

PCO₂ transcutanée : pourquoi, comment et pour qui ?

Transcutaneous PCO₂: why, how and for whom?

P.-E. Gancel · R. Masson · D. Du Cheyron · E. Roupie · F. Lofaso · N. Terzi

Reçu le 9 juillet 2011 ; accepté le 9 janvier 2012
© SRLF et Springer-Verlag France 2012

Résumé La mesure de la pression transcutanée en dioxyde de carbone (PtcCO₂) n'est pas une technologie récente, les premiers essais remontant au début des années 1960. L'amélioration des moniteurs, la miniaturisation et le développement des électrodes utilisées permettent aujourd'hui de proposer en routine une surveillance de la PtcCO₂ continue, fiable, non invasive, simple et rapide. Cet accès indirect et simple à la pression artérielle en CO₂ (PaCO₂) est pour le clinicien une aide précieuse dans nombre de situations cliniques. Les moniteurs actuels permettent de mesurer aussi de façon rapide et non invasive bien d'autres paramètres (saturation transcutanée en oxygène, fréquences respiratoire et cardiaque, indice de perfusion tissulaire...), utiles pour apprécier la fonction respiratoire d'un patient et pour en suivre l'évolution dans le temps. La tendance actuelle en réanimation est de faire le monitoring le moins invasif possible, même s'il convient d'être prudent quant à l'utilisation abusive ou inadéquate des paramètres ainsi mesurés. Cette revue fait la synthèse du mode de fonctionnement, des avantages et limites, ainsi que des domaines d'application des outils de mesure de la PtcCO₂.

Mots clés PCO₂ transcutanée · Gazométrie artérielle · Monitoring · Non invasif · Ventilation mécanique

P.-E. Gancel · E. Roupie
Service d'accueil et de traitement des urgences,
CHRU Caen, F-14000 Caen, France

R. Masson · D. Du Cheyron
Service de réanimation médicale, CHRU Caen, F-14000 Caen, France

F. Lofaso
Services de physiologie, explorations fonctionnelles,
hôpital Raymond-Poincaré, centre d'investigation clinique,
innovations technologiques, AP-HP, EA 4497,
université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines,
F-92380 Garches, France

Inserm U955, F-94000 Créteil, France

N. Terzi (✉)
Inserm, U1075, service de réanimation médicale,
CHRU Caen, université de Caen, F-14000 Caen, France
e-mail : terzi-n@chu-caen.fr

Abstract Measurement of the transcutaneous pressure of carbon dioxide (PtcCO₂) is not a recent technology, as the first studies were conducted in the 1960s. Since then, improvements in the monitors and electrodes, together with greater miniaturization, have made continuous PtcCO₂ a reliable, noninvasive, simple, and rapid measurement available for everyday clinical use. PtcCO₂ monitoring is a simple mean for estimating the arterial CO₂ partial pressure (PaCO₂), which is invaluable in several clinical situations. Currently available PtcCO₂ monitors are reliable and can be coupled with other parameters (SpO₂, breathing rate, heart rate, tissue perfusion index...) to produce a rapid and noninvasive assessment of respiratory function and, more importantly, to monitor respiratory function over time. The current preference for noninvasive monitoring in the intensive care unit has driven the development of new technologies; however, caution is mandatory to avoid any abusive or inappropriate use. Given the fast-expanding array of available technologies and the abundant publications in this field, an overview of PtcCO₂ monitoring appears useful. We describe here the available devices and discuss their advantages and limits, as well as the potential fields of their application.

Keywords Transcutaneous CO₂ · Arterial blood gases · Monitoring · Noninvasive · Mechanical ventilation

Introduction

La surveillance de l'hématose, reflet de l'état ventilatoire du patient, est une préoccupation pluriquotidienne pour le clinicien dans de nombreuses situations : médecine d'urgence, réanimation, mais également lors du suivi au long cours, notamment en cas d'oxygénothérapie ou de ventilation à domicile. La méthode de référence reste à l'heure actuelle la mesure par ponction artérielle des pressions partielles en oxygène (PaO₂) et en dioxyde de carbone (PaCO₂), renseignant également sur la valeur de pH [1]. Outre son aspect invasif, cette méthode pose le problème de son caractère

ponctuel et séquentiel. Elle n'est le reflet de l'état respiratoire du patient qu'à un instant donné [2] et peut ne pas être fiable, si le prélèvement n'est pas réalisé selon les règles de bonne pratique [3] : l'échantillon doit être de 2 ml au moins et doit être transporté dans la glace et analysé dans les 30 minutes pour limiter le phénomène de consommation d'O₂ et de production de CO₂ par les éléments figurés du sang [4]. À 20 °C (température ambiante), ce phénomène est responsable d'une diminution de la PaO₂ de 30 mmHg par heure pour une PaO₂ initiale de l'ordre de 100 mmHg. Pour des PaO₂ plus élevées, supérieures à 250 mmHg, cette diminution peut atteindre 75 mmHg. Par ailleurs, la PaCO₂ augmente de 2,5 mmHg et le pH diminue de 0,02 par heure.

Ainsi, une surveillance continue de l'hématose peut sembler préférable pour apprécier l'évolution d'une pathologie et l'impact des thérapeutiques instaurées.

Deux méthodes ont vu le jour dès le début des années 1960 : la première consistait en une mesure continue de la PaCO₂ et de la PaO₂ par un capteur de mesure intra-artériel via un cathétérisme artériel invasif [5,6] ; la seconde, non invasive, effectuait ces mesures à l'aide d'une électrode transcutanée [7,8]. Elle a bénéficié d'une forte implication de l'industrie qui s'intéressait alors avant tout au monitoring néonatal [9–11].

La surveillance continue par mesure *in vivo* intra-artérielle a pu se développer au cours des décennies 1970 et 1980, du fait des progrès réalisés sur la technologie des fibres optiques, et de la miniaturisation des capteurs. Le principe reposait soit sur un capteur optique miniaturisé, soit sur un capteur intégré dans une chromatographie en phase gazeuse, soit sur un système de spectrométrie de masse utilisant comme transporteur un gaz ou le vide [12]. Cette approche initialement prometteuse a vu son développement abandonné en raison des risques inhérents à un cathétérisme artériel prolongé, notamment en néonatalogie, et du manque de fiabilité de la technique, en partie lié au dépôt de fibrine sur le cathéter et au contact de la paroi, obligeant à des étalonnages fréquents [13,14].

Une alternative à cette méthode invasive était développée en parallèle : la mesure de la pression transcutanée en dioxyde de carbone (PtcCO₂). Elle a été décrite pour la première fois en 1960 par Severinghaus [15]. Elle utilisait une électrode spécifique appliquée à même la peau. Cette électrode mesurait aussi la pression transcutanée en oxygène et avait pour objectif le monitoring de l'oxygénation en réanimation pédiatrique [16,17].

