

Le monitoring du CO₂ expiré : de la théorie à la pratique

F. VERSCHUREN, N. DELVAU, F. THYS

Le dioxyde de carbone (CO₂) partage avec l'oxygène (O₂) le palmarès des gaz les plus importants pour notre organisme. En effet, il n'y a pas d'autre but dans le fait de respirer que de prélever l'O₂ extérieur et éliminer le CO₂ produit par le métabolisme cellulaire. Et pourtant, les cliniciens connaissent en général beaucoup moins bien le CO₂ et l'utilisation que l'on peut en espérer dans les services d'urgence ou en SMUR. Cet état de fait mérite d'être corrigé, tant on se rend compte des implications multiples du CO₂ dans l'organisme et de la nécessité de le monitorer. Les raisons de cette réticence envers le CO₂ tiennent probablement à plusieurs raisons : une physiopathologie d'apparence complexe, un matériel de mesure particulier, la perception d'un gaz moins vital que l'O₂, ainsi qu'un intérêt scientifique plus récent. Le monitoring du CO₂ expiré est quant à lui devenu incontournable dans les quartiers opératoires et les unités de soins intensifs, et il importe qu'il en soit de même à l'avenir dans nos services d'urgence. La suite de ce texte n'aura d'autre but que de familiariser le clinicien urgentiste au CO₂ expiré et de démystifier son utilisation. Pour ce faire, les notions théoriques seront volontairement brèves pour laisser la place à des explications pratiques assorties de vidéo didactiques.

1. L'importance du CO₂ pour l'organisme

Avant d'aborder le monitoring du CO₂ expiré, il importe de mettre en perspective le rôle général que joue le CO₂ dans l'organisme : le CO₂ qui est produit à

Correspondance : D^r Franck Verschuren, Chef de Clinique associé, Service des Urgences, Département de Médecine Aiguë, Cliniques Universitaires Saint-Luc, Université Catholique de Louvain, Av. Hippocrate, 1200 Bruxelles. Tél. : 00322 764 1636 ou 1613. Fax : 00322 764 1635. E-mail : Franck.verschuren@uclouvain.be, nicodelvau@yahoo.fr, thys@rean.ucl.ac.be

raison d'environ 200 ml chaque minute, n'est pas seulement un vulgaire déchet du métabolisme cellulaire. Si nos chémorécepteurs médullaires font en sorte que notre pression partielle en CO_2 artériel (PaCO_2) soit toujours de 40 mmHg, c'est parce que le CO_2 exerce bien d'autres actions, que le clinicien urgentiste rencontre quotidiennement :

- Le CO_2 constitue une formidable réserve pour tamponner la production constante d'acidité par l'organisme, et permettre ainsi de conserver un **pH adéquat**.
- Le CO_2 reflète fidèlement la **ventilation** du patient, et sa mesure est indispensable au clinicien pour affirmer qu'un patient hypo- ou hyperventile.
- Le CO_2 joue un rôle important dans la **perfusion cérébrale**, une hypercapnie provoquant une vasodilatation avec œdème cérébral, une hypocapnie créant au contraire une vasoconstriction avec risque d'ischémie.
- Le CO_2 agit en partenaire complémentaire de l' O_2 : l'hypocapnie, obtenue par hyperventilation, constitue le premier réflexe de l'organisme **face à une hypoxie**, survenant en altitude ou lors de pathologies respiratoires ; cette même hypocapnie diminue le relargage de l' O_2 au niveau des tissus par déplacement vers la gauche de la courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine (effet Bohr).

2. Le CO_2 artériel (PaCO_2), veineux (PvCO_2), expiré (EtCO_2), « total » (CO_2), transcutané (TC PaCO_2 ou PtcCO_2), le bicarbonate (HCO_3^-) : comment s'y retrouver ?

