

Humidification et circuits des respirateurs

A. Boyer; J.-D. Ricard; P. Markowicz; D. Dreyfuss

PLAN DU CHAPITRE

- Humidification des voies aériennes au cours de la ventilation mécanique
- Performances des différents systèmes
- Indications et durée d'utilisation
- Effet du système d'humidification sur la prévention des pneumonies acquises sous ventilation mécanique (PAVM)
- Circuits de ventilation
- Conclusion

Humidification des voies aériennes au cours de la ventilation mécanique

Physiologiquement, l'humidification et le réchauffement des gaz inspirés se font à plusieurs niveaux dans les voies respiratoires. L'essentiel de ce processus se produit au niveau des voies aériennes supérieures, ce qui permet d'amener à la trachée un air à 32 °C, saturé à près de 90 % de vapeur d'eau, c'est-à-dire contenant une humidité absolue d'environ 30 mgH₂O.L⁻¹ (la respiration buccale est un peu moins efficace que la respiration nasale). L'épithélium trachéal et bronchique achève ce processus si bien, qu'en arrivant dans une zone comprise entre la carène et la 3^e génération bronchique (dite zone de saturation isothermique), l'air a une température de 37 °C et une humidité relative¹ de 100 %, c'est-à-dire un contenu en eau de 44 mg.L⁻¹ [1]. Cette zone est relativement stable, même dans des conditions extrêmes de gaz inspirés (en termes de température et d'humidité) de telle sorte qu'il n'y a pas de déperdition thermique ou hydrique.

L'intubation trachéale court-circuite les voies aériennes supérieures, rendant indispensable une humidification et un réchauffement adéquats des gaz inspirés au cours de la ventilation. En effet, l'utilisation de gaz secs et à température ambiante provoque rapidement des lésions de l'épithélium respiratoire [2].

En ventilation mécanique, le réchauffement et l'humidification des gaz inspirés peuvent être obtenus au moyen de deux types de matériels : les humidificateurs chauffants (HC) et les échangeurs de chaleur et d'humidité (ECH) [1].

Humidificateurs chauffants

Les HC sont des dispositifs de réchauffement et d'humidification actifs des gaz inspirés. Ils permettent d'obtenir un air à température choisie et saturé à 100 % en vapeur d'eau à chaque niveau de température.

Il s'agit d'enceintes reposant sur une plaque chauffante régulée par un thermostat dans lesquelles de l'eau est réchauffée à une température choisie. Les gaz inspirés secs circulent dans l'enceinte, se réchauffent et se chargent en vapeur d'eau. Ces systèmes sont placés en série sur la partie inspiratoire du circuit de ventilation. Un fil chauffant à l'intérieur des circuits de ventilation est asservi à la température captée par une sonde placée à l'extrémité « patient » des circuits. Ces systèmes permettent théoriquement de limiter la condensation qui se forme dans les circuits du fait du refroidissement des gaz inspirés dans les circuits. En pratique, les circuits bichauffés n'éliminent pas totalement la condensation et donc la contamination des circuits [3]. De plus, le système d'asservissement et de régulation de la température est très sensible aux conditions ambiantes et peut être mis en défaut entraînant une sur-humidification ou une sous-humidification [4]. L'adjonction d'une compensation automatique permet d'éviter ces problèmes [4]. Les HC ont été considérés historiquement comme le gold standard du conditionnement des gaz inspirés. Ce n'est clairement plus le cas depuis plusieurs années à la fois en raison d'absence de données tangibles sur les résultats cliniques et aussi en raison de coûts d'achat et de fonctionnement nettement supérieurs à ceux des ECH [5, 6].

Échangeurs de chaleur et d'humidité

Les ECH sont des dispositifs jetables dont le but est d'assurer le réchauffement et l'humidification des gaz inspirés mais qui peuvent également avoir une fonction de filtre bactérien et viral entre le patient et les circuits du respirateur. Ces dispositifs fonctionnent de façon passive : ils prélèvent l'énergie (sous forme de chaleur) et l'humidité des gaz expirés pour les restituer aux gaz inspirés. Les gaz expirés par le patient sont chauds et humides ; pendant l'expiration, ils se refroidissent en traversant l'ECH. L'échange d'énergie entre ces gaz et l'ECH se fait par convection et cette condensation d'eau libère une certaine quantité de chaleur. C'est la somme de ces deux énergies (refroidissement de l'air humide et chaleur libérée par la condensation de l'eau) qui va réchauffer l'ECH durant l'expiration. Pendant l'inspiration, l'inverse se produit : les gaz froids et secs arrivent dans l'ECH ; l'eau condensée pendant l'expiration se vaporise et consomme à cet effet une partie de l'énergie accumulée dans l'ECH. Une autre partie de cette énergie sert à réchauffer les gaz inspirés. Il faut un certain nombre de cycles respiratoires avant que l'ECH parvienne à son rendement maximal ; cet état stable est néanmoins obtenu rapidement, en moins de 30 minutes.