Ce n'est que plusieurs années plus tard que l'intérêt s'est porté sur le monitoring de la PtcCO₂ chez l'adulte, débouchant ainsi sur la commercialisation d'un premier moniteur au début des années 1980. Des modifications dans le type d'électrodes utilisées ont été progressivement réalisées, pour finalement voir se développer l'utilisation d'une électrode chauffante, permettant l'artérialisation du tissu sous-

cutanée, et une analyse de la concentration des gaz diffusant à travers celui-ci [12,18].

Pourquoi ?

Le monitoring des échanges gazeux est incontournable pour le diagnostic et le suivi sous traitement des insuffisances respiratoires aiguës [19–24]. Cette évaluation repose le plus souvent sur la surveillance de l'oxymétrie de pouls (SpO₂) et des paramètres cliniques, auxquels s'ajoute la mesure ponctuelle des gaz du sang. La SpO₂ est un reflet indirect de l'oxygénation, mais ne renseigne pas sur la PaCO₂.

La PaCO₂ peut être extrapolée plus ou moins précisément de l'analyse du capnogramme. Celui-ci permet un monitoring continu instantané de la fraction de gaz carbonique expirée par le malade lors de chaque cycle ventilatoire, notamment en fin d'expiration (EtCO₂). Cette mesure est fiable, mais présente des limites [8,25,26].

L'EtCO₂ est un mauvais reflet de la PaCO₂, car elle est influencée par les modifications de rapports ventilation/perfusion pulmonaire, qu'elles soient d'origine respiratoire ou circulatoire [2]. La capnographie permet de calculer un gradient alvéolocapillaire en CO₂ dont les principales causes d'augmentation sont l'hypoperfusion alvéolaire, l'embolie pulmonaire, l'arrêt cardiaque et la ventilation superficielle. Ce gradient a été proposé pour détecter une embolie pulmonaire avec une sensibilité de 100 %, mais une spécificité de 65 % [27]. Glenski et Cucchiara ont suggéré son intérêt dans la détection d'embolie gazeuse et ont montré sa supériorité sur la PtcCO₂ exprimée en rapidité de diagnostic [28]. La capnographie est utile pour détecter une déconnexion du ventilateur, une réinhalation sous ventilation mécanique en anesthésie ou une intubation œsophagienne. Lors de la prise en charge des arrêts cardiorespiratoires, elle reflète le débit cardiaque et permet d'apprécier l'efficacité du massage cardiaque externe [29]. Elle n'est pas applicable en ventilation spontanée et difficilement en ventilation non invasive (VNI), mode de ventilation de plus en plus largement utilisé [30,31].

La PtcCO₂ permet pour sa part un monitoring continu, non invasif, rapide et simple à mettre en œuvre, utilisable en ventilation spontanée et en VNI. Initialement validée en néonatalogie [9,11,32], ce n'est que plus tardivement qu'elle a fait l'objet d'études chez l'adulte, en anesthésie générale, pour le suivi de patients insuffisants respiratoires chroniques, ou lors de polysomnographies afin d'objectiver la survenue d'hypoventilation alvéolaire nocturne et d'épisodes d'apnées [33–36].

Les moniteurs actuellement disponibles permettent de mesurer simultanément PtcCO₂ et SpO₂. Simples d'utilisation, ces moniteurs sont fiables et fournissent des résultats comparables à la méthode de référence qu'est la gazométrie artérielle, dans de nombreuses situations cliniques aiguës ou

chroniques [37–50]. Ces situations seront développées ci-dessous.

Ainsi, le monitoring de la $P_{tc}CO_2$, couplé à celui de la SpO_2 , pourrait simplifier la surveillance des patients en insuffisance respiratoire aiguë, notamment dans le cadre du recours grandissant à la VNI dans de nombreuses structures intra- et extrahospitalières [51–54], où le monitoring de la $P_{tc}CO_2$ pourrait aider à adapter au mieux les paramètres ventilatoires.

Comment ?

Les premiers moniteurs permettant une mesure continue de la $P_{tc}CO_2$ ont été commercialisés vers la seconde moitié des années 1980. Actuellement, plusieurs moniteurs comparables sur le principe de fonctionnement existent sur le marché. Les deux moniteurs les plus fréquemment utilisés, et ayant fait l'objet de validation indépendante, sont le Tosca 500[®] (Radiometer SAS, Suisse) et le SenTec[®] (SenTec, AG, Suisse) [55].

Principe de fonctionnement

La mesure transcutanée de la $PaCO_2$ utilise les propriétés de diffusion du CO_2 à travers les tissus humains et notamment la peau. Le CO_2 peut être détecté par une électrode posée à même la peau. Une hyperhémie locale, obtenue en chauffant la surface concernée à 42 °C, permet une artérialisation du sang des capillaires cutanés. L'électrode de Severinghaus permet alors une évaluation indirecte du CO_2 par la mesure

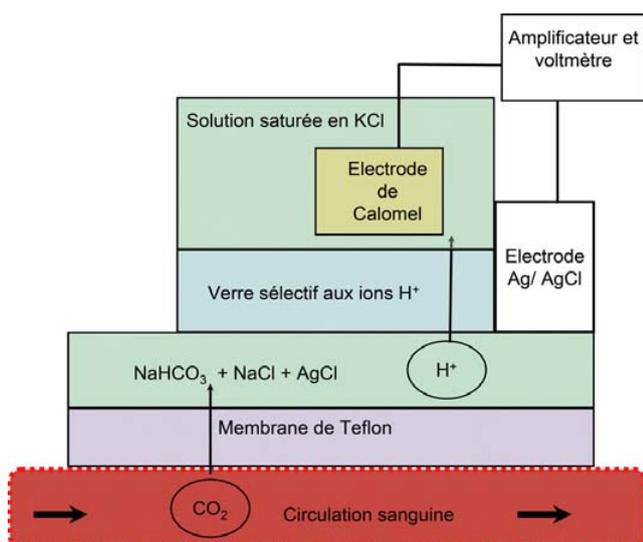


Fig. 1 Représentation schématique du fonctionnement d'une électrode de Severinghaus

du potentiel électrochimique, c'est-à-dire du pH. Cette mesure est réalisée par la détermination du potentiel électrochimique existant entre une électrode à pH miniaturisée et une électrode argent/chlorure d'argent (Ag/AgCl) de référence. Le pH étant proportionnel au logarithme de la $PaCO_2$, la valeur de $PaCO_2$ est déduite du pH. Le mode de fonctionnement de cette électrode est représenté sur la Figure 1, et un modèle actuel est montré dans la Figure 2.

Un algorithme de correction prend en compte deux variables d'augmentation de la valeur mesurée par rapport à la $PaCO_2$: d'une part, l'augmentation de la température intensifiant le métabolisme cellulaire, correspondant à un gradient $P_{tc}CO_2 - PaCO_2$ d'environ 4,5 mmHg, et d'autre part, une augmentation locale de la production de CO_2 par le métabolisme des cellules cutanées elles-mêmes, cette dernière représentant une augmentation du gradient de l'ordre de 5 mmHg [56].

