humidificateurs sont encore plus bas [69,71,73, 74,120].

La durée d'utilisation des circuits des ventilateurs était de 24 heures jusqu'à l'étude de Craven et al. [121], qui remet en cause cette pratique. D'autres études ont suivi et ont montré que le changement espacé, et même l'absence de changement pour un même patient, entraînait une réduction des coûts et surtout du taux de pneumopathies acquises sous ventilation [122–126], ce qui allait à l'encontre de l'idée généralement admise. La question de la durée d'utilisation des filtres a suivi le même chemin, mais les craintes liées à une utilisation prolongée des filtres reposaient également sur le risque de moins bonnes performances d'humidification et d'augmentation des résistances des filtres. Beaucoup de fabricants recommandent un changement des filtres toutes les 24 heures. Pourtant, de nombreuses études plaident pour des durées d'utilisation supérieures à 24 heures [69–71,73,74,78,87,127–129], pouvant aller jusqu'à sept jours [74,78,87]. En cas d'utilisation prolongée, les performances d'humidification sont peu modifiées avec les filtres les plus performants. La seule exception concerne les résultats retrouvés par Ricard et al. qui ont montré chez trois patients BPCO sur les dix inclus dans cette étude, une réduction avec le temps de l'efficacité des filtres humidificateurs avec une humidité absolue inférieure à 27 mgH₂O/L (et un minimum de 24,9 mgH₂O/L chez un patient à J5) après plusieurs jours d'utilisation [74]. Néanmoins, chez les 23 autres patients non BPCO inclus et la majorité des patients BPCO, les valeurs d'humidité absolue mesurées quotidiennement restaient stables au cours des sept jours d'utilisation. De même, aucune obstruction de sonde n'est survenue avec cette pratique. Dans cette même étude, les résistances des filtres n'étaient pas modifiées de manière significative après utilisation [74].

En plus de la durée d'utilisation d'un même filtre, s'est posée la question de la durée maximale d'utilisation de ce

système d'humidification chez des patients sous ventilation prolongée. Branson et al. ont proposé un algorithme qui limitait à cinq jours au maximum l'utilisation de filtres humidificateurs [113,130], avec un remplacement par un humidificateur chauffant après cette durée. Ces recommandations reposaient sur l'idée que les filtres étaient moins performants, ce qui était vrai pour les premières générations de filtres qui entraînaient un risque accru d'occlusions de sonde [40–44]. Avec les filtres récents, ce risque est quasi inexistant et équivalent ou inférieur à celui des humidificateurs chauffants (Tableau 2). De nombreuses études ont montré qu'une utilisation prolongée des filtres humidificateurs n'entraînait pas de risque particulier pour les patients [72,75,131]. En particulier dans l'étude de Lacherade et al., qui comparait les filtres et les humidificateurs chauffants quant aux taux de pneumonies acquises sous ventilation, les durées d'utilisation étaient de deux semaines en moyenne dans le groupe filtre ($n = 185$) sans qu'aucun problème spécifique n'eût été noté [75]. Une seule occlusion de sonde d'intubation était notée dans le groupe filtre, contre cinq dans le groupe humidificateur chauffant ($p = 0,12$).

Enfin, plusieurs études ont également évalué les *résistances des filtres humidificateurs* [64,74,132–139]. Ces résistances étaient considérées comme négligeables, en particulier en comparaison avec la résistance des sondes d'intubation. Une étude a montré l'absence d'impact des filtres sur la PEP intrinsèque chez des patients BPCO [140]. De même, plusieurs études ont mesuré les résistances des humidificateurs chauffants [141,142]. Les valeurs des résistances étaient relativement basses (inférieures à 1,5 cmH₂O à 1 l/sec) lorsque l'humidificateur était étudié seul (sans le circuit) et en cas d'utilisation de circuits sans fils chauffants. L'ajout du circuit avec le fil chauffant dans la lumière augmente beaucoup les résistances totales des humidificateurs chauffants avec leur circuit (supérieures à 3 cmH₂O à 1 l/sec) [12]. Les nouveaux circuits avec le fil chauffant directement intégré dans la lumière pourraient avoir des résistances plus basses.

Synthèse, recommandations et conclusions (Fig. 9)

Le choix du système d'humidification devrait reposer sur des données probantes obtenues par des évaluations indépendantes et tenir compte de la condition clinique du patient. Les performances en termes d'humidification sont bien sûr primordiales, puisque c'est l'objectif principal de ces systèmes, mais les caractéristiques mécaniques, et en particulier l'espace mort de ces systèmes, doivent être considérées du fait notamment de l'utilisation de plus en plus fréquente de la ventilation protectrice.