- **La PaCO_2** mesurée par prélèvement d'un gaz sanguin artériel constitue la référence absolue de la ventilation du patient et de l'interprétation de désordres acido-basiques.
- Le gaz sanguin artériel étant un acte douloureux et consommateur de temps, il est tentant de le remplacer par la mesure d'un gaz sanguin veineux prélevé en même temps que la prise de sang générale. **La PvCO_2** qui en résulte est typiquement 6 à 8 mmHg plus élevée que la PaCO_2 , si toutefois le patient est hémodynamiquement stable. Si ce n'est pas le cas, l'interprétation de la vraie PaCO_2 en fonction de la PvCO_2 est aléatoire, le meilleur exemple étant la situation de l'arrêt cardiaque, où une acidose respiratoire veineuse (PvCO_2 élevée) coexiste avec une alcalose respiratoire artérielle (PaCO_2 basse).
- **Le CO_2 de fin d'expiration (EtCO_2)** a également la vocation de refléter la PaCO_2 et d'éviter ainsi le recours répété à des prélèvements artériels difficiles et douloureux. EtCO_2 est typiquement d'environ 3 mmHg inférieur à PaCO_2 (petit gradient de diffusion permettant au CO_2 de se déplacer physiologiquement de l'intérieur de l'organisme vers la sortie buccale). Cette relation typique n'est valable que si les poumons du patient sont sains ; pour toutes les situations de trouble des rapports ventilation – perfusion pulmonaires, on va voir se développer une différence (un gradient) entre PaCO_2 et EtCO_2 , de telle sorte qu'il faudra ini-

tialement combiner EtCO₂ avec la mesure d'un gaz sanguin artériel pour apprécier la vraie PaCO₂ du patient.

– **Le CO₂ « total »** est celui qui est mesuré avec les principaux électrolytes lors d'une prise de sang veineuse classique ; il est dit « total » car il combine le CO₂ sous forme de bicarbonate (HCO₃⁻) et sous forme diffuse (PvCO₂). Bien souvent, les cliniciens ne prêtent pas assez attention à sa mesure, alors que ses valeurs pathologiques doivent immédiatement attirer l'attention sur une acidose métabolique (CO₂ total abaissé) ou une alcalose métabolique (CO₂ total élevé).

– **Le bicarbonate (HCO₃⁻)**, la forme basique du CO₂, apparaît également dans les résultats d'un gaz sanguin artériel et permet l'interprétation des désordres acido-basiques. Néanmoins, il faut savoir que HCO₃⁻ est un paramètre calculé, alors que PaCO₂ est directement mesurée par l'analyseur de gaz. Il est d'ailleurs tout à fait possible d'interpréter l'ensemble des désordres acido-basiques, tant métaboliques que respiratoires, sans avoir recours à l'analyse du HCO₃⁻.

– **Le CO₂ transcutané**, totalement méconnu en médecine d'urgence, pourrait bénéficier d'un intérêt croissant à l'avenir, pour sa capacité à refléter la vraie PaCO₂ avec davantage de stabilité que le CO₂ expiré.

3. La courbe de capnographie et la valeur de capnométrie

Une courbe typique de capnographie durant trois expirations est décrite ci-dessous. La courbe revient à une valeur de zéro à chaque inspiration, car il n'y a virtuellement pas de CO₂ dans l'air inspiré (**Figure 1**).

Les différentes phases d'une courbe de capnographie sont expliquées en **figure 2**. On y voit qu'au début de l'expiration, la courbe reste à des valeurs