En pratique

L'ensemble du système est représenté sur la Figure 3 : il est composé d'un moniteur relié à un capteur se plaçant au niveau du lobe de l'oreille. Le moniteur comprend un écran affichant la SpO_2 et la $P_{tc}CO_2$ en valeur absolue et sous forme de courbe, ainsi que l'intensité du signal perçu par le capteur, qui est fonction de la vascularisation locale. Une cartouche de CO_2 permet la calibration du capteur, en se servant d'une valeur étalon. La dérive au cours du temps du signal recueilli est estimée à 1 mmHg par heure au maximum [57]. Cette dérive peut être considérée comme faible, mais impose une calibration du capteur toutes les quatre heures environ.

Berlowitz et al. [39] ont évalué la fiabilité de la mesure de $P_{tc}CO_2$ lors d'un enregistrement de huit heures. La $P_{tc}CO_2$ était mesurée à l'aide de deux moniteurs[®] Tina (Radiometer SAS, Suisse), chez six patients stables hémodynamiquement,



Fig. 2 Photographie d'une électrode en place avec son clip de fixation. Capteur du moniteur Tosca 500[®], Radiometer SA



TOSCA 500 (Radiometer SA)



SenTec (SenTec, AG)

Fig. 3 Moniteurs actuels : Tosca 500[®] (Radiometer SA) et SenTec[®] (SenTec, AG)

et comparée à la PaCO₂. L'adéquation entre la PaCO₂ et la PtcCO₂ était significativement dépendante du temps, marquée par l'installation d'une dérive significative ($p = 0,002$). Il n'était pas noté de différence entre les deux moniteurs utilisés. Quel que soit le moniteur, le biais observé était de 3,6 mmHg, et les limites d'agrément se répartissaient de -5,1 à 12,3 mmHg. L'utilisation d'un algorithme de correction permettait de réduire ce biais à 0,4 mmHg et d'améliorer l'adéquation (de -5,5 à 6,4 mmHg). Nous reverrons au cours de cette revue que cette dérive a intéressé de nombreuses équipes et a été évaluée dans plusieurs situations cliniques.

Lors de la mise en place du capteur sur le patient, un délai minimum de trois à cinq minutes est nécessaire pour obtenir une artérialisation locale suffisante et de bonne qualité, ainsi qu'une stabilisation du signal. Ce délai est à comparer à celui nécessaire à la réalisation d'une gazométrie artérielle et à son analyse, sensiblement proche. Il n'existe toutefois pas d'étude ayant comparé spécifiquement cette donnée.

Pour qui ?

Il est désormais admis que l'amélioration de la prise en charge des patients passe par un monitoring le moins invasif possible. Il est néanmoins nécessaire de définir clairement quels malades doivent bénéficier du monitoring de la PtcCO₂ et pour quel bénéfice attendu. Nous distinguerons ici les situations de médecine d'urgence, de réanimation et de suivi chronique, ambulatoire ou non.

Applications en médecine d'urgence

Les situations cliniques aiguës sont très fréquentes en médecine d'urgence qui conduisent actuellement à la réalisation d'une gazométrie, le plus souvent par ponction unique artérielle, consommatrice de temps, et dont les complications même si elles sont rares existent [58]. Un outil de surveillance cherchant à se substituer à cette gazométrie doit non seulement être fiable mais aussi être d'emploi rapide et ergonomique.

Gancel et al. ont pu montrer la faisabilité de la mesure de la PtcCO₂ aux urgences à l'aide du moniteur Tosca 500[®] (Radiometer SAS, Suisse) et sa fiabilité par comparaison à la gazométrie artérielle, et ce, malgré une gamme de PaCO₂ relativement étendue [37]. Les limites d'agrément entre la PtcCO₂ et la PaCO₂ observées étaient de ± 6 mmHg. Cette étude ne s'est toutefois intéressée qu'à une mesure ponctuelle. Il n'était pas rapporté de complications, et la durée d'obtention du résultat était sensiblement comparable à celle d'une gazométrie artérielle. Cette technique semble donc utilisable aisément en médecine d'urgence comme aide au diagnostic et à l'appréciation de la gravité d'une pathologie respiratoire. La place de la technique comme paramètre de surveillance continue reste à étudier dans ce contexte.

Applications en surveillance d'une VNI

Kelly et Klim se sont intéressés à l'utilisation et à la fiabilité de la PtcCO₂ chez des patients en VNI [44]. Quarante-six comparaisons entre PaCO₂ et PtcCO₂ ont été réalisées chez des patients hypercapniques (PaCO₂ médiane de l'ordre de 60 mmHg). La différence moyenne observée était de 6,1 mmHg, avec des limites d'agrément bien plus étendues, allant de -10,1 à 22,3 mmHg. Ces résultats contrastaient avec les études antérieures, notamment celle de Cox et al. [59], qui dès 2006, avaient évalué la possibilité d'une surveillance de la VNI de patients hospitalisés pour une exacerbation de bronchopneumopathie chronique obstructive, à l'aide du moniteur Tosca[®] (Radiometer SAS, Suisse). Vingt-deux patients avaient été inclus, la corrélation entre PaCO₂ et PtcCO₂ était forte, aussi bien à l'admission qu'une et quatre heures après l'instauration de la VNI ($r = 0,99, 0,99$ et $0,98$ respectivement). Plus récemment, Perrin et al. ont observé, dans une population de patients consultant pour une insuffisance respiratoire aiguë secondaire à l'exacerbation d'un asthme ou à une pneumopathie, des limites d'agrément de $\pm 3,8$ mmHg [40]. McVicar et Eager ont observé, quant à eux, une différence de 1,5 mmHg avec des limites d'agrément de $\pm 6,75$ mmHg [38].

Ces discordances peuvent en partie s'expliquer par une probable moindre performance de la mesure de la PtcCO₂ pour des valeurs élevées. Son utilisation ponctuelle ou pour

le suivi des patients sous VNI reste cependant une alternative intéressante.