Actuellement, la majorité des ECH utilisés en réanimation possèdent une substance hygroscopique capable de se charger d'eau par absorption et adsorption. La partie de la vapeur d'eau qui est capturée par la substance hygroscopique ne subit pas de changement d'état et sera donc restituée aux gaz inspirés sans consommation d'énergie. Du fait de leur propriété hygroscopique, ces ECH ne sont plus imperméables à l'eau ; avec pour conséquence la possibilité que les germes véhiculés par l'air expiré du patient traversent l'ECH et contaminent le circuit respiratoire au-delà de l'ECH. Ce ne sont donc pas des filtres bactériens. Néanmoins, la présence côté circuit du ventilateur d'un air froid et sec empêche le développement des bactéries et la colonisation bactérienne à cet endroit est extrêmement faible [7].

Il existe aussi des ECH hydrophobes. Ceux-ci vont retenir, durant l'expiration, l'eau condensée sur sa « face patient ». À l'inspiration, une grande quantité de chaleur sera restituée aux gaz inspirés (toujours du fait de la faible chaleur spécifique de l'ECH) et l'eau accumulée sur la « face patient » sera vaporisée. L'hydrophobicité de ces matériels leur assure une relative imperméabilité à l'eau et également aux sécrétions bronchiques du patient ; ce sont donc des filtres bactériens et viraux efficaces. Cependant, la performance des ECH purement hydrophobes, en termes d'humidité délivrée au patient, est bien inférieure à celle des ECH hygroscopiques et parfois insuffisante (cf. *infra*) [8].

Les ECH les plus performants sont des ECH mixtes hygroscopiques et hydrophobes qui combinent les deux propriétés à la fois, leur permettant d'être de bons filtres antimicrobiens et de délivrer une humidité proche de celle fournie par les HC [1].

Du fait de leur mode de fonctionnement, les ECH doivent être placés sur le circuit ventilatoire entre la pièce en Y et la sonde d'intubation et augmentent donc l'espace mort par rapport aux HC du fait de leur volume interne qui peut varier de 35 à 90 mL [9].

Enfin, un troisième type d'ECH consistant à rajouter à l'ECH classique un système actif d'humidification et de réchauffement a été développé sans que son indication soit clairement reconnue [10-12].

Performances des différents systèmes

Les HC permettent, en théorie, de délivrer des gaz inspirés dans les conditions physiologiques (à 37 °C avec une humidité absolue de 44 mgH₂O.L⁻¹). En pratique, cette valeur n'est pas atteinte et des valeurs sensiblement plus basses, comprises entre 35 et 40 mgH₂O, ont été mesurées avec le plus performant des HC [4]. Avec la même méthode de mesure, l'humidité délivrée par les ECH les plus performants est