Figure 1 – Alternance inspiration-expiration

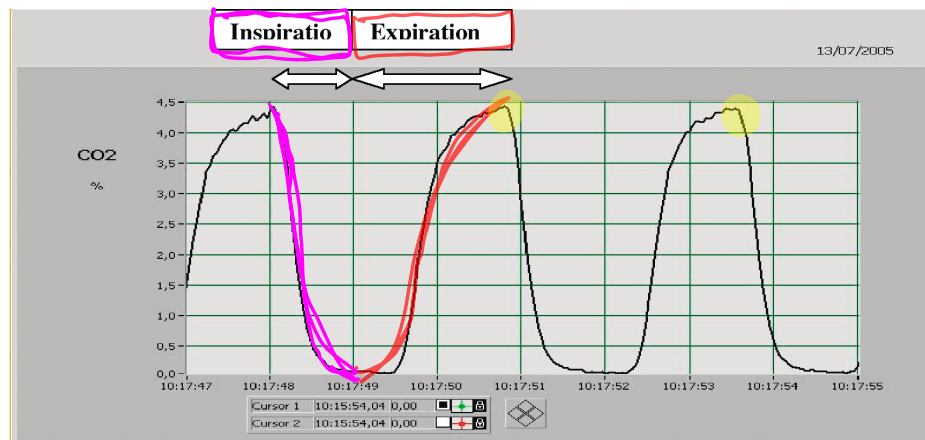
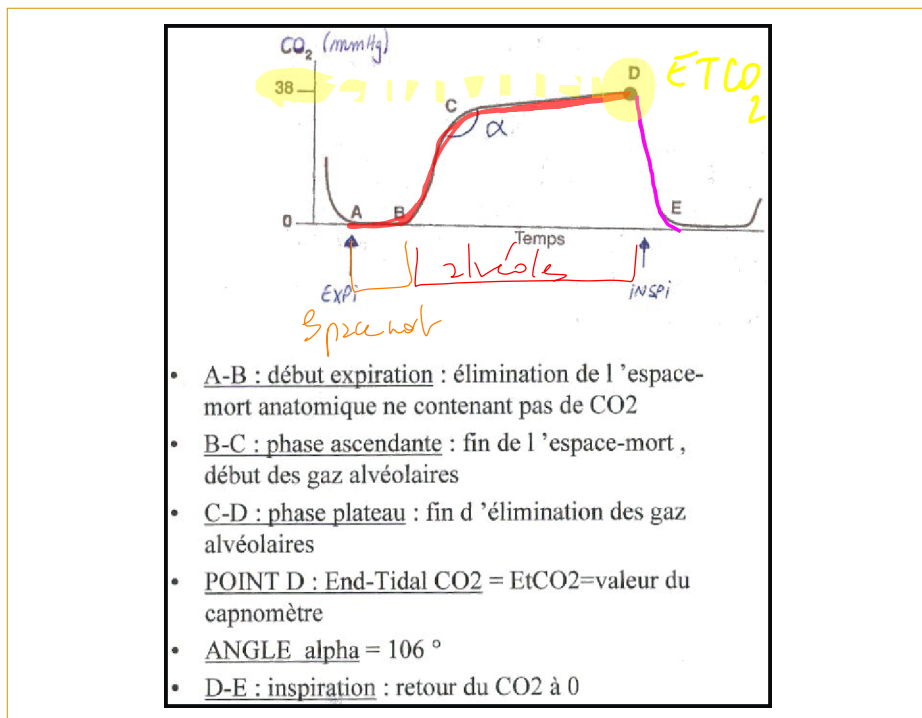


Figure 2 – Courbe de capnographie et ses différentes phases



nulles car l'air qui se situe dans les grosses voies de conduction aériennes ne contient pas de CO_2 ; ensuite vient une phase ascendante qui contient de l'air riche en CO_2 provenant des premières alvéoles qui ont participé aux échanges gazeux ; ensuite une « phase plateau » où l'élimination du CO_2 se poursuit tout au long de l'expiration jusqu'à l'Et CO_2 , qui est la valeur affichée du capnomètre ; enfin un retour rapide vers le zéro qui traduit le début de l'inspiration suivante. N'oublions pas de mentionner l'angle qui existe entre la phase ascendante et la phase plateau de la courbe : **cet angle est beaucoup plus obtus en cas de pathologie respiratoire obstructive, qui gêne l'élimination du CO_2 durant l'expiration de telle sorte qu'il faut davantage de temps pour éliminer le CO_2 .**