Un des intérêts potentiels de la PtcCO₂ tient à la surveillance prolongée qu'elle permet. C'est pourquoi Storre et al. ont comparé les variations de PtcCO₂ et de PaCO₂ chez dix patients en insuffisance respiratoire aiguë (PaCO₂ ≥ 50 mmHg et pH ≥ 7,30) pendant l'adaptation à une VNI à l'aide d'un ventilateur volumétrique, avec pour objectif de réduire au maximum la PaCO₂ [60]. Les mesures, réalisées pendant les quatre premières heures, concernaient la PaCO₂ sur échantillon de sang prélevé par cathéter artériel et la PtcCO₂ mesurée avec le moniteur SenTec[®] Digital Monitor (DM) [SenTec, AG, Suisse] via un capteur auriculaire. Une calibration avait été réalisée in vitro pour chaque patient avant le début des mesures. Une période de 20 minutes au repos en ventilation spontanée était observée afin d'obtenir un équilibre des mesures transcutanées. La première mesure comparative de PaCO₂ et de PtcCO₂ était réalisée en ventilation spontanée avant VNI, puis toutes les dix minutes, avec recueil de la valeur de PtcCO₂ au moment du prélèvement artériel (T0) puis deux (T2) et cinq (T5) minutes plus tard. La PtcCO₂ à T5 n'était pas prédictive de PaCO₂. Après correction de la dérive du capteur à la quatrième heure, seule la PtcCO₂ à T2 permettait de se rapprocher de la PaCO₂, avec par régression linéaire, un coefficient de corrélation r de 0,956 ($p < 0,01$). Ce résultat suggérait l'existence d'un décalage d'environ deux minutes entre les mesures artérielles et transcutanées. En l'absence de correction de la dérive, la différence moyenne était de 4,6 mmHg (3,9 à 13,2 mmHg) et, après correction de la dérive, de 2,9 mmHg (-1,7 à 7,5 mmHg). Cette étude concluait que la PtcCO₂ permettait une mesure non invasive, continue et sensible permettant de suivre les variations de la PaCO₂. Cependant, la corrélation de la dérive améliorait l'exactitude de PtcCO₂ par rapport à PaCO₂, mais ne pouvait être réalisée qu'après la fin des mesures, ce qui n'est pas compatible avec la pratique clinique. Un délai de deux minutes entre les deux mesures permettait d'en rapprocher les résultats, ce qui est acceptable en clinique, mais les valeurs de PtcCO₂ restaient inférieures à celles de PaCO₂. Enfin, une variance individuelle entre ces deux valeurs ne pouvait être exclue : le monitoring de PtcCO₂ ne peut donc remplacer totalement l'analyse des gaz du sang artériel.

Applications en réanimation

En réanimation néonatale, le monitoring de la PtcCO₂ est largement utilisé depuis plus de 20 ans en raison de son caractère non invasif. À l'inverse, en réanimation d'adultes, alors même que la réalisation d'une gazométrie artérielle est un geste très souvent réalisé et banal dans de nombreuses situations cliniques, ce monitoring est resté longtemps très

peu utilisé et reste encore à l'heure actuelle relativement confidentiel.

Une des raisons de cette utilisation restreinte est probablement liée au fait qu'un grand nombre de malades ont un cathétérisme artériel pour une autre raison, notamment de surveillance hémodynamique, et que la gazométrie en est par conséquent simplifiée.

Senn et al. ont étudié un collectif de 18 patients hospitalisés pour une détresse respiratoire aiguë ou un syndrome coronarien aigu, dont 15 ventilés, et neuf traités par des substances vasoactives [61]. Ils ont comparé 24 mesures répétées de gaz du sang à 24 mesures de PtcCO₂ et de SpO₂ réalisées à l'aide du moniteur combiné Tosca 500[®] (Radiometer SAS, Suisse). La différence moyenne observée pour les mesures de PtcCO₂ et de PaCO₂ était de 3 ± 7 mmHg : elle restait stable au fil du temps (1 ± 6 mmHg). Pour ce qui est de l'oxygénation (SaO₂ vs SpO₂), la limite d'agrément observée était de 1 ± 4 %. Aucune différence n'était observée, que les patients soient ou non sous substances vasoactives.

Rodriguez et al. ont évalué en 2006 la performance du SenTec[®] (SenTec AG, Suisse) [50]. Chez 50 patients hospitalisés en réanimation, 168 échantillons de gaz du sang ont été comparés à une mesure de PtcCO₂. Pour 137 mesures, les patients étaient sous ventilation mécanique, et pour 82, ils recevaient des catécholamines. Le temps d'utilisation moyen du moniteur était de 17 ± 17 heures. La différence moyenne observée entre la PaCO₂ et la PtcCO₂ était de $-0,2 \pm 4,6$ mmHg, avec une forte corrélation entre les deux paramètres ($r = 0,96$; $p < 0,01$). Les variations de PaCO₂ étaient fortement corrélées aux variations de PtcCO₂ ($r = 0,88$; $p < 0,01$). Des variations de plus de 8 mmHg de PtcCO₂ avaient une sensibilité de 86 % et une spécificité de 80 % pour prédire un changement identique de PaCO₂. L'existence d'une ventilation mécanique ou l'utilisation de catécholamines ne modifiait pas ces résultats, seule l'hypothermie avait un effet modéré sur la fiabilité des mesures.

Nicolini et Ferrari se sont intéressés à la pertinence et à la faisabilité d'utilisation du moniteur Tosca 500[®] (Radiometer SAS, Suisse) au cours de l'insuffisance respiratoire aiguë [43]. Quatre-vingts patients hospitalisés en réanimation pour une insuffisance respiratoire aiguë, relevant d'une VNI et hémodynamiquement stables, ont été inclus. Les résultats gazométriques (SaO₂ et PaCO₂) ont été comparés aux données de SpO₂ et de PtcCO₂ obtenues par l'utilisation du Tosca 500[®]. Les limites d'agrément rapportées pour la PtcCO₂ et la PaCO₂ étaient de ± 7 mmHg, permettant de conclure à la possibilité d'une utilisation chez des patients sous VNI.

Johnson et al. ont évalué, dans une unité de sevrage spécialisée, la fiabilité de cette mesure lors du sevrage de la ventilation mécanique soit pendant des épreuves de ventilation spontanée (23 mesures chez 15 patients), soit pendant la

première nuit sans ventilation mécanique (12 mesures chez 12 patients), ainsi que lors de fibroscopies bronchiques (80 mesures chez 21 patients ventilés pendant le geste endoscopique) [49]. Les mesures simultanées de PtcCO₂ et de PaCO₂ ont été comparées : le coefficient de corrélation était de 0,93 et la différence entre les deux mesures de 0,5 ± 4,1 mmHg. Comparativement, le coefficient de corrélation entre la PEtCO₂ et la PaCO₂ était de 0,78, et était affecté par les pathologies responsables d'anomalies des rapports ventilation/perfusion comme pour la bronchopneumopathie chronique obstructive.

En postopératoire de chirurgie cardiaque, une première étude de Chakravarthy et al. s'est attachée à évaluer l'utilisation d'une surveillance de la PtcCO₂ dans le sevrage de la ventilation mécanique et sa corrélation à la PaCO₂ [48]. Chez 32 patients hémodynamiquement stables, 212 PaCO₂ mesurées sur des échantillons de gaz du sang ont été comparés à la PtcCO₂ obtenue par l'utilisation d'un moniteur TCM4-Tina[®] (Radiometer SAS, Suisse). Les auteurs ont observé que les mesures de PtcCO₂ et de PaCO₂ étaient interchangeables dans 96 % des cas. Il n'était pas observé de dérive, mais les enregistrements étaient limités à trois heures au maximum.