moindre, de l'ordre de 30-32 mgH₂O.L⁻¹ [10, 13]. Pour autant, il n'existe aucune donnée dans la littérature montrant un bénéfice clinique d'une telle différence [1]. La conséquence la plus grave de la sous-humidification est l'obstruction de la sonde d'intubation. Si, par le passé, des ECH hydrophobes (délivrants des valeurs d'humidité inférieures ou égales à 25 mgH₂O.L⁻¹) entraînaient plus d'obstructions que les HC [13, 14-16], cette différence n'est pas retrouvée dans les études plus récentes avec des ECH délivrant une humidité de l'ordre de 30 mgH₂O.L⁻¹ [1, 17-18] et la peur d'une obstruction de sonde d'intubation, à l'heure actuelle, ne justifie plus la préférence d'un dispositif par rapport à un autre, à condition, bien sûr, de choisir un dispositif délivrant au moins 30 mgH₂O.L⁻¹ [1, 17]. Il est maintenant admis que le seuil minimal d'humidité que doit délivrer un dispositif d'humidification est de 30 mgH₂O.L⁻¹. Le choix d'un ECH devra être basé sur son faible volume interne (cf. *infra*) et ses performances, raison pour laquelle il est préférable de ne pas recommander l'utilisation d'ECH hydrophobes purs pour la ventilation mécanique de longue durée de patients de réanimation. Même s'il est souhaitable de vérifier cliniquement, les valeurs d'humidité absolue d'un ECH établies sur banc d'essai par le fabricant, des différences notables ayant été observées [19, 20], la technique de mesure la plus utilisée (psychrométrie) est relativement malaisée et ne permet pas cette vérification par tous. Il est néanmoins possible de se faire une idée uniquement « clinique » du caractère adéquat ou non de l'humidification des gaz inspirés grâce à une assez bonne corrélation entre l'humidité absolue des gaz délivrés par un ECH ou un HC et la présence de condensation d'eau dans le raccord annelé placé entre l'ECH et la sonde trachéale [8]. L'absence de toute condensation ou la présence de quelques rares gouttelettes, de façon prolongée, correspond à une humidité absolue insuffisante, alors que la présence d'une condensation abondante en permanence (nombreuses gouttelettes) indique un niveau d'humidité absolue correct [10]. Cette corrélation n'a pas été retrouvée par tous avec les HC, lorsque la température ambiante est élevée [4]. L'influence de la température ambiante sur les ECH est très faible [21].

Indications et durée d'utilisation

En ventilation invasive

Les données de la littérature indiquent très clairement que la quasi-totalité des patients de réanimation y compris ceux présentant une broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO) peuvent être ventilés avec un ECH [5-7, 19, 23-27]. Il existe cependant des contre-indications à l'utilisation des ECH. Il semble préférable d'utiliser un HC au cours de l'hypothermie (33 °C) en raison du risque de sous-humidification avec un ECH, même si les HC peuvent exposer au risque de surhumidification dans cette situation [28]. Les autres contre-indications sont les fistules broncho-pleurales, certaines modalités de ventilation (jet ventilation, ventilation à haute fréquence d'oscillation), les intoxications par des substances à élimination pulmonaire.

Le volume interne de l'ECH et l'augmentation modérée de la résistance au flux des gaz inspirés qu'il induit vont entraîner, chez les patients les plus difficiles à sevrer, une augmentation du travail respiratoire en ventilation spontanée avec aide inspiratoire [29]. Ceci doit être pris en compte au cours du sevrage, soit en effectuant des épreuves de pièce en T (le retrait de l'ECH élimine son impact négatif), soit en compensant ce surcroît de travail en augmentant le niveau d'aide de 5 à 10 cmH₂O [29].

Pour la même raison d'augmentation de l'espace mort, il est préférable d'utiliser un HC au cours de la ventilation mécanique de SDRA sévères et des asthmes graves, lorsque la réduction du volume courant a entraîné une hypercapnie importante avec acidose respiratoire [30, 31]. S'il n'existe pas de seuil de capnie à partir duquel ce changement doit s'effectuer, l'existence concomitante d'une acidose métabolique ou d'une hypertension intracrânienne justifie l'utilisation d'un HC.

Le *Center for disease control* (CDC) préconise de ne pas remplacer quotidiennement les ECH, indiquant que leur durée minimale d'utilisation est de 48 heures [32]. Plusieurs études ont d'ailleurs montré que la durée d'utilisation de certains ECH performants pouvait être allongée considérablement [7, 19, 26, 33-37] et même jusqu'à 7 jours [19, 25, 27, 38]. Lors d'une de ces études [27], une humidité absolue inférieure à 30 mgH₂O.L⁻¹ avait été mesurée à trois reprises seulement et uniquement chez des patients BPCO, ce qui avait conduit les auteurs à restreindre à l'époque cette extension d'utilisation chez ces patients. Ces mêmes auteurs n'ont jamais observé ce phénomène dans un travail ultérieur [19], et utilisent donc un ECH changé tous les 7 jours pour l'ensemble de leurs patients, BPCO y compris.