Au cours de la ventilation invasive, l'humidification des gaz est toujours requise et peut être assurée par des filtres

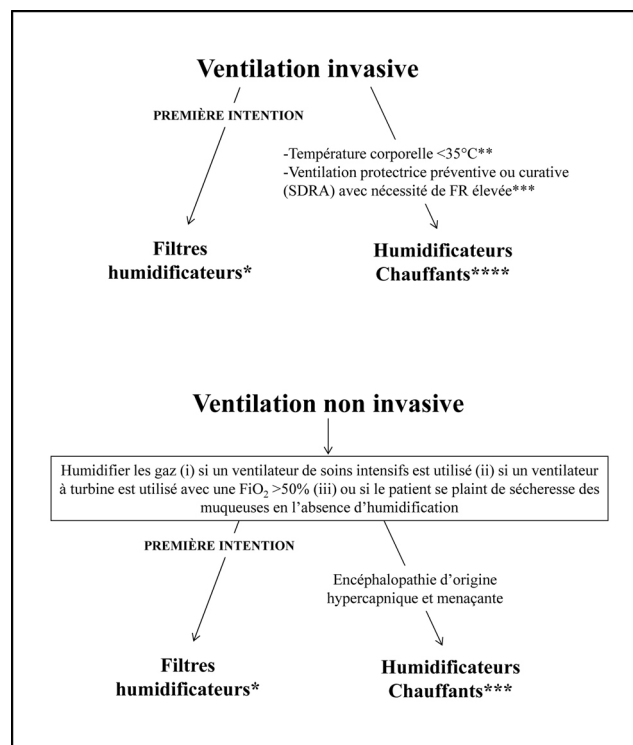


Fig. 9 Recommandations pour l'humidification des gaz au cours de la ventilation mécanique invasive et non invasive

*En utilisant un filtre humidificateur performant délivrant plus de 30 mgH₂O/l [65]

**Les autres contre-indications moins claires sont la présence de fistule bronchopleurale, d'hémoptysies ou d'intoxications avec des substances à élimination respiratoire

***En cas d'acidose hypercapnique ou mixte menaçante, lorsque la ventilation minute avant intubation était élevée (mesurée ou estimée) et lorsqu'il existe un risque d'auto-PEEP limitant l'augmentation de la fréquence respiratoire

****En évitant les situations à risque de dysfonctionnement avec les humidificateurs chauffants avec fil chauffant (éviter de les utiliser en cas de température ambiante élevée, éviter que les humidificateurs soient directement exposés au soleil, éviter les ventilateurs à turbine avec température de sortie élevée). Et en vérifiant lorsque cela est possible la température de la plaque chauffante

humidificateurs ou des humidificateurs chauffants. Les recommandations sur les niveaux d'humidification, qui sont de délivrer des gaz avec plus de 30 mgH₂O/l au cours de la ventilation invasive, n'ont pas varié depuis plus de 40 ans [25] et restent valables. Il n'y a pas actuellement d'argument pour utiliser des systèmes qui délivrent une humidité proche de 40 mgH₂O/l. Les filtres peuvent être choisis en première intention, mais il faut être attentif à l'hétérogénéité de ces systèmes en ce qui concerne les performances d'humidification, ainsi que les différences d'espace mort [65]. Les filtres

humidificateurs performants (ceux qui fournissent plus de 30 mgH₂O/l) devraient être choisis préférentiellement. Ces systèmes sont faciles d'utilisation et ont des performances stables, peu influencées par les conditions extérieures. En revanche, leurs performances sont diminuées en cas d'hypothermie des patients [84]. Les humidificateurs chauffants devraient être choisis en cas de contre-indication des filtres (principalement en cas d'hypothermie prolongée) et du fait de leur moindre espace mort, lorsqu'une ventilation protectrice avec de faibles volumes courants associés à une fréquence respiratoire élevée doit être utilisée. Il faut connaître les limites de ces systèmes et les conditions associées à des performances d'humidification réduites (toutes les situations qui augmentent la température des gaz à l'entrée de la chambre d'humidification) [66].

Au cours de la VNI, l'humidification des gaz est requise lorsque des gaz secs sont utilisés (ventilateurs de soins intensifs n'utilisant que des gaz secs ou ventilateur à turbine avec FiO₂ supérieure à 50 %) [91]. Les études physiologiques ont montré une moins bonne élimination du CO₂ et une augmentation du travail respiratoire avec les filtres humidificateurs [11–13]. Néanmoins, une étude randomisée multicentrique n'a pas retrouvé les bénéfices cliniques que laissaient envisager les données physiologiques préliminaires avec les humidificateurs chauffants [96]. Les filtres humidificateurs devraient donc être utilisés en première intention, et l'utilisation des humidificateurs chauffants devrait être réservée aux cas où une hypercapnie sévère entraînant une encéphalopathie menaçante n'est pas résolutive avec un filtre humidificateur. En particulier, la diminution de l'espace mort instrumental devrait être recherchée lorsqu'il est difficile d'obtenir des volumes courants suffisants pour permettre une élimination du CO₂. En cas d'utilisation de filtres humidificateurs, ceux ayant de bonnes performances d'humidification et un volume interne faible devraient être préférés [65,102].