Plus récemment, Roediger et al. ont évalué l'utilisation d'un nouveau moniteur V-Sign[™] 2 (SenTec, AG, Suisse) dans le cadre de la surveillance du sevrage de la ventilation mécanique de 20 patients, en postopératoire de chirurgie cardiaque [42]. La PaCO₂ a été comparée à la PtcCO₂ mesurée avec un capteur positionné à l'oreille, sur le front ou la pommette. Le positionnement du capteur sur le lobe de l'oreille donnait la meilleure adéquation (biais moyen de 1,1 mmHg et limites d'agrément de -3,4 à 5,5 mmHg) ; les limites d'agrément restaient acceptables quelle que soit la localisation. Les auteurs concluaient donc à la faisabilité de l'utilisation de ce type de monitoring pour la surveillance de sevrage de la ventilation mécanique. La dérive négligeable observée au cours des six heures d'enregistrement était sans doute liée à l'évolution technologique du moniteur, qui inclut un algorithme de correction de la dérive au cours du temps.

La faisabilité de l'utilisation de la PtcCO₂ en milieu de réanimation a été donc clairement démontrée, ouvrant ainsi la porte à un monitoring facile d'utilisation dans des situations où la PaCO₂ se doit d'être contrôlée. Il est cependant indispensable de ne pas négliger l'existence d'une dérive au cours du temps, même si les moniteurs sont en permanente amélioration.

Il convient également de souligner certaines limites, qui doivent être prises en compte dans l'indication et l'interprétation des résultats, telles la vasoconstriction locale, qui peut exister du fait de l'utilisation de substances vasoconstrictives, et les situations d'état de choc. Même si une étude récente de Bendjelid et al. a montré sur un échantillon de

patients de réanimation, dont 16 % de patients choqués, une concordance acceptable entre la PaCO₂ et la PtcCO₂ [62], il paraît encore déraisonnable d'estimer la PaCO₂ à partir d'une valeur tissulaire de PtcCO₂ à la phase aiguë d'un état de choc chez un patient dont l'hémodynamique est instable.

L'utilisation de la PtcCO₂ comme reflet de la perfusion tissulaire, pressentie dès le début des années 1980 par Abraham et al. [63], est actuellement en train d'émerger. Il s'agit de l'utilisation de la PtcCO₂ comme reflet de la perfusion tissulaire. Dans l'optique d'une utilisation multimodale séquentielle de la PtcCO₂, à visée initialement « perfusionnelle » ou hémodynamique et secondairement « ventilatoire », Vallée et al. se sont intéressés à l'utilisation de la PtcCO₂ comme reflet de la perfusion cutanée chez des patients en état de choc septique [64]. Ils ont pu montrer qu'une mesure conjointe de la PtcCO₂ à 37 °C et de la PaCO₂, permettant un calcul du gradient P_c-aCO₂, était une méthode d'évaluation fiable de la microcirculation en rendant compte de l'adéquation de la perfusion tissulaire. Cette utilisation prometteuse pourrait permettre d'appréhender en temps réel l'impact microcirculatoire d'une thérapeutique.

Il pourrait être intéressant d'élargir le champ d'application de la PtcCO₂ à d'autres situations cliniques où la surveillance de la PaCO₂ est actuellement nécessaire, comme par exemple la surveillance multimodale du traumatisé crânien. Ainsi, lors du transport intrahospitalier, Hinkelbein et al. ont comparé la faisabilité et la précision de la surveillance de la PCO₂ obtenue par trois techniques différentes : PaCO₂ obtenue à l'aide d'un analyseur mobile, PetCO₂ et PtcCO₂ [65]. Ces mesures étaient comparées à une mesure de référence gazométrique analysée à l'aide d'un analyseur fixe. Les limites d'agrément observées pour l'analyseur mobile (très coûteux) étaient de -0,6 ± 2,5 mmHg et de -0,6 ± 7,5 mmHg pour le moniteur de PtcCO₂. Ces deux techniques garantissaient une meilleure précision que l'utilisation de la PetCO₂.

Applications en anesthésie

En anesthésie générale, l'intérêt de la PtcCO₂ est a priori moindre, puisque les patients sont en ventilation mécanique et que la PetCO₂ y est un reflet fiable de la PaCO₂, la plupart des patients ayant une fonction respiratoire normale. Plusieurs études ont toutefois comparé l'apport complémentaire de la PtcCO₂ en procédure d'anesthésie [7,66-68] : elle apporterait un élément supplémentaire de surveillance, notamment en salle de réveil, et serait utile lors d'atteintes parenchymateuses qui viendraient perturber le capnogramme [69].

Xue et al. ont notamment évalué son intérêt lors de laparoscopies, où il est reconnu qu'il existe de larges différences entre la PetCO₂ et la PaCO₂ du fait de la création d'un

pneumopéritoine par l'insufflation de CO₂ [46]. Les différences observées entre PaCO₂ et PtcCO₂ étaient en effet significativement moins importantes qu'entre PetCO₂ et PaCO₂.

L'utilisation de la PetCO₂ est influencée par les anomalies ventilation/perfusion, que nous pouvons observer lors de situations physiopathologiques mais aussi physiologiquement avec l'âge. Casati et al. se sont intéressés à la faisabilité de l'utilisation de la PtcCO₂ chez 17 patients âgés de 71 ans en moyenne, ventilés mécaniquement au décours d'une anesthésie générale [70]. Quarante-cinq mesures de PetCO₂ et de PtcCO₂ ont été comparées à la valeur de PaCO₂ concomitante. Le gradient PaCO₂ – PetCO₂ était de 6 ± 5 mmHg, alors que le gradient PaCO₂ – PtcCO₂ était de 2 ± 4 mmHg, suggérant une meilleure adéquation entre PaCO₂ et PtcCO₂ qu'entre PaCO₂ et PetCO₂ chez ces patients âgés.

Applications dans le suivi de patients chroniques

Plusieurs catégories de patients pourraient aisément bénéficier de cette technologie : en premier lieu, les insuffisants respiratoires chroniques lors des consultations de suivi à distance d'une exacerbation. La mesure de la PtcCO₂ permettrait alors de vérifier simplement et très rapidement que le niveau de la PaCO₂ est stable par rapport aux précédentes mesures, évitant un recours itératif à la ponction artérielle [71], de surcroît parfois difficile chez les patients obèses, qui constituent une population croissante des consultations de pneumologie [72]. Le monitoring couplé de la SpO₂ et de la PtcCO₂ pourrait améliorer la surveillance lors de la réalisation d'une fibroscopie bronchique [73]. Maniscalco et al. ont montré chez 35 patients obèses la corrélation forte qui existait entre la PaCO₂ et la PtcCO₂, avec des différences moyennes de -1,4 mmHg, mais également, pour les 18 patients sous ventilation nocturne, que les variations au cours du temps de PaCO₂ et de PtcCO₂ n'étaient pas différentes statistiquement, faisant de cet outil un outil de monitoring fiable chez ces patients [72].