En ventilation non invasive (VNI)

Au cours de la VNI en aide inspiratoire, le nez et l'oropharynx ne sont pas court-circuités comme en ventilation invasive. Cependant, la demande ventilatoire est bien souvent supérieure à celle d'un malade

en respiration spontanée et ses capacités d'humidification peuvent être dépassées. Même s'il n'existe pas de recommandation formelle quant à la nécessité d'utiliser un dispositif d'humidification des gaz au cours de la VNI, il semble licite de proposer un dispositif en fonction de la durée des séances et surtout de la tolérance du patient. En effet, si le seuil d'humidité absolue assurant un minimum de confort n'est pas déterminé, Lellouche *et al.* ont montré, au cours d'une séance de CPAP chez des volontaires sains, que l'absence d'humidification (5 mg/H₂O/L d'humidité absolue) était moins bien tolérée qu'une humidification permettant de délivrer 15 mg/H₂O/L. De façon intéressante, il n'y avait pas de différence de confort entre 15 et 30 mg/H₂O/L [39]. Deux études physiologiques réalisées sur des patients en VNI ont observé une augmentation du travail respiratoire avec un ECH de gros volume interne (84 mL) par rapport à un HC [40, 41]. La conclusion de ces deux études déconseillait l'utilisation des ECH au cours de la VNI. Dans une étude plus récente, l'utilisation d'un ECH hygroscopique pur au volume interne plus restreint (38 mL) n'entraînait aucune conséquence gazométrique chez 49 patients en VNI dont une majorité était pourtant en acidose respiratoire [42], laissant supposer qu'une grande partie des effets délétères observés auparavant était le fait d'un volume interne du filtre utilisé trop grand. Une étude randomisée prospective incluant 247 patients en VNI et comparant ECH *versus* HC n'a montré aucune différence significative sur le taux d'intubation (critère de jugement principal) ou sur le niveau d'acidose respiratoire malgré l'emploi d'un ECH possédant un gros espace mort (95 mL) [43]. Les auteurs de cette étude ont conclu qu'il était préférable de débiter la VNI avec un ECH plutôt qu'avec un HC pour des raisons de simplicité et de coût.

Effet du système d'humidification sur la prévention des pneumonies acquises sous ventilation mécanique (PAVM)

Au cours de la ventilation mécanique invasive avec un HC, les circuits des respirateurs sont rapidement contaminés par la flore bactérienne du patient constituant un réservoir secondaire de ces germes [3, 44, 45], alors que l'utilisation d'un ECH permet de maintenir les circuits propres [13, 22, 46, 47]. Cette capacité tient à la fois des propriétés de filtre bactérien et viral mais également au maintien d'une ambiance sèche, limitant toute croissance bactérienne [1, 7]. En utilisation clinique, de nombreuses études ont bien montré qu'un ECH crée une barrière efficace entre le patient et le circuit du ventilateur : même après des durées de ventilation prolongées, les prélèvements bactériologiques faits sur la « face ventilateur » de l'ECH et dans le circuit de ventilation (pièce en Y) restent stériles dans la plupart des cas, alors que la « face patient » de l'ECH est colonisée par les bactéries de la flore trachéale du patient [7, 31, 48]. Ce n'est évidemment pas le cas avec les HC, pour lesquels leur utilisation est associée à une colonisation importante des circuits [44, 45, 49]. L'impact de la colonisation des circuits sur l'incidence des PAVM n'est pas démontré [50]. À ce jour, aucune différence n'a été mise en évidence entre les deux systèmes sur ce risque [18]. Plusieurs recommandations ne privilégient aucun des deux systèmes d'humidification l'un par rapport à l'autre pour la prévention des PAVM [17, 38, 51].

Par contre, l'utilisation d'un ECH réduit considérablement les manipulations septiques des circuits des ventilateurs. De plus, l'allongement de la durée d'utilisation des ECH réduit encore plus le nombre de manœuvres septiques, sans modifier l'incidence des PAVM [31, 34, 36, 37], mais en réduisant considérablement les coûts associés à la ventilation mécanique [1].

La fluidité des sécrétions trachéales pouvant jouer un rôle sur la survenue des PAVM, une étude sur banc d'essai menée sur une durée de ventilation courte n'a pas montré de différence entre HC et ECH sur le volume des sécrétions trachéales [52].

Pour toutes ces raisons, et dans une politique globale de prévention des infections nosocomiales et des transmissions croisées, les ECH pourraient donc être préférés aux HC.

