

## De l'entrée à la sortie du service de réanimation adulte : une mise au point sur l'utilisation courante du monitoring du CO<sub>2</sub> expiré

### Utilisation de la capnographie en réanimation adulte

#### From Admission in Adult Intensive Care Unit to Discharge: a Review about Daily Use of Expired CO<sub>2</sub> Monitoring

#### Use of Expired CO<sub>2</sub> in Adult Intensive Care Unit

A. Modrin · M.-L. Gilbert

Reçu le 2 décembre 2017 ; accepté le 23 janvier 2018  
© SRLF et Lavoisier SAS 2018

**Résumé** L'objectif de cette mise au point est d'effectuer une revue des indications de l'utilisation du monitoring du CO<sub>2</sub> expiré en réanimation adulte. De par sa physiologie, sa mesure est un reflet de l'état hémodynamique, respiratoire et métabolique du patient. La spectrométrie infrarouge est la méthode de mesure la plus courante. La capnographie commune (CO<sub>2</sub> expiré en fonction du temps) est divisée en plusieurs phases dont l'analyse visuelle peut faire évoquer de nombreuses anomalies ventilatoires. La capnographie volumétrique fournit une mesure de l'espace mort. La capnométrie est recommandée en réanimation pour contrôler l'intubation trachéale ou bien au cours d'un arrêt cardiorespiratoire comme facteur pronostique. Tout patient traité par ventilation mécanique invasive, surtout lors d'un transport, doit être équipé d'un capnomètre afin d'anticiper toute complication respiratoire (extubation, bronchospasme, hypoventilation). La pression de fin d'expiration en CO<sub>2</sub> (PetCO<sub>2</sub>) est une évaluation de la pression artérielle en CO<sub>2</sub> (PaCO<sub>2</sub>) utile pour limiter le nombre de prélèvements biologiques, par exemple en neuro-réanimation, mais de nombreux facteurs font varier le gradient entre ces deux valeurs. Les études n'apportent pas de preuve pour l'utilisation de la capnographie volumétrique dans le diagnostic d'embolie pulmonaire en réanimation. Chez les patients souffrant de syndrome de détresse respiratoire aiguë, la littérature médicale n'apporte pas de preuve suffisante pour un intérêt en pratique clinique

courante de la capnométrie volumétrique qui semble limitée dans ce cas à la recherche.

**Mots clés** CO<sub>2</sub> · Capnographie · Unité de soins intensifs · Gestion des voies respiratoires

**Abstract** The objective of this review is to make a check-up of the CO<sub>2</sub> expired monitoring indications in intensive care units (ICU). Because of its physiology, CO<sub>2</sub> measurement is a good reflection of hemodynamic, respiratory, and metabolic state of the patient. Infra-red spectrometry is the most common method. The usual capnography (CO<sub>2</sub> expired over time) consist of several parts and its visual form analysis gives a lot of respiratory diagnosis. Volumetric capnography measures the alveolar dead space. Capnometry is recommended in ICU to confirm tracheal intubation during cardiac arrest as a prognostic factor. Each patient treated by mechanical ventilation, especially during transport, should be equipped with a capnograph to anticipate respiratory complications (extubation, bronchospasm, hypo-ventilation). PetCO<sub>2</sub> is a useful estimation of PaCO<sub>2</sub> (arterial pressure of CO<sub>2</sub>) to decrease number of blood sample, in neurological ICU for example, but a lot of factors modified the gradient between this two indicators. Studies give no proof for the use of volumetric capnography in pulmonary embolism diagnosis. In patients suffering from acute respiratory distress syndrome, there are no sufficient proof for the daily clinical use of the volumetric capnography which seems limited to the field of research.

A. Modrin (✉)

CHU de Toulouse, pôle anesthésie-réanimation PPR, place du Docteur-Baylac, TSA 40031, F-31059 Toulouse cedex, France  
e-mail : modrinarnaud@gmail.com

M.-L. Gilbert

Réanimation polyvalente adulte, centre hospitalier Cahors, 335, rue du Président-Wilson, F-46005 Cahors Cedex, France

**Keywords** CO<sub>2</sub> · Capnography · Intensive care unit · Airway management

## Introduction

Recommandé en anesthésie depuis 1994 par la Société française d'anesthésie et de réanimation (Sfar), ce dispositif s'exporte difficilement hors des blocs chirurgicaux [1]. Pourtant, plusieurs indications en réanimation existent.