Depuis leur apparition dès les débuts de la ventilation mécanique moderne vers 1952, les humidificateurs chauffants et les filtres humidificateurs chauffants se sont beaucoup améliorés et restent les deux systèmes très majoritairement utilisés. De nouvelles améliorations concernant les filtres humidificateurs paraissent difficiles, puisque les systèmes actuels délivrent près de 90 % de l'humidité expirée [65]. Par ailleurs, compte tenu de leur moindre stabilité et de l'influence de plusieurs facteurs externes sur leur fonctionnement, une meilleure surveillance de l'humidité délivrée par les humidificateurs chauffants serait intéressante à obtenir dans les prochaines années. Ces systèmes se sont beaucoup améliorés avec le développement de nouveaux algorithmes pour limiter les risques de sous-humidification, mais d'autres améliorations restent possibles pour limiter les risques techniques liés à leur utilisation (utilisation de systèmes éteints, sous-humidification non reconnue par le

clinicien...). De très nombreuses évaluations ont permis de mieux connaître les limites et de préciser les indications respectives des systèmes d'humidification. Il reste plusieurs questions non résolues. En particulier, il n'est pas clair qu'il y ait un intérêt à utiliser des systèmes qui délivrent 40 ou même 35, plutôt que 30 mgH₂O/l. Par ailleurs, il faudra rester vigilant sur les effets cliniques de nouveaux systèmes qui pourraient délivrer plus de 40 mgH₂O/l, puisque ce sont des zones qui restent encore inexplorées.

Liens d'intérêts : Le Dr Lellouche est co-fondateur, vice-président et actionnaire de la société Oxynov qui développe des systèmes innovants de support respiratoire.

Références

1. Ricard JD (2006) Humidification. In: Tobin M (ed) Mechanical ventilation: McGraw-Hill. Inc., pp 1109–20
2. Lellouche F (2012) Humidification during invasive mechanical ventilation: hygrometric performances and cost of humidification systems. In: Esquinas AM (ed) Humidification in the intensive care unit. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, pp 137–55
3. Wilkes AR (2014) Humidification in intensive care: are we there yet? *Respir Care* 59:790–3
4. Lellouche F, Qader S, Taille S, et al (2014) Influence of ambient temperature and minute ventilation on passive and active heat and moisture exchangers. *Respir Care* 59:637–43
5. Ricard JD, Cook D, Griffith L, et al (2002) Physicians' attitude to use heat and moisture exchangers or heated humidifiers: a Franco-Canadian survey. *Intensive Care Med* 28:719–25
6. Campbell RS, Davis K Jr, Johannigman JA, Branson RD (2000) The effects of passive humidifier dead space on respiratory variables in paralyzed and spontaneously breathing patients. *Respir Care* 45:306–12
7. Prat G, Renault A, Tonnelier JM, et al (2003) Influence of the humidification device during acute respiratory distress syndrome. *Intensive Care Med* 29:2211–5
8. Prin S, Chergui K, Augarde R, et al (2002) Ability and safety of a heated humidifier to control hypercapnic acidosis in severe ARDS. *Intensive Care Med* 28:1756–60
9. Moran I, Bellapart J, Vari A, Mancebo J (2006) Heat and moisture exchangers and heated humidifiers in acute lung injury/acute respiratory distress syndrome patients. Effects on respiratory mechanics and gas exchange. *Intensive Care Med* 32:524–31
10. Hinkson CR, Benson MS, Stephens LM, Deem S (2006) The effects of apparatus dead space on P(aCO₂) in patients receiving lung-protective ventilation. *Respir Care* 51:1140–4
11. Jaber S, Chanques G, Matecki S, et al (2002) Comparison of the effects of heat and moisture exchangers and heated humidifiers on ventilation and gas exchange during non-invasive ventilation. *Intensive Care Med* 28:1590–4
12. Lellouche F, Maggiore SM, Deye N, et al (2002) Effect of the humidification device on the work of breathing during noninvasive ventilation. *Intensive Care Med* 28:1582–9
13. Lellouche F, Pignataro C, Maggiore SM, et al (2012) Short-term effects of humidification devices on respiratory pattern and arterial blood gases during noninvasive ventilation. *Respir Care* 57:1879–86