Circuits de ventilation

Comme mentionné précédemment, les circuits des respirateurs sont rapidement contaminés par les bactéries provenant de la flore trachéale du patient avec les HC, du fait de la condensation qui se forme dans les circuits à tel point que des auteurs se posent la question d'utiliser la culture des condensats pour le diagnostic des PAVM [53]. Autrefois en grande quantité, cette condensation devait être régulièrement vidée, exposant alors le personnel soignant à des liquides contaminés, mais faisant aussi courir au patient le risque d'une inhalation massive en cas de mauvaise manipulation des circuits. À l'heure actuelle, l'utilisation des nouveaux circuits bichauffés réduit considérablement la condensation [3] mais n'exclut pas le risque d'inhalation et d'infection [54]. De plus, ces circuits coûtent cher et sont dépourvus de piège à eau permettant la vidange de la condensation lorsqu'elle se forme. Enfin, la présence d'une branche expiratoire du circuit chauffée, tout en évitant la condensation dans le circuit, entraîne le retour au respirateur d'un

gaz humide. Plusieurs arrêts inopinés de respirateurs ont été rapportés pour cette raison [55-57]. Une étude récente a montré que des filtres spécifiques doivent être placés entre la branche expiratoire du circuit et le ventilateur afin d'éviter ce phénomène. Certains filtres peuvent être insuffisants et s'occlure par excès d'humidité selon le type de circuit et/ou d'humidificateur chauffant utilisé [58]. Puisqu'il n'y a pas de condensation dans les circuits avec les ECH, ils sont beaucoup moins contaminés, la « face ventilateur » de l'ECH, la pièce en Y, et le circuit de ventilation restant la plupart du temps stériles [7, 31], et ce, même pour des durées d'utilisation de l'ECH de 7 jours [48]. Qu'en est-il des circuits avec un HC ? Puisqu'ils se contaminent en quelques heures, quel est l'intérêt de les changer tous les jours ? Craven avait montré que la colonisation des circuits était identique qu'ils soient changés toutes les 24 ou 48 heures et de façon un peu surprenante, son équipe avait montré quelques années plus tard que le changement toutes les 24 heures plutôt que toutes les 48 heures constituait un facteur de risque indépendant de pneumonie [44, 59]. Cette augmentation de risque aurait été expliquée par la possibilité de reflux de sécrétions contaminées pendant la manipulation des circuits. Il a été montré par la suite que la colonisation des circuits et l'incidence des pneumopathies nosocomiales étaient identiques que les circuits soient changés toutes les 48 heures ou pas changés de toute la durée de ventilation d'un même patient [49]. Ces résultats ont été confirmés par la suite par d'autres équipes [60, 61]. Il est donc recommandé de ne changer les circuits des respirateurs qu'entre chaque patient [32, 62], sauf cas de souillure grossière, quel que soit le dispositif d'humidification utilisé, permettant, là encore, une réduction des coûts.

Conclusion

Les ECH mixtes ou hygroscopiques purs réchauffent et humidifient les gaz inspirés aussi efficacement sur le plan clinique que les HC, même pour des ventilations de longue durée, notamment en n'entraînant pas plus d'obstruction de sonde d'intubation. En dehors de quelques situations clairement identifiées, tous les patients peuvent être ventilés avec des ECH. Ils limitent la contamination bactérienne des circuits contribuant ainsi à diminuer le nombre de manipulations septiques et le risque de transmission croisée. Ils permettent également une diminution substantielle du coût de la ventilation mécanique par rapport aux HC. Pour toutes ces raisons, l'humidification passive avec un ECH est le mode de conditionnement des gaz inspirés à utiliser en première intention, en ventilation invasive comme en ventilation non invasive.

Les circuits ventilatoires ne nécessitent pas d'être remplacés tout au long d'un même épisode de ventilation, quel que soit le dispositif d'humidification utilisé. De ce fait, il est possible et économique d'utiliser des circuits à usage unique, laissés en place durant tout le séjour d'un patient. Cette recommandation est l'une des rares recommandations du CDC de niveau IA. Il en est de même pour les ECH dont la fréquence de changement (pas plus fréquent que toutes les 48 heures) est de niveau II.