4. Le CO_2 expiré : ce qu'il représente

Le CO_2 que l'on mesure à la bouche est le reflet de **trois phénomènes** fondamentaux : (1) la **production de CO_2** au niveau tissulaire, (2) son **transport** dans le sang veineux puis les artères pulmonaires, et (3) son **élimination** par les poumons. En médecine d'urgence, les principales indications de l'utilisation du CO_2 expiré vont concerner le troisième de ces phénomènes, à savoir l'appréciation de la ventilation du patient. Une exception concerne le suivi de l'arrêt car-

diague, où la mesure du CO_2 expiré reflétera également le transport sanguin du CO_2 , à tel point qu'une valeur effondrée d' EtCO_2 après 20 minutes de réanimation bien conduite traduit une absence (probablement) irrémédiable de circulation sanguine.

5. La différence entre PaCO_2 et EtCO_2

Il serait illusoire d'imaginer qu'un monitoring non invasif de CO_2 expiré pourrait remplacer en toute circonstance le recours au prélèvement d'un gaz sanguin artériel considéré comme référence pour la mesure du CO_2 sanguin. Tout dépend des indications de mesure du CO_2 expiré et des conditions cardiorespiratoires du patient : si l'indication consiste à monitorer l'activité respiratoire du patient pour prévenir les hypopnées ou apnées lors d'une sédation, l'analyse de la courbe de capnographie suffit, quelle que soit la valeur d' EtCO_2 . Si par contre l'on souhaite ventiler adéquatement un traumatisé crânien sans antécédents ni pathologie cardiorespiratoire associée, on peut s'attendre à ce que EtCO_2 soit proche de PaCO_2 , mais la nécessité de connaître avec précision la valeur de PaCO_2 imposera le recours, au moins une fois, au prélèvement d'un gaz sanguin artériel qui permettra de vérifier que EtCO_2 et PaCO_2 sont effectivement proches l'un de l'autre.

Enfin, s'il s'agit d'un patient intubé et ventilé suite à une détresse respiratoire, il est évident qu' EtCO_2 ne reflétera en aucune façon PaCO_2 . La raison en est simple : dès qu'il y a un trouble dans les rapports ventilation-perfusion du patient, quelle que soit la pathologie cardio-pulmonaire, il se crée un obstacle à la bonne élimination du CO_2 par diffusion au sein des poumons. Le CO_2 aura donc tendance à s'accumuler dans le sang, au détriment de la sortie buccale, créant une différence appelée aussi gradient, entre PaCO_2 et EtCO_2 . Dans ces circonstances, il est nécessaire de connaître la valeur de PaCO_2 avant toute interprétation de la valeur d' EtCO_2 .

Cette séquence vidéo explicite la procédure à suivre pour l'interprétation de la différence entre PaCO_2 et EtCO_2 . On y comprend que la mesure d' EtCO_2 est obtenue immédiatement de façon non invasive, mais ne peut pas permettre à ce stade d'adapter les paramètres du respirateur. Il importe donc de mesurer PaCO_2 , à comparer ensuite avec EtCO_2 . C'est bien sûr PaCO_2 qui constitue la valeur de référence pour l'appréciation de la ventilation du patient.

– Si PaCO_2 est trop élevée par rapport à l'objectif, par exemple 60 mmHg au lieu de 40 mmHg, cela signifie que le patient hypoventile. On va alors adapter les paramètres du respirateur, soit la fréquence respiratoire, soit le volume courant, dans le sens d'une augmentation de ces paramètres afin de faire davantage ventiler le patient et faire diminuer sa PaCO_2 . L'objectif consiste alors à faire chuter EtCO_2 de 20 mmHg, quelle que soit la valeur initiale d' EtCO_2 . En effet, il est fort possible que la valeur d' EtCO_2 au moment où PaCO_2 était mesurée à 60 mmHg, n'était que de 50 mmHg à cause d'une différence entre PaCO_2 et EtCO_2 due à

la pathologie cardiorespiratoire sous-jacente. Quand l'adaptation du respirateur a permis à EtCO_2 de chuter de 50 à 30 mmHg, on sait alors que le patient ventile adéquatement à une valeur supposée de PaCO_2 à 40 mmHg.