14. Girault C, Breton L, Richard JC, et al (2003) Mechanical effects of airway humidification devices in difficult to wean patients. *Crit Care Med* 31:1306–11
15. Magendie (1829) quoted from Heetderks DR. Observations on reaction of normal mucous membrane. *Am J Med Sc* 1927;174:231
16. Seely LE (1940) Study of changes in the temperature and water vapour content in the nasal cavity. *Heating, Piping & Air Conditioning* 12:377
17. Cole P (1953) Temperature and humidity of respiratory air. *J Physiol* 122:51
18. Cole P (1953) Some aspects of temperature, moisture and heat relationships in the upper respiratory tract. *J Laryngol Otol* 67:449–56
19. Ingelstedt S (1956) Studies on the conditioning of air in the respiratory tract. *Acta Otolaryngol Suppl* 131:1–80
20. Ingelstedt S, Toremalm NG (1961) Air flow patterns and heat transfer within the respiratory tract. A new method for experimental studies on models. *Acta Physiol Scand* 51:204–17
21. Sara C, Currie T (1965) Humidification by nebulization. *Med J Aust* 191:174–9
22. Primiano FP Jr, Montague FW Jr, Saidel GM (1984) Measurement system for respiratory water vapor and temperature dynamics. *J Appl Physiol* 56:1679–85
23. Dery R (1967) Humidity in anesthesiology III. heat and moisture patterns in the respiratory tract during anesthesia with the semi-closed system. *Can Anaesth Soc J* 14:287–98
24. Dery R (1973) The evolution of heat and moisture in the respiratory tract during anesthesia with a nonbreathing system. *Can Anaesth Soc J* 20:296–309
25. Chamney AR (1969) Humidification requirements and techniques. Including a review of the performance of equipment in current use. *Anaesthesia* 24:602–17
26. Lassen HC (1953) A preliminary report on the 1952 epidemic of poliomyelitis in Copenhagen with special reference to the treatment of acute respiratory insufficiency. *Lancet* 1:37–41
27. Ibsen B (1954) The anaesthetist's viewpoint on the treatment of respiratory complications in poliomyelitis during the epidemic in Copenhagen, 1952. *Proc R Soc Med* 47:72–4
28. Heyden R (1950) The respiratory function in laryngectomized patients. *Acta Otolaryngol Suppl* 85:1–76
29. Marshall J, Spalding JM (1953) Humidification in positive-pressure respiration for bulbo-spinal paralysis. *Lancet* 265:1022–4
30. Spalding JM (1956) Humidifier for patients breathing spontaneously. *Lancet* 271:1140
31. Walker JE, Wells RE Jr, Merrill EW (1961). Heat and water exchange in the respiratory tract. *Am J Med* 30:259–67
32. Sara C (1965) The management of patients with a tracheostomy. *Med J Aust* 13:99–103
33. Cushing IE, Miller WF (1958) Considerations in humidification by nebulization. *Dis Chest* 34:388–403
34. Burton JDK (1962) Effect of dry anaesthetic gases on the respiratory mucous membrane. *Lancet* 1:235
35. Chalon J, Loew DA, Malebranche J (1972) Effects of dry anaesthetic gases on tracheobronchial ciliated epithelium. *Anesthesiology* 37:338–43
36. Forbes AR (1973) Humidification and mucus flow in the intubated trachea. *Br J Anaesth* 45:874–8
37. Toremalm NG (1961) Air-flow patterns and ciliary activity in the trachea after tracheotomy. A method of determination in vitro of the rate of ciliary beat in a tracheal model. *Acta Otolaryngol* 53:442–54
38. Forbes AR (1974) Temperature, humidity and mucus flow in the intubated trachea. *Br J Anaesth* 46:29–34
39. Williams R, Rankin N, Smith T, et al (1996) Relationship between the humidity and temperature of inspired gas and the function of the airway mucosa. *Crit Care Med* 24:1920–9