Le monitoring de la PtcCO₂ pourrait être également utile lors des polysomnographies nocturnes, et des explorations de syndromes d'apnée du sommeil [31]. Récemment, Janssens et al. [34] ont pu montrer l'utilité du monitoring de la PtcCO₂ nocturne pour des patients ventilés en VNI à domicile. La mesure couplée de la SpO₂ et de la PtcCO₂ permet la distinction entre une hypoxémie liée à une anomalie des rapports ventilation/perfusion ou liée à une hypoventilation vraie. Elle permet également d'identifier une hyperventilation induite par la ventilation mécanique, du fait de réglages inappropriés, d'identifier des apnées-hypopnées centrales associées ou non à une apnée obstructive, et induites ou non par une assistance ventilatoire excessive. Enfin, il a été montré que certains patients pouvaient présenter une hypoventilation alvéolaire sous ventilation mécanique sans désa-

turation en oxygène franche [35–36]. Ainsi, une augmentation de la PaCO₂ de 10 mmHg diminue en air ambiant la PaO₂ d'environ 12 mmHg, ce qui n'entraîne pas de diminution significative de la SaO₂ si la PaO₂ est initialement normale [74]. Cela souligne la nécessité d'enregistrer la PtcCO₂ lorsque le patient ne présente pas d'anomalie des rapports ventilation/perfusion et qu'il risque de présenter une hypoventilation alvéolaire. Une utilisation raisonnée de la PtcCO₂ paraît intéressante dans le suivi des patients ventilés au long cours et l'exploration de la qualité de leur sommeil. La possibilité d'une adaptation de la thérapeutique est un garant de la compliance au traitement, dont on sait qu'elle peut être très aléatoire, notamment si les réglages sont inappropriés.

Pour un enregistrement de longue durée, comme une polysomnographie nocturne, la dérive de la mesure au cours du temps peut constituer une limite. Cependant, chez 24 patients (15 patients avec bronchopneumopathie chronique obstructive et 9 insuffisants respiratoires restrictifs) à l'état stable, en VNI nocturne [41], des gaz du sang ont été mesurés sur le sang artérialisé prélevé au lobe de l'oreille à 23, 2, 5 et 7 heures, et comparés à la PtcCO₂ relevée aux mêmes horaires sur trois appareils (SenTec[®] DM, TCM4-Tina[®] et Tosca 500[®]). Une polysomnographie complète a été réalisée pendant la même nuit. La dérive mesurée à la huitième heure était de 0,7 mmHg avec le SenTec et de -4 mmHg avec les deux autres moniteurs ($p < 0,001$). Entre les quatre mesures, la variation moyenne de PaCO₂ a été de 6,3 mmHg, celle de la PtcCO₂ de 5,8, 9,0 et 6,5 mmHg pour SenTec[®] DM, TCA4-Tina[®] et Tosca 500[®], respectivement. L'existence d'une hypercapnie supérieure à 50 mmHg ou de fluctuations marquées de la PCO₂ pendant la VNI nocturne n'influçait pas ces résultats. Ainsi, l'évolution de la technique avait réduit la dérive de la différence PtcCO₂ – PaCO₂. Les différences entre PaCO₂ et PtcCO₂ dépassant 7,5 mmHg sont maintenant rares (1 à 2 % selon le matériel), alors qu'initialement elles représentaient près de 19 % des mesures. Observée sur une période de huit heures, cette dérive paraît acceptable.

Hazenberget al. ont confirmé dans une étude récente la faisabilité d'un monitoring de la PtcCO₂ par le moniteur Tosca 500[®], chez 15 patients insuffisants respiratoires chroniques, dont 13 étaient ventilés au long cours [45]. Un enregistrement continu de huit heures a été effectué. Les comparaisons de PtcCO₂ et de PaCO₂ étaient réalisées à 30 minutes, 2, 4, 6 et 8 heures. Soixante-quinze mesures au total ont été comparées. À 30 minutes, la PtcCO₂ moyenne était plus élevée de 3 mmHg que la PaCO₂. Cette différence augmentait au fil du temps pour atteindre un maximum de 5,4 mmHg après huit heures d'enregistrement. Aucune complication n'a été mentionnée, la tolérance du capteur était satisfaisante. Le biais concernant la SaO₂ et la SpO₂ était de 2 %, ce qui est parfaitement acceptable cliniquement. Cette étude vient renforcer le fait que ce type d'outil de

monitorage combiné est utilisable désormais, simplement et en toute sécurité, pour une surveillance au long cours, un enregistrement de huit heures étant plus informatif qu'un prélèvement unique en fin de nuit.

D'autres circonstances où la mesure de la PtcCO₂ pourrait se substituer à la mesure plus invasive de la PaCO₂ peuvent être citées : la gériatrie, les explorations fonctionnelles, les études physiologiques sur sujet sain, la médecine du sport, autant de situations où la mesure de la PaCO₂ a un intérêt certain, mais où l'aspect invasif peut être un obstacle à son obtention.

Conclusion

La mesure de la PtcCO₂, présentée aujourd'hui comme une technique nouvelle, est bien au contraire un outil de mesure déjà relativement ancien, apparu dès les années 1960 et bien connu des physiologistes et des néonatalogistes. Son emploi est longtemps resté confidentiel pour le diagnostic et l'appréciation de la gravité des pathologies aiguës, pour les patients adultes consultant aux urgences ou hospitalisés en réanimation. Des études récentes ont permis de valider cette technique et montré sa fiabilité. Il reste toutefois à définir sa place exacte, et à identifier les patients susceptibles d'en tirer un réel bénéfice.

Des études complémentaires sont nécessaires, notamment dans le domaine de la réanimation. Cependant, l'évolution actuelle vers une médecine la moins invasive possible devrait susciter rapidement un enthousiasme certain pour cette technologie finalement pas si nouvelle. S'il convient de lui donner la place qu'elle mérite du fait des perspectives de monitoring non invasif qu'elle apporte, il ne faut pas que ses utilisateurs négligent ses limites, également démontrées.

Conflit d'intérêt : les auteurs déclarent ne pas avoir de conflit d'intérêt.