Références

- [1] Ricard J.D., Dreyfuss D. In: Tobin M., ed. Principles and practice of mechanical ventilation. 3rd ed New York: McGraw-Hill; 2013:1199–1211.
- [2] Chalon J., Patel C., Ali M., et al. Humidity and the anesthetized patient. *Anesthesiology*. 1979;50:195–198.
- [3] Ricard J.-D., Hidri N., Blivet A., et al. New heated breathing circuits do not prevent condensation and contamination of ventilator circuits with heated humidifiers. [abstract]. *Am J Respir Crit Care Med*. 2003;167:A861.
- [4] Lellouche F., Taille S., Maggiore S.M., et al. Influence of ambient and ventilator output temperatures on performance of heated-wire humidifiers. *Am J Respir Crit Care Med*. 2004;170:1073–1079.
- [5] Ricard J.D. Gold standard for humidification: heat and moisture exchangers, heated humidifiers, or both?. *Crit Care Med*. 2007;35:2875–2876.
- [6] Siempos I.I., Vardakas K.Z., Kopterides P., et al. Impact of passive humidification on clinical outcomes of mechanically ventilated patients: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Crit Care Med*. 2007;35:2843–2851.
- [7] Boyer A., Thiery G., Lasry S., et al. Long-term mechanical ventilation with hygroscopic heat and moisture exchangers used for 48 hours : a prospective, clinical, hygrometric and bacteriologic study. *Crit Care Med*. 2003;31:823–829.

- [8] Ricard J.-D., Markowicz P., Djedaïni K., et al. Bedside evaluation of efficient airway humidification during mechanical ventilation of the critically ill. *Chest*. 1999;115:1646–1652.
- [9] Branson R.D., Davis K.J. Evaluation of 21 passive humidifiers according to the ISO 9360 standard : moisture output, dead space. and flow resistance. *Respir Care*. 1996;41:736–743.
- [10] Larsson A., Gustafsson A. Svanborg L. A new device for 100 per cent humidification of inspired air. *Crit Care*. 2000;4:54–60.
- [11] Thomachot L., Viviani X., Boyadjiev I., et al. The combination of a heat and moisture exchanger and a Booster (TM): a clinical and bacteriological evaluation over 96 h. *Intensive Care Med*. 2002;28:147–153.
- [12] Chiumello D., Pelosi P., Park G., et al. In vitro and in vivo evaluation of a new active heat moisture exchanger. *Crit Care*. 2004;8:R281–R288.
- [13] Martin C., Perrin G., Gevaudan M.J., et al. Heat and moisture exchangers and vaporizing humidifiers in the intensive care unit. *Chest*. 1990;97:144–149.
- [14] Cohen I.L., Weinberg P.F., Fein I.A., et al. Endotracheal tube occlusion associated with the use of heat and moisture exchangers in the intensive care unit. *Crit Care Med*. 1988;16:277–279.
- [15] Missot B., Escudier B., Rivara D., et al. Heat and moisture exchanger vs heated humidifier during long-term mechanical ventilation. A prospective randomized study. *Chest*. 1991;100:160–163.
- [16] Roustan J.P., Kienlen J., Aubas P., et al. Comparison of hydrophobic heat and moisture exchangers with heated humidifier during prolonged mechanical ventilation. *Intensive Care Med*. 1992;18:97–100.
- [17] Kelly M., Gillies D., Todd D.A., et al. Heated humidification versus heat and moisture exchangers for ventilated adults and children. *Cochrane Database Syst Rev*. 2010;14:CD004711.
- [18] Vargas M., Chiumello D., Sutherasan Y., et al. Heat and moisture exchangers (HMEs) and heated humidifiers (HHs) in adult critically ill patients: a systematic review, meta-analysis and meta-regression of randomized controlled trials. *Crit Care*. 2017;21:123.
- [19] Thiéry G., Boyer A., Pigné E., et al. Heat and moisture exchangers in mechanically ventilated intensive care unit patients : A plea for an independent assessment of their performance. *Crit Care Med*. 2003;31:699–704.
- [20] Lellouche F., Taillé S., Lefrançois F., et al. Humidification performance of 48 passive airway humidifiers: comparison with manufacturer data. *Chest*. 2009;135:276–286.
- [21] Lellouche F., Qader S., Taillé S., et al. Influence of Ambient Temperature and Minute Ventilation on Passive and Active Heat and Moisture Exchangers. *Respir Care*. 2014;59:637–643.
- [22] Ricard J.D., Cook D., Griffith L., et al. Physicians' attitude to use heat and moisture exchangers or heated humidifiers : a Franco-Canadian survey. *Intensive Care Med*. 2002;28:719–725.
- [23] Boots R.J., Howe S., George N., et al. Clinical utility of hygroscopic heat and moisture exchangers in intensive care patients. *Crit Care Med*. 1997;25:1707–1712.
- [24] Hurni J.M., Feihl F., Lazor R., et al. Safety of combined heat and moisture exchanger filters in longterm mechanical ventilation. *Chest*. 1997;111:686–691.
- [25] Kollef M., Shapiro S., Boyd V., et al. A randomized clinical trial comparing an extended-use hygroscopic condenser humidifier with heated-water humidification in mechanically ventilated patients. *Chest*. 1998;113:759–767.
- [26] Markowicz P., Ricard J.-D., Dreyfuss D., et al. Safety, efficacy and cost effectiveness of mechanical ventilation with humidifying filters changed every 48 hours : a prospective, randomized study. *Crit Care Med*. 2000;28:665–671.