40. Cohen IL, Weinberg PF, Fein IA, Rowinski GS (1988) Endotracheal tube occlusion associated with the use of heat and moisture exchangers in the intensive care unit. *Crit Care Med* 16:277–9
41. Martin C, Perrin G, Gevaudan MJ, et al (1990) Heat and moisture exchangers and vaporizing humidifiers in the intensive care unit. *Chest* 97:144–9
42. Misset B, Escudier B, Rivara D, et al (1991) Heat and moisture exchanger vs heated humidifier during long-term mechanical ventilation. A prospective randomized study. *Chest* 100:160–3
43. Roustian JP, Kienlen J, Aubas P, et al (1992) Comparison of hydrophobic heat and moisture exchanger with heated humidifier during prolonged mechanical ventilation. *Intensive Care Med* 18:97–100
44. Villafane MC, Cinnella G, Lofaso F, et al (1996) Gradual reduction of endotracheal tube diameter during mechanical ventilation via different humidification devices. *Anesthesiology* 85:1341–9
45. Kapadia FN, Bajan KB, Singh S, et al (2001) Changing patterns of airway accidents in intubated ICU patients. *Intensive Care Med* 27:296–300
46. Kapadia FN (2001) Factors associated with blocked tracheal tubes. *Intensive Care Med* 27:1679–81
47. Jaber S, Pigeot J, Fodil R, et al (2004) Long-term effects of different humidification systems on endotracheal tube patency: evaluation by the acoustic reflection method. *Anesthesiology* 100:782–8
48. Boque MC, Gualis B, Sandiumenge A, Rello J (2004) Endotracheal tube intraluminal diameter narrowing after mechanical ventilation: use of acoustic reflectometry. *Intensive Care Med* 30:2204–9
49. Moran I, Cabello B, Manero E, Mancebo J (2011) Comparison of the effects of two humidifier systems on endotracheal tube resistance. *Intensive Care Med* 37:1773–9
50. Hoppers JJ, Postma DS, Rijcken B, et al (2000) Histamine airway hyper-responsiveness and mortality from chronic obstructive pulmonary disease: a cohort study. *Lancet* 356:1313–7
51. Cabanes LR, Weber SN, Matran R, et al (1989) Bronchial hyper-responsiveness to methacholine in patients with impaired left ventricular function. *N Engl J Med* 320:1317–22
52. Nishimura Y, Maeda H, Yokoyama M, Fukuzaki H (1990) Bronchial hyperreactivity in patients with mitral valve disease. *Chest* 98:1085–90
53. Fontanari P, Burnet H, Zattara-Hartmann MC, Jammes Y (1996) Changes in airway resistance induced by nasal inhalation of cold dry, dry, or moist air in normal individuals. *J Appl Physiol* 81:1739–43
54. Kaminsky DA, Bates JH, Irvin CG (2000) Effects of cool, dry air stimulation on peripheral lung mechanics in asthma. *Am J Respir Crit Care Med* 162:179–86
55. Kaminsky DA, Irvin CG, Gurka DA, et al (1995) Peripheral airways responsiveness to cool, dry air in normal and asthmatic individuals. *Am J Respir Crit Care Med* 152:1784–90
56. Wells RE Jr, Walker JE, Hickler RB (1960) Effects of cold air on respiratory airflow resistance in patients with respiratory-tract disease. *N Engl J Med* 263:268–73
57. Millar JS, Nair N Jr, Unkles RD, McNeill RS (1965) Cold Air and Ventilatory Function. *Br J Dis Chest* 59:23–7
58. Cockcroft DW (2001) How best to measure airway responsiveness. *Am J Respir Crit Care Med* 163:1514–5
59. Chatburn RL, Primiano FP Jr (1987) A rational basis for humidity therapy. *Respir Care* 32:249–54
60. British Standards Institution (1970) Specifications for humidifiers for use with breathing machines. BS 4494, London
61. American National Standards Institute (1979) Standard for humidifiers and nebulizers for medical use. ASI Z79.9:8
62. AARC clinical practice guideline (1992) Humidification during mechanical ventilation. American Association for Respiratory Care. *Respir Care* 37:887–90