Références

- Gouget B, Sachs C (1982) Quality control of solutions for pH and blood gas analyzers. *Bull Eur Physiopathol Respir* 18:17P–23P
- Severinghaus JW (1979) Pathophysiologic aspects of the regulation of respiration. *Bull Mem Acad R Med Belg* 134:261–71
- Kampelmacher MJ, van Kesteren RG, Winckers EK (1997) Instrumental variability of respiratory blood gases among different blood gas analysers in different laboratories. *Eur Respir J* 10:1341–4
- Fox MJ, Brody JS, Weintraub LR (1979) Leukocyte larceny: a cause of spurious hypoxemia. *Am J Med* 67:742–6
- Miller WW, Yafuso M, Yan CF, et al (1987) Performance of an in vivo, continuous blood-gas monitor with disposable probe. *Clin Chem* 33:1538–42
- Mahutte CK (1994) Continuous intra-arterial blood gas monitoring. *Intensive Care Med* 20:85–6
- Phan CQ, Tremper KK, Lee SE, Barker SJ (1987) Noninvasive monitoring of carbon dioxide: a comparison of the partial pressure of transcutaneous and end-tidal carbon dioxide with the partial pressure of arterial carbon dioxide. *J Clin Monit* 3:149–54
- Reid CW, Martineau RJ, Miller DR, et al (1992) A comparison of transcutaneous end-tidal and arterial measurements of carbon dioxide during general anaesthesia. *Can J Anesth* 39:31–6
- Laptook A, Oh W (1981) Transcutaneous carbon dioxide monitoring in the newborn period. *Crit Care Med* 9:759–60
- Monaco F, McQuitty JC (1981) Transcutaneous measurements of carbon dioxide partial pressure in sick neonates. *Crit Care Med* 9:756–8
- Hoppenbrouwers T, Hodgman JE, Arakawa K, et al (1992) Transcutaneous oxygen and carbon dioxide during the first half year of life in premature and normal term infants. *Pediatr Res* 31:73–9
- Eberhard P (2007) The design, use, and results of transcutaneous carbon dioxide analysis: current and future directions. *Anesth Analg* 105(6 Suppl):S48–S52
- Roupie EE (1997) Continuous assessment of arterial blood gases. *Crit Care* 1:11–4
- Sasse SA, Chen PA, Mahutte CK (1994) Variability of arterial blood gas values over time in stable medical ICU patients. *Chest* 106:187–93
- Severinghaus JW (1960) The CO₂ electrode for monitoring satellite ambient CO₂. WADC Tech Rep United States Air Force Wright Air Dev Cent Day Ohio 60–574:49–58
- Wimberley PD, Frederiksen PS, Witt-Hansen J, et al (1985) Evaluation of a transcutaneous oxygen and carbon dioxide monitor in a neonatal intensive care department. *Acta Paediatr Scand* 74:352–9
- Broadhurst E, Helms P, Vyas H, Cheriyan G (1988) Arterialisation of transcutaneous oxygen and carbon dioxide. *Arch Dis Child* 63:1395–6
- Monaco F, McQuitty JC, Nickerson BG (1983) Calibration of a heated transcutaneous carbon dioxide electrode to reflect arterial carbon dioxide. *Am Rev Respir Dis* 127:322–4
- Bellone A, Barbieri A, Bursi F, Vettorello M (2006) Management of acute pulmonary edema in the emergency department. *Curr Heart Fail Rep* 3:129–35
- Mattu A, Martinez JP, Kelly BS (2005) Modern management of cardiogenic pulmonary edema. *Emerg Med Clin North Am* 23:1105–25
- Yeow ME, Santanilla JI (2008) Noninvasive positive pressure ventilation in the emergency department. *Emerg Med Clin North Am* 26:835–47
- Varon J, Walsh GL, Fromm RE Jr (1998) Feasibility of noninvasive mechanical ventilation in the treatment of acute respiratory failure in postoperative cancer patients. *J Crit Care* 13:55–7
- Sottiaux TM (1999) Noninvasive positive pressure ventilation in the emergency department. *Chest* 115:301–3
- Brochard L, Mancebo J, Wysocki M, et al (1995) Noninvasive ventilation for acute exacerbations of chronic obstructive pulmonary disease. *N Engl J Med* 333:817–22
- Nishiyama T, Nakamura S, Yamashita K (2006) Comparison of the transcutaneous oxygen and carbon dioxide tension in different electrode locations during general anaesthesia. *Eur J Anesthesiol* 23:1049–54
- Sivan Y, Eldadah MK, Cheah TE, Newth CJ (1992) Estimation of arterial carbon dioxide by end-tidal and transcutaneous PCO₂ measurements in ventilated children. *Pediatr Pulmonol* 12:153–7
- Chopin C, Fesard P, Mangalaboyi J, et al (1990) Use of capnography in diagnosis of pulmonary embolism during acute respiratory failure of chronic obstructive pulmonary disease. *Crit Care Med* 18:353–7
- Glenski, JA, Cucchiara RF (1986) Transcutaneous O₂ and CO₂ monitoring of neurosurgical patients: detection of air embolism. *Anesthesiology* 64:546–50