– À l'inverse, si la PaCO_2 est trop basse par rapport aux objectifs fixés, le patient hyperventile, et il va falloir diminuer la fréquence respiratoire ou le volume courant du respirateur pour y pallier. Si la PaCO_2 est 20 mmHg trop basse par rapport à la normale, il faudra veiller à augmenter EtCO_2 de 20 mmHg, ce qui se voit instantanément dès que l'on modifie les paramètres du respirateur.

– À noter que s'il faut choisir entre une modification de la fréquence respiratoire ou du volume courant du respirateur, il faut toujours préférer modifier le volume courant. En effet, à chaque volume courant correspond un espace-mort anatomique, qui s'additionne à chaque respiration si l'on augmente la fréquence, mais qui reste inchangé si l'on modifie le volume courant seul.

6. Le matériel de capnographie

Un des obstacles à l'utilisation du monitoring du CO_2 expiré réside dans la disparité du matériel mis à la disposition des cliniciens urgentistes. Pour clarifier cette situation, il y a lieu de faire une distinction essentielle, selon que le patient est ventilé artificiellement ou qu'il respire spontanément. Pour le reste, comme nous allons le voir, les différentes techniques d'analyse du CO_2 n'ont plus comme par le passé de conséquences pratiques sur le plan clinique.

Il en est ainsi de la traditionnelle distinction entre la capnographie de type « sidestream » et « mainstream ». Ces deux techniques utilisent l'infrarouge comme méthode de mesure du CO_2 ; le système « sidestream » transporte par une pompe aspirative le CO_2 de la bouche du patient vers le module de mesure du CO_2 situé dans le moniteur, alors que le système « mainstream » mesure le CO_2 directement dans une petite chambre située à la bouche du patient et reliée au moniteur par un câble. Traditionnellement, le « sidestream » est indiqué pour les patients en respiration spontanée car le système est plus léger, alors que le « mainstream » plus encombrant est directement connecté au tube endotrachéal du patient intubé. Les progrès technologiques de ces dernières années ont rendu la distinction entre « sidestream » et « mainstream » moins fondamentale qu'avant. Les progrès technologiques actuels vont vers la technique du « microstream », qui est un « sidestream amélioré » par lequel le CO_2 transite le long d'une très fine tubulure avant d'atteindre la chambre de mesure, permettant ainsi un temps de transit entre la bouche et la chambre de mesure beaucoup plus rapide, et donc une courbe de capnographie qui est presque synchronisée avec le passage d'air par la bouche. Enfin, notons la technique plus ancienne de mesure du CO_2 expiré par méthode colorimétrique : cette méthode semi-quantitative, dont le détecteur change de couleur en fonction du pH, ne possède pas les performances similaires aux autres techniques modernes, notamment dans sa

capacité à distinguer une intubation œsophagienne versus trachéale, et se doit donc d'être progressivement abandonnée.

Revenons donc à ce qui distingue le choix du matériel, explicité dans la vidéo jointe :

- Si le clinicien souhaite monitorer la ventilation spontanée du patient parce qu'il craint une apnée (lors d'une procédure de sédation ou après une intoxication médicamenteuse), alors seule la courbe de capnographie l'intéresse, la valeur d'EtCO₂ étant de moindre importance. Dans ce cas, il a à sa disposition des lunettes ou un masque combinant l'administration d'O₂ avec l'aspiration de CO₂, où une tubulure d'aspiration de CO₂ qu'il glisse sous un masque classique.
- Si le clinicien souhaite analyser avec précision la valeur d'EtCO₂ en vue d'adapter le respirateur, de vérifier le bon positionnement du tube endotrachéal ou d'évaluer le pronostic d'un arrêt cardiaque, il doit utiliser n'importe quel matériel pouvant s'adapter sur le tube endotrachéal **(toujours en aval du filtre)** pour ne pas boucher la tubulure aspirative par des sécrétions du patient).