63. International Organization of Standards (1988) Humidifiers for medical use. ISO 8185. 60:14
64. Branson R, Davis J (1996) Evaluation of 21 passive humidifiers according to the ISO 9360 standard: moisture output, dead space, and flow resistance. *Respir Care* 41:736–43
65. Lellouche F, Taille S, Lefrançois F, et al (2009) Humidification performance of 48 passive airway humidifiers: comparison with manufacturer data. *Chest* 135:276–86
66. Lellouche L, Taillé S, Maggiore SM, et al (2004) Influence of ambient air and ventilator output temperature on performances of heated-wire humidifiers. *Am J Respir Crit Care Med* 170:1073–9
67. Sottiaux T (1992) Use of a heat and moisture exchanger during long-term mechanical ventilation. *Chest* 102:979–80
68. Ricard JD, Markowicz P, Djedaini K, et al (1999) Bedside evaluation of efficient airway humidification during mechanical ventilation of the critically ill. *Chest* 115:1646–52
69. Davis K Jr, Evans SL, Campbell RS, et al (2000) Prolonged use of heat and moisture exchangers does not affect device efficiency or frequency rate of nosocomial pneumonia. *Crit Care Med* 28:1412–8
70. Boyer A, Thierry G, Lasry S, et al (2003) Long-term mechanical ventilation with hygroscopic heat and moisture exchangers used for 48 hours: a prospective clinical, hygrometric, and bacteriologic study. *Crit Care Med* 31:823–9
71. Djedaini K, Billiard M, Mier L, et al (1995) Changing heat and moisture exchangers every 48 hours rather than 24 hours does not affect their efficacy and the incidence of nosocomial pneumonia. *Am J Respir Crit Care Med* 152:1562–9
72. Dreyfuss D, Djedaini K, Gros I, et al (1995) Mechanical ventilation with heated humidifiers or heat and moisture exchangers: effects on patient colonization and incidence of nosocomial pneumonia. *Am J Respir Crit Care Med* 151:986–92
73. Markowicz P, Ricard JD, Dreyfuss D, et al (2000) Safety, efficacy, and cost-effectiveness of mechanical ventilation with humidifying filters changed every 48 hours: a prospective, randomized study. *Crit Care Med* 28:665–71
74. Ricard JD, Le Miere E, Markowicz P, et al (2000) Efficiency and safety of mechanical ventilation with a heat and moisture exchanger changed only once a week. *Am J Respir Crit Care Med* 161:104–9
75. Lacherade JC, Auburtin M, Cerf C, et al (2005) Impact of humidification systems on ventilator-associated pneumonia: a randomized multicenter trial. *Am J Respir Crit Care Med* 172:1276–82
76. Miyao H, Hirokawa T, Miyasaka K, Kawazoe T (1992) Relative humidity, not absolute humidity, is of great importance when using a humidifier with a heating wire. *Crit Care Med* 20:674–9
77. Humi JM, Feihl F, Lazor R, et al (1997) Safety of combined heat and moisture exchanger filters in long-term mechanical ventilation. *Chest* 111:686–91
78. Kollef MH, Shapiro SD, Boyd V, et al (1998) A randomized clinical trial comparing an extended-use hygroscopic condenser humidifier with heated-water humidification in mechanically ventilated patients. *Chest* 113:759–67
79. Doyle A, Mariyaselvam M, Wijewardena G, et al (2015) The simultaneous use of a heat and moisture exchanger and a heated humidifier causes critical airway occlusion in less than 24 hours. *J Crit Care* 30:863 e861–3
80. Schumann S, Stahl CA, Moller K, et al (2007) Moisturizing and mechanical characteristics of a new counter-flow type heated humidifier. *Br J Anaesth* 98:531–8
81. Martin C, Papazian L, Perrin G, et al (1992) Performance evaluation of three vaporizing humidifiers and two heat and moisture exchangers in patients with minute ventilation > 10 l/min. *Chest* 102:1347–50
82. Martin C, Papazian L, Perrin G, et al (1994) Preservation of humidity and heat of respiratory gases in patients with a minute ventilation greater than 10 l/min. *Crit Care Med* 22:1871–6
83. Martin C, Thomachot L, Quinio B, et al (1995) Comparing two heat and moisture exchangers with one vaporizing humidifier in patients with minute ventilation greater than 10 l/min. *Chest* 107:1411–5
84. Lellouche F, Qader S, Taille S, et al (2006) Under-humidification and over-humidification during moderate induced hypothermia with usual devices. *Intensive Care Med* 32:1014–21
85. Kirton OC, DeHaven B, Morgan J, et al (1997) A prospective, randomized comparison of an in-line heat moisture exchange filter and heated wire humidifiers: rates of ventilator-associated early-onset (community-acquired) or late-onset (hospital-acquired) pneumonia and incidence of endotracheal tube occlusion. *Chest* 112:1055–9
86. Thomachot L, Viviani X, Arnaud S, et al (1998) Comparing two heat and moisture exchangers, one hydrophobic and one hygroscopic, on humidifying efficacy and the rate of nosocomial pneumonia. *Chest* 114:1383–9
87. Thomachot L, Leone M, Razzouk K, et al (2002) Randomized clinical trial of extended use of a hydrophobic condenser humidifier: 1 vs 7 days. *Crit Care Med* 30:232–7
88. Lellouche F, Bouchard PA (2013) Optimisation des performances et du monitoring de l'humidification avec des humidificateurs chauffants à fils chauffants. *Réanimation* 23:S243
89. Evans TW (2001) International consensus conferences in intensive care medicine: non-invasive positive pressure ventilation in acute respiratory failure. Organised jointly by the American Thoracic Society, the European Respiratory Society, the European Society of Intensive Care Medicine, and the Société de réanimation de langue française, and approved by the ATS Board of Directors, December 2000. *Intensive Care Med* 27:166–78
90. Mehta S, Hill NS (2001) Noninvasive ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 163:540–77
91. Lellouche F, Maggiore SM, Lyazidi A, et al (2009) Water content of delivered gases during non-invasive ventilation in healthy subjects. *Intensive Care Med* 35:987–95
92. Oto J, Nakataki E, Okuda N, et al (2014) Hygrometric properties of inspired gas and oral dryness in patients with acute respiratory failure during noninvasive ventilation. *Respir Care* 59:39–45
93. Holland AE, Denehy L, Buchan CA, Wilson JW (2007) Efficacy of a heated passover humidifier during noninvasive ventilation: a bench study. *Respir Care* 52:38–44
94. Wiest GH, Foerst J, Fuchs FS, et al (2001) In vivo efficacy of two heated humidifiers used during CPAP-therapy for obstructive sleep apnea under various environmental conditions. *Sleep* 24:435–440
95. Wiest GH, Fuchs FS, Brueckl WM, et al (2000) In vivo efficacy of heated and non-heated humidifiers during nasal continuous positive airway pressure (nCPAP)-therapy for obstructive sleep apnoea. *Respir Med* 94:364–8
96. Lellouche F, L'Her E, Abroug F, et al (2014) Impact of the humidification device on intubation rate during noninvasive ventilation with ICU ventilators: results of a multicenter randomized controlled trial. *Intensive Care Med* 40:211–9
97. Natalini G, Bardini P, Latronico N, Candiani A (1994) Impact of heat and moisture exchangers on ventilatory pattern and respiratory mechanics in spontaneously breathing patients. *Monaldi Arch Chest Dis* 49:561–4
98. Iotti GA, Olivei MC, Palo A, et al (1997) Unfavorable mechanical effects of heat and moisture exchangers in ventilated patients. *Intensive Care Med* 23:399–405
99. Le Bourdelles G, Mier L, Fiquet B, et al (1996) Comparaison of the effects of heat and moisture exchangers and heated humidifiers on ventilation and gas exchange during weaning trial from mechanical ventilation. *Chest* 110:1294–8