- [27] Ricard J.-D., Le Mière E., Markowicz P., et al. Efficiency and safety of mechanical ventilation with a heat and moisture exchanger changed only once a week. *Am J Respir Crit Care Med.* 2000;161:104–109.
- [28] Lellouche F., Qader S., Taille S., et al. Under-humidification and over-humidification during moderate induced hypothermia with usual devices. *Intensive Care Med.* 2006;32:1014–1021.
- [29] Girault C., Breton L., Richard J.C., et al. Mechanical effects of airway humidification devices in difficult to wean patients. *Crit Care Med.* 2003;31:1306–1311.
- [30] Prin S., Chergui K., Augarde R., et al. Ability and safety of a heated humidifier to control hypercapnic acidosis in severe ARDS. *Intensive Care Med.* 2002;28:1756–1760.
- [31] Prat G., Renault A., Tonnelier J.M., et al. Influence of the humidification device during acute respiratory distress syndrome. *Intensive Care Med.* 2003;29:2211–2215.
- [32] Tablan O.C., Anderson L.J., Besser R., et al. Guidelines for preventing health-care-associated pneumonia, 2003 : recommendations of CDC and the Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee. *MMWR Recomm Rep.* 2004;53:1–36.
- [33] Djedaini K., Billiard M., Mier L., et al. Changing heat and moisture exchangers every 48 hour rather than every 24 hour does not affect their efficacy and the incidence of nosocomial pneumonia. *Am J Respir Crit Care Med.* 1995;152:1562–1569.
- [34] Thomachot L., Vialet R., Viguier J.M., et al. Efficacy of heat and moisture exchangers after changing every 48 hours rather than 24 hours. *Crit Care Med.* 1998;26:477–481.
- [35] Davis Jr. K., Evans S.L., Campbell R.S., et al. Prolonged use of heat and moisture exchangers does not affect device efficiency or frequency rate of nosocomial pneumonia. *Crit Care Med.* 2000;28:1412–1418.
- [36] Boisson C., Viviani X., Arnaud S., et al. Changing a hydrophobic heat and moisture exchanger after 48 hours rather than 24 hours : a clinical and microbiological evaluation. *Intensive Care Med.* 1999;25:1237–1243.
- [37] Thomachot L., Boisson C., Arnaud S., et al. Changing heat and moisture exchangers after 96 hours rather than after 24 hours : a clinical and microbiological evaluation. *Crit Care Med.* 2000;28:714–720.
- [38] Thomachot L., Leone M., Razzouk K., et al. Randomized clinical trial of extended use of a hydrophobic condenser humidifier : 1 vs. 7 days. *Crit Care Med.* 2002;30:232–237.
- [39] Lellouche F., Maggiore S.M., Lyazidi A., et al. Water content of delivered gases during non-invasive ventilation in healthy subjects. *Intensive Care Med.* 2009;35:987–995.
- [40] Lellouche F., Maggiore S.M., Deye N., et al. Effect of the humidification device on the work of breathing during noninvasive ventilation. *Intensive Care Med.* 2002;28:1582–1589.
- [41] Jaber S., Chanques G., Matecki S., et al. Comparison of the effects of heat and moisture exchangers and heated humidifiers on ventilation and gas exchange during non-invasive ventilation. *Intensive Care Med.* 2002;28:1590–1594.
- [42] Boyer A., Vargas F., Mousset-Hovaere M., et al. Small dead space heat and moisture exchangers do not impede gas exchange during noninvasive ventilation: a comparison with a heated humidifier. *Intensive Care Med.* 2010;36:1348–1354.
- [43] Lellouche F., L'Her E., Abroug F., et al. Impact of the humidification device on intubation rate during noninvasive ventilation with ICU ventilators: results of a multicenter randomized controlled trial. *Intensive Care Med.* 2014;40:211–219.
- [44] Craven D.E., Goularte T.A., Make B.J. Contaminated condensate in mechanical ventilator circuits. A risk factor for nosocomial pneumonia. *Am Rev Respir Dis.* 1984;129:625–628.
- [45] Comhaire A., Lamy M. Contamination rate of sterilized ventilators in an ICU. *Crit Care Med.* 1981;9:546–548.