7. Les pièges et les artéfacts en capnographie

Si la technologie de mesure du CO₂ est devenue fiable en termes de précision, de reproductibilité, de temps de réponse et de qualité des courbes, elle présente, tout comme n'importe quel autre paramètre de monitoring, certaines limites :

- la première limite est la méconnaissance de la physiopathologie du CO₂ par le clinicien, qui rechigne donc à utiliser la technique ; nous espérons que ce texte et les séquences vidéo qui l'accompagnent résoudront cette limitation,

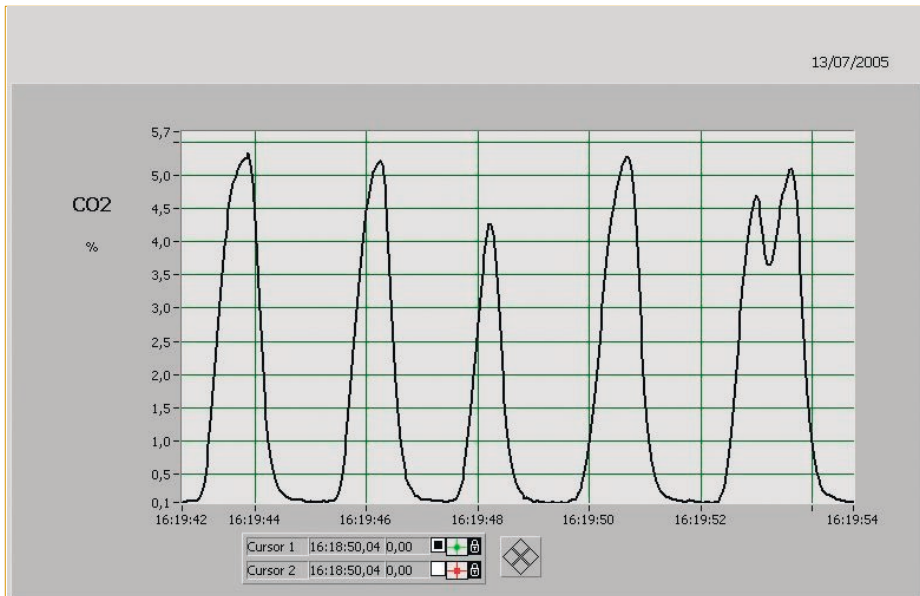
- en respiration spontanée, l'adjonction d'O₂ par le masque va chasser et diluer le CO₂ expiré, ce qui va profondément modifier la forme de la courbe de capnographie et va faire chuter EtCO₂. La séquence vidéo explicite clairement ce phénomène,

- en respiration spontanée, la valeur d'EtCO₂ est soumise à de nombreuses variations de respiration en respiration, dues à la polypnée ou à l'angoisse, ce qui rend le chiffre d'EtCO₂ peu fiable pour refléter PaCO₂. Voir **figure 3**,

- si l'on souhaite monitorer la survenue d'une hypoventilation, voire d'une apnée, lors d'une procédure de sédation, on s'attend à ce que EtCO₂, fidèle à PaCO₂, augmente parallèlement à l'hypoventilation du patient. Paradoxalement, une hypoventilation en respiration spontanée se traduit par une chute importante d'EtCO₂, car le patient ne ventile plus qu'avec de tous petits volumes courants correspondant essentiellement à l'espace-mort de ses voies aériennes trachéobronchiques ; or ces voies ne participent pas aux échanges gazeux et ne contiennent donc que très peu de CO₂,

- en ventilation mécanique, rappelons que le piège principal consiste à oublier qu'EtCO₂ ne reflète pas forcément PaCO₂ (voir chapitre précédent).