29. Gudipati CV, Weil MH, Bisera J, et al (1988) Expired carbon dioxide: a noninvasive monitor of cardiopulmonary resuscitation. *Circulation* 77:234–9
30. Ambrosino N, Vaghegghini G (2008) Noninvasive positive pressure ventilation in the acute care setting: where are we? *Eur Respir J* 31:874–86
31. Demoule A, Girou E, Richard JC, et al (2006) Increased use of noninvasive ventilation in French intensive care units. *Intensive Care Med* 32:1747–55
32. Fanconi S, Tschupp A, Molinari L (1996) Long-term transcutaneous monitoring of oxygen tension and carbon dioxide at 42 degrees C in critically ill neonates: improved performance of the TcPO₂ monitor with topical metabolic inhibition. *Eur J Pediatr* 155:1043–6
33. Kirk VG, Batuyong ED, Bohn SG (2006) Transcutaneous carbon dioxide monitoring and capnography during pediatric polysomnography. *Sleep* 29:1601–8
34. Janssens JP, Borel JC, Pépin JL; SomnoNIV Group (2011) Nocturnal monitoring of home noninvasive ventilation: the contribution of simple tools such as pulse oximetry, capnography, built-in ventilator software and autonomic markers of sleep fragmentation. *Thorax* 66:438–45
35. Paiva R, Krivec U, Aubertin G, et al (2009) Carbon dioxide monitoring during long-term noninvasive respiratory support in children. *Intensive Care Med* 35:1068–74
36. Nardi J, Prigent H, Adala A, et al (2012) Nocturnal oximetry and transcutaneous carbon dioxide in home-ventilated neuromuscular patients. *Respir Care*. Accepted for publication
37. Gancel PE, Roupie E, Guittet L, et al (2011) Accuracy of a transcutaneous carbon dioxide pressure monitoring device in emergency room patients with acute respiratory failure. *Intensive Care Med* 37:348–51
38. McVicar J, Eager R (2009) Validation study of a transcutaneous carbon dioxide monitor in patients in the emergency department. *Emerg Med J* 26:344–6
39. Berlowitz DJ, Spong J, O'Donoghue FJ, et al (2011) Transcutaneous measurement of carbon dioxide tension during extended monitoring: evaluation of accuracy and stability, and an algorithm for correcting calibration drift. *Respir Care* 56:442–8
40. Perrin K, Wijesinghe M, Weatherall M, Beasley R (2011) Assessing PaCO₂ in acute respiratory disease: accuracy of a transcutaneous carbon dioxide device. *Intern Med J* 41:630–3
41. Storre JH, Magnet FS, Dreher M, Windisch W (2011) Transcutaneous monitoring as a replacement for arterial PCO₂ monitoring during nocturnal noninvasive ventilation. *Respir Med* 105:143–50
42. Roediger R, Beck-Schimmer B, Theusinger OM, et al (2011) The revised digital transcutaneous PCO₂/SpO₂ ear sensor is a reliable noninvasive monitoring tool in patients after cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 25:243–9
43. Nicolini A, Ferrari MB (2011) Evaluation of a transcutaneous carbon dioxide monitor in patients with acute respiratory failure. *Ann Thorac Med* 6:217–20
44. Kelly AM, Klim S (2011) Agreement between arterial and transcutaneous PCO₂ in patients undergoing noninvasive ventilation. *Respir Med* 105:226–9
45. Hazenberg A, Zijlstra JG, Kerstjens HA, Wijkstra PJ (2011) Validation of a transcutaneous CO₂ monitor in adult patients with chronic respiratory failure. *Respiration* 81:242–6
46. Xue Q, Wu X, Jin J, et al (2010) Transcutaneous carbon dioxide monitoring accurately predicts arterial carbon dioxide partial pressure in patients undergoing prolonged laparoscopic surgery. *Anesth Analg* 111:417–20
47. De Oliveira GS Jr, Ahmad S, Fitzgerald PC, McCarthy RJ (2010) Detection of hypoventilation during deep sedation in patients undergoing ambulatory gynaecological hysteroscopy: a comparison between transcutaneous and nasal end-tidal carbon dioxide measurements. *Br J Anesth* 104:774–8
48. Chakravarthy M, Narayan S, Govindarajan R, et al (2010) Weaning mechanical ventilation after off-pump coronary artery bypass graft procedures directed by noninvasive gas measurements. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 24:451–5
49. Johnson DC, Batool S, Dalbec R (2008) Transcutaneous carbon dioxide pressure monitoring in a specialized weaning unit. *Respir Care* 53:1042–7
50. Rodriguez P, Lellouche F, Aboab J, et al (2006) Transcutaneous arterial carbon dioxide pressure monitoring in critically ill adult patients. *Intensive Care Med* 32:309–12
51. Chiumello D, Conti G, Foti G, et al (2009) Noninvasive ventilation outside the intensive care unit for acute respiratory failure. *Minerva Anesthesiol* 75:459–66
52. Ambrosino N, Vaghegghini G (2007) Noninvasive ventilation in exacerbations of COPD. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis* 2:471–6
53. Nava S, Carbone G, DiBattista N, et al (2003) Noninvasive ventilation in cardiogenic pulmonary edema: a multicenter randomized trial. *Am J Respir Crit Care Med* 168:1432–7
54. Nava S, Hill N (2009) Noninvasive ventilation in acute respiratory failure. *Lancet* 374:250–9
55. Bolliger D, Steiner LA, Kasper J, et al (2007) The accuracy of noninvasive carbon dioxide monitoring: a clinical evaluation of two transcutaneous systems. *Anesthesia* 62:394–9
56. Severinghaus JW (1981) A combined transcutaneous PO₂–PCO₂ electrode with electrochemical HCO₃⁻ stabilization. *J Appl Physiol* 51:1027–32
57. Cuvelier A, Grigoriu B, Molano LC, Muir JF (2005) Limitations of transcutaneous carbon dioxide measurements for assessing long-term mechanical ventilation. *Chest* 127:1744–8
58. Okeson GC, Wulbrecht PH (1998) The safety of brachial artery puncture for arterial blood sampling. *Chest* 114:748–51
59. Cox M, Kemp R, Anwar S, et al (2006) Noninvasive monitoring of CO₂ levels in patients using NIV for AECOPD. *Thorax* 61:363–4
60. Storre JH, Steurer B, Kabitz HJ, et al (2007) Transcutaneous PCO₂ monitoring during initiation of noninvasive ventilation. *Chest* 132:1810–6
61. Senn O, Clarenbach CF, Kaplan V, et al (2005) Monitoring carbon dioxide tension and arterial oxygen saturation by a single earlobe sensor in patients with critical illness or sleep apnea. *Chest* 128:1291–6
62. Bendjelid K, Schütz N, Stotz M, et al (2005) Transcutaneous PCO₂ monitoring in critically ill adults: clinical evaluation of a new sensor. *Crit Care Med* 33:2203–6
63. Abraham E, Smith M, Silver L (1984) Continuous monitoring of critically ill patients with transcutaneous oxygen and carbon dioxide and conjunctival oxygen sensors. *Ann Emerg Med* 13:1021–6
64. Vallée F, Mateo J, Dubreuil G, et al (2010) Cutaneous ear lobe PCO at 37 degrees C to evaluate microperfusion in patients with septic shock. *Chest* 138:1062–70
65. Hinkelbein J, Floss F, Denz C, Krieter H (2008) Accuracy and precision of three different methods to determine PCO₂ (paCO₂ vs PetCO₂ vs PtcCO₂) during interhospital ground transport of critically ill and ventilated adults. *J Trauma* 65:10–8
66. Griffin J, Terry BE, Burton RK, et al (2003) Comparison of end-tidal and transcutaneous measures of carbon dioxide during general anaesthesia in severely obese adults. *Br J Anesth* 91:498–501
67. Rafferty TD, Marrero O, Nardi D, et al (1981) Relationship between transcutaneous and arterial carbon dioxide tension in adult patients anesthetized with nitrous oxide-fentanyl and nitrous oxide-enflurane. *Anesth Analg* 60:504–7

68. Tobias JD (2003) Noninvasive carbon dioxide monitoring during one-lung ventilation: end-tidal vs transcutaneous techniques. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 17:306–8
69. Fanelli G, Baciarello M, Squicciarini G, et al (2008) Transcutaneous carbon dioxide monitoring in spontaneously breathing, nonintubated patients in the early postoperative period. *Minerva Anesthesiol* 74:375–80
70. Casati A, Squicciarini G, Malagutti G, et al (2006) Transcutaneous monitoring of partial pressure of carbon dioxide in the elderly patient: a prospective, clinical comparison with end-tidal monitoring. *J Clin Anesth* 18:436–40
71. Parker SM, Gibson GJ (2007) Evaluation of a transcutaneous carbon dioxide monitor (« Tosca ») in adult patients in routine respiratory practice. *Respir Med* 101:261–4
72. Maniscalco M, Zedda A, Faraone S, et al (2008) Evaluation of a transcutaneous carbon dioxide monitor in severe obesity. *Intensive Care Med*
73. Evans EN, Ganeshalingam K, Ebden P (1998) Changes in oxygen saturation and transcutaneous carbon dioxide and oxygen levels in patients undergoing fiberoptic bronchoscopy. *Respir Med* 92:739–42
74. Ries AL (1987) Oximetry: know thy limits. *Chest* 91:316