100. Pelosi P, Solca M, Ravagnan I, et al (1996) Effects of heat and moisture exchangers on minute ventilation, ventilatory drive, and work of breathing during pressure-support ventilation in acute respiratory failure. *Crit Care Med* 24:1184-8
101. Hilbert G (2003) Difficult to wean chronic obstructive pulmonary disease patients: avoid heat and moisture exchangers? *Crit Care Med* 31:1580-1
102. Boyer A, Vargas F, Hilbert G, et al (2010) Small dead space heat and moisture exchangers do not impede gas exchange during noninvasive ventilation: a comparison with a heated humidifier. *Intensive Care Med* 36:1348-54
103. Richecoeur J, Lu Q, Vieira SR, et al (1999) Expiratory washout versus optimization of mechanical ventilation during permissive hypercapnia in patients with severe acute respiratory distress syndrome. *Am J Respir Crit Care Med* 160:77-85
104. Burns KEA, Lellouche F, Loisel F, et al (2007) Weaning critically ill adults from invasive mechanical ventilation: a national survey. *Am J Respir Crit Care Med* 175:A963
105. 2002) Consensus critical care conference: weaning from mechanical ventilation. The French Language Society of Pneumology (in association with the SPLF). *Rev Mal Respir* 19:108-11
106. Boles JM, Bion J, Connors A, et al (2007) Weaning from mechanical ventilation. *Eur Respir J* 29:1033-56
107. Bouadma L, Lellouche F, Cabello B, et al (2005) Computer-driven management of prolonged mechanical ventilation and weaning: a pilot study. *Intensive Care Med* 31:1446-50
108. Lellouche F, Mancebo J, Joliet P, et al (2006) A multicenter randomized trial of computer-driven protocolized weaning from mechanical ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 174:894-900
109. Johanson WG, Pierce AK, Sanford JP (1969) Changing pharyngeal bacterial flora of hospitalized patients. Emergence of gram-negative bacilli. *N Engl J Med* 281:1137-40
110. Craven DE, Goularte TA, Make BJ (1984) Contaminated condensate in mechanical ventilator circuits. A risk factor for nosocomial pneumonia? *Am Rev Respir Dis* 129:625-8
111. Niederman MS, Mantovani R, Schoch P, et al (1989) Patterns and routes of tracheobronchial colonization in mechanically ventilated patients. The role of nutritional status in colonization of the lower airway by *Pseudomonas* species. *Chest* 95:155-61
112. Kollef MH (1999) The prevention of ventilator-associated pneumonia. *N Engl J Med* 340:627-34
113. Branson RD, Davis K Jr, Campbell RS, et al (1993) Humidification in the intensive care unit. Prospective study of a new protocol utilizing heated humidification and a hygroscopic condenser humidifier. *Chest* 104:1800-5
114. Branson R, Davis J, Brown R (1996) Comparison of three humidification techniques during mechanical ventilation: patient selection, cost, and infection considerations. *Respir Care* 41:809-16
115. Boots RJ, George N, Faoagali JL, et al (2006) Double-heater-wire circuits and heat-and-moisture exchangers and the risk of ventilator-associated pneumonia. *Crit Care Med* 34:687-93
116. Lorente L, Lecuona M, Jimenez A, et al (2006) Ventilator-associated pneumonia using a heated humidifier or a heat and moisture exchanger: a randomized controlled trial [ISRCTN88724583]. *Crit Care* 10:R116
117. Cook D, De Jonghe B, Brochard L, Brun-Buisson C (1998) Influence of airway management on ventilator-associated pneumonia: evidence from randomized trials. *JAMA* 279:781-7
118. Kola A, Eckmanns T, Gastmeier P (2005) Efficacy of heat and moisture exchangers in preventing ventilator-associated pneumonia: meta-analysis of randomized controlled trials. *Intensive Care Med* 31:5-11
119. Boots RJ, Howe S, George N, et al (1997) Clinical utility of hygroscopic heat and moisture exchangers in intensive care patients. *Crit Care Med* 25:1707-12
120. Thomachot L, Boisson C, Arnaud S, et al (2000) Changing heat and moisture exchangers after 96 hours rather than after 24 hours: a clinical and microbiological evaluation. *Crit Care Med* 28:714-20
121. Craven DE, Connolly MG Jr, Lichtenberg DA, et al (1982) Contamination of mechanical ventilators with tubing changes every 24 or 48 hours. *N Engl J Med* 306:1505-9
122. Dreyfuss D, Djedaini K, Weber P, et al (1991) Prospective study of nosocomial pneumonia and of patient and circuit colonization during mechanical ventilation with circuit changes every 48 hours versus no change. *Am Rev Respir Dis* 143:738-43
123. Hess D, Burns E, Romagnoli D, Kacmarek RM (1995) Weekly ventilator circuit changes. A strategy to reduce costs without affecting pneumonia rates. *Anesthesiology* 82:903-11
124. Kollef MH, Shapiro SD, Fraser VJ, et al (1995) Mechanical ventilation with or without 7-day circuit changes. A randomized controlled trial. *Ann Intern Med* 123:168-74
125. Long MN, Wickstrom G, Grimes A, et al (1996) Prospective, randomized study of ventilator-associated pneumonia in patients with one versus three ventilator circuit changes per week. *Infect Control Hosp Epidemiol* 17:14-9
126. Fink JB, Krause SA, Barrett L, et al (1998) Extending ventilator circuit change interval beyond 2 days reduces the likelihood of ventilator-associated pneumonia. *Chest* 113:405-11
127. Thomachot L, Viallet R, Viguier JM, et al (1998) Efficacy of heat and moisture exchangers after changing every 48 hours rather than 24 hours. *Crit Care Med* 26:477-81
128. Daumal F, Colpart E, Manoury B, et al (1999) Changing heat and moisture exchangers every 48 hours does not increase the incidence of nosocomial pneumonia. *Infect Control Hosp Epidemiol* 20:347-9
129. Boisson C, Viviani X, Arnaud S, et al (1999) Changing a hydrophobic heat and moisture exchanger after 48 hours rather than 24 hours: a clinical and microbiological evaluation. *Intensive Care Med* 25:1237-43
130. Branson R (1999) Humidification for patients with artificial airways. *Respir Care* 44:630-41
131. Memish Z, Oni G, Djazmati W, et al (2001) A randomized clinical trial to compare the effects of a heat and moisture exchanger with a heated humidifying system on the occurrence rate of ventilator-associated pneumonia. *Am J Infect Control* 29:301-5
132. Lucato JJ, Tucci MR, Schettino GP, et al (2005) Evaluation of resistance in 8 different heat-and-moisture exchangers: effects of saturation and flow rate/profile. *Respir Care* 50:636-43
133. Nishimura M, Nishijima MK, Okada T, et al (1990) Comparison of flow-resistive work load due to humidifying devices. *Chest* 97:600-4
134. Manthous CA, Schmidt GA (1994) Resistive pressure of a condenser humidifier in mechanically ventilated patients. *Crit Care Med* 22:1792-5
135. Chiaranda M, Verona L, Pinamonti O, et al (1993) Use of heat and moisture exchanging (HME) filters in mechanically ventilated ICU patients: influence on airway flow-resistance. *Intensive Care Med* 19:462-6
136. Morgan-Hughes NJ, Mills GH, Northwood D (2001) Air flow resistance of three heat and moisture exchanging filter designs under wet conditions: implications for patient safety. *Br J Anaesth* 87:289-91
137. Loeser EA (1978) Water-induced resistance in disposable respiratory-circuit bacterial filters. *Anesth Analg* 57:269-71
138. Unal N, Kanhai JK, Buijk SL, et al (1998) A novel method of evaluation of three heat-moisture exchangers in six different ventilator settings. *Intensive Care Med* 24:138-46