Figure 3 – Capnographie en respiration spontanée



8. L'avenir de la capnographie

Les indications reconnues de la capnographie sont reprises dans l'exposé du D^r Fatima Rayeh. Parmi ces indications, il faut en citer quatre qui représentent des enjeux d'avenir intéressants pour confirmer l'intérêt de la capnographie dans nos services d'urgences ou en SMUR.

1. Monitoring d'une procédure de sédation : la nécessité d'effectuer une courte sédation pour des actes douloureux ou désagréables fait partie du quotidien des praticiens de la médecine d'urgence. On peut citer la réduction d'une luxation de l'épaule ou du coude, une gastroscopie, un choc électrique externe, ou le placement d'un drain thoracique. Le clinicien qui a goûté au confort de la surveillance de la ventilation du patient par capnographie ne peut plus s'en passer.

Il faut se souvenir que l'apparition d'une hypopnée puis d'une apnée précèdent de plusieurs minutes la survenue d'une désaturation au pulse oxymètre. Une vidéo est entièrement consacrée à l'utilisation du monitoring du CO₂ expiré pour ce type de procédures.

2. Monitoring de l'état de conscience du patient lors d'une intoxication médicamenteuse aiguë : les épisodes d'hypopnée, voire d'apnée, sont bien souvent méconnus et sous-estimés chez ces patients. L'utilisation d'un masque combinant administration d'O₂ et monitoring du CO₂ devrait améliorer à l'avenir la qualité de la surveillance de ces patients. Il n'y a pas encore à l'heure actuelle de données cliniques suffisantes pour étayer ce propos.

3. *Diagnostic d'exclusion de l'embolie pulmonaire* : il s'agit là d'une indication particulière où le CO₂ expiré est utilisé comme aide au diagnostic. Le principe est que **l'embolie pulmonaire est associée à l'existence d'un espace-mort alvéolaire (zones pulmonaires non perfusées à cause de l'embolie, mais bien ventilées) qui est responsable d'une différence entre PaCO₂ et EtCO₂.** Les développements de recherche actuels explorent la possibilité d'exclure le diagnostic quand une probabilité clinique faible est associée à un gradient PaCO₂-EtCO₂ normal chez un patient qui a des D-dimères positifs. Dans cette indication, le matériel utilisé devra être suffisamment validé que pour offrir des valeurs précises d'EtCO₂.

4. *La capnographie volumétrique* : cette technique explore le CO₂ expiré en fonction du volume expiré du patient, et crée des courbes qui traduisent théoriquement mieux les modifications des rapports ventilation – perfusion pulmonaires du patient que ne le fait la capnographie simple. Il n'y a actuellement pas de preuve suffisante pour utiliser cette technique au service des urgences.

Références bibliographiques

1. Gravenstein JS, Jaffe MB, Paulus DA. Capnography, Clinical aspects. Édition Cambridge 2004.
2. Kupnik D, Skok P. Capnometry in the prehospital setting: are we using its potential? Emerg Med J. 2007 Sep ; 24 (9) : 614-7.
3. Delorio NM. Continuous end-tidal carbon dioxide monitoring for confirmation of endotracheal tube placement is neither widely available nor consistently applied by emergency physicians. Emerg Med J 2005 ; 22 : 490-3.
4. Burton JH, Harrah JD, Germann CA et al. Does end-tidal carbon dioxide monitoring detect respiratory events prior to current sedation monitoring practices? Acad Emerg Med. 2006 May ; 13 (5) : 500-4.
5. Verschuren F, Heinonen E, Clause D et al. Volumetric capnography: reliability and reproducibility in spontaneously breathing patients. Clin Physiol Funct Imaging. 2005 Sep ; 25 (5) : 275-80.