- [46] Dreyfuss D., Djedaini K., Gros I., et al. 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.* 1995;151:986–992.
- [47] Branson R.D., Davis K.J., Campbell R.S., et al. Humidification in the intensive care unit. Propsective study of a new protocol utilizing heated and humidification and a hygrosopic condenser humidifier. *Chest.* 1993;104:1800–1805.
- [48] Ricard J.-D., Dreyfuss D. Efficiency and safety of mechanical ventilation with a heat and moisture exchanger changed once a week [letter to the editor]. *Am J Respir Crit Care Med.* 2001;164:1999–2000.
- [49] Dreyfuss D., Djedaini K., Weber P., et al. 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.* 1991;143:738–743.
- [50] Ricard J.D., Boyer A., Dreyfuss D. The effect of humidification on the incidence of ventilator-associated pneumonia. *Respir Care Clin N Am.* 2006;12:263–273.
- [51] Hubmayr R.D., Burchardi H., Elliot M., et al. Statement of the 4th International Consensus Conference in Critical Care on ICU-Acquired Pneumonia-Chicago, Illinois, May, 2002. *Intensive Care Med.* 2002;28:1521–1536.
- [52] Solomita M., Palmer L.B., Daroowalla F., et al. Humidification and secretion volume in mechanically ventilated patients. *Respir Care.* 2009;54:1329–1335.
- [53] Carter SR, Davis CS, Kovacs EJ. Exhaled breath condensate collection in the mechanically ventilated patient. *Respir Med.* 2012;106:601–613.
- [54] Khan M.S., Karnam H.F. Accidental spillage of breathing circuit condensate into airway leading to ventilator-associated pneumonia. *J Crit Care.* 2015;30:646–647.
- [55] Rainout from a Fisher & Paykel heated humidification system can shut down certain ventilators. *Health Devices.* 2002;31:114–115.
- [56] Rainout from Fisher & Paykel’s 850 humidification system shuts down Respironics Esprit and adversely affects other ventilators. *Health Devices.* 2005;34:46–48.
- [57] Rainout puts ventilator-dependent patients at risk. *Health Devices.* 2002;31:461–463.
- [58] Tonnelier A., Lellouche F., Bouchard P.A., et al. Impact of humidification and nebulization during expiratory limb protection: an experimental bench study. *Respir Care.* 2013;58:1315–1322.
- [59] Craven D.E., Kunches L.M., Kilinsky V., et al. Risk factors for pneumonia and fatality in patients receiving continuous mechanical ventilation. *Am Rev Respir Dis.* 1986;133:792–796.
- [60] Hess D., Burns E., Romagnoli D., et al. Weekly ventilator circuit changes. A strategy to reduce costs without affecting pneumonia rates. *Anesthesiology.* 1995;82:903–911.
- [61] Kollef M.H., Shapiro S.D., Fraser V.J., et al. Mechanical ventilation with or without 7-day circuit changes. A randomized controlled trial. *Ann Intern Med.* 1995;123:168–174.
- [62] Guidelines for the Management of Adults with Hospital-acquired, Ventilator-associated, and Healthcare-associated Pneumonia 10.1164/rccm, 200405-644ST. *Am J Respir Crit Care Med.* 2005;171:388–416.

¹ Humidité relative (HR) : cette valeur exprimée en pourcentage correspond au rapport humidité absolue/humidité absolue à saturation : $HR = HA/HA_s$.