139. Ploysongsang Y, Branson R, Rashkin MC, Hurst JM (1988) Pressure flow characteristics of commonly used heat-moisture exchangers. *Am Rev Respir Dis* 138:675–8
140. Conti G, De Blasi RA, Rocco M, et al (1990) Effects of the heat-moisture exchangers on dynamic hyperinflation of mechanically ventilated COPD patients. *Intensive Care Med* 16:441–3
141. Oh TE, Lin ES, Bhatt S (1991) Resistance of humidifiers, and inspiratory work imposed by a ventilator-humidifier circuit. *Br J Anaesth* 66:258–63
142. Rathgeber J, Kazmaier S, Penack O, Zuchner K (2002) Evaluation of heated humidifiers for use on intubated patients: a comparative study of humidifying efficiency, flow resistance, and alarm functions using a lung model. *Intensive Care Med* 28:731–9
143. Thomachot L, Vialet R, Arnaud S, et al (1999) Do the components of heat and moisture exchanger filters affect their humidifying efficacy and the incidence of nosocomial pneumonia? *Crit Care Med* 27:923–8
144. Nunn JF, Campbell EJ, Peckett BW (1959) Anatomical subdivisions of the volume of respiratory dead space and effect of position of the jaw. *J Appl Physiol* 14:174–6
145. Davis K Jr, Campbell RS, Johannigman JA, et al (1999) Changes in respiratory mechanics after tracheostomy. *Arch Surg* 134:59–62
146. Fraticelli A, Lellouche F, Taillé S, et al (2003) Comparison of different interfaces during NIV in patients with acute respiratory failure. *Am J Respir Crit Care Med* 167:A863
147. Fodil R, Lellouche F, Mancebo J, et al (2011) Comparison of patient-ventilator interfaces based on their computerized effective dead space. *Intensive Care Med* 37:257–62