Les objectifs de cette mise au point vont être, après un bref rappel du cycle du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et du fonctionnement pratique du capnogramme, d'exposer l'analyse des données fournies pour terminer avec les indications à l'utilisation de ce dispositif dans un service de réanimation adulte.

## Physiologie

La production du CO<sub>2</sub> se fait au niveau mitochondrial. Il s'agit d'un déchet du cycle de Krebs nécessaire à la production d'énergie. Le CO<sub>2</sub> est par la suite transporté dans le sang sous une forme principalement hydratée (ou bicarbonée) jusqu'à sa zone d'élimination, les capillaires pulmonaires. Ce gaz y est évacué par le système respiratoire après diffusion à travers la barrière alvéolocapillaire, proportionnellement à la ventilation alvéolaire. Le pouvoir diffusif de ce gaz est élevé, l'élimination y est donc aisée, hors conditions pathologiques.

De ce fait, la capnométrie, qui consiste en la mesure du CO<sub>2</sub> expiré, permet l'évaluation de trois déterminants majeurs du cycle du CO<sub>2</sub> :

- production au niveau cellulaire : reflet du métabolisme cellulaire ;
- transport du CO<sub>2</sub> au niveau sanguin : reflet du débit cardiaque ;
- élimination au niveau respiratoire : reflet de la ventilation [2].

Ces fonctions sont fréquemment défaillantes en réanimation. La capnométrie est donc un outil de monitoring potentiellement simple et informatif.

## Techniques de mesure

La spectrométrie à infrarouge est la méthode la plus utilisée, beaucoup plus abordable en termes de volume et de prix que les méthodes plus anciennes (colorimétrique et spectrométrie de masse) [3]. L'intensité du rayonnement infrarouge à travers le capteur est modifiée selon la pression partielle en gaz dans la cellule. La précision est satisfaisante ( $\pm 2$  mmHg pour 40 mmHg). Il existe deux systèmes de recueil des gaz [4].

Le premier, aspiratif (dit *side stream*), prélève à l'aide d'une tubulure au plus près du patient (souvent sur le filtre) un échantillon de gaz analysé par un détecteur à distance.

Pour le second, non aspiratif (dit *mainstream*), la cellule est branchée directement sur le circuit du respirateur, en continu, et analyse les gaz du flux expiratoire (Fig. 1).



**Fig. 1** Position du capteur de CO<sub>2</sub> dit *mainstream*

<b>Tableau 1</b> Avantages et inconvénients des systèmes aspiratifs et non aspiratifs		
	<b>Aspiratif</b>	<b>Non aspiratif</b>
Délai de réponse	Allongé	Très court
Obstruction/fuite possible	Oui	Non
Analyse multi-gaz	Oui	Non
Fragilité de la cellule	Non	Oui
Majoration de l'espace mort, poids du dispositif	Non	Oui
Utilisation chez un patient non intubé	Oui	Non

Chaque dispositif présente des avantages et inconvénients propres (Tableau 1).

Dans tous les cas, l'utilisation de ces dispositifs requiert quelques précautions. Le système (aspiratif ou non) doit être protégé du patient par un filtre antibactérien et échangeur de chaleur et d'humidité afin de limiter le risque de contamination et de dégradation du capteur. Avant toute utilisation, un étalonnage de l'appareil est nécessaire et doit être répété toutes les 24 heures en cas d'utilisation en continu. Cette calibration se fait selon les instructions du constructeur et souvent à l'air ambiant (faire « le zéro »). Une fois ces précautions prises, il est possible d'utiliser le dispositif.

## Définition et analyse des courbes

Une fois le dispositif correctement installé, l'analyse des différentes courbes et valeurs est possible.

### Définition

La capnométrie est ainsi la mesure de la concentration de  $\text{CO}_2$  expiré. La représentation graphique de cette concentration en fonction du temps ou du cycle respiratoire correspond à la capnographie [5].

### Capnographie en fonction du temps

Il s'agit de la représentation « classique » de la courbe de capnographie présente sur les respirateurs. Plusieurs segments composent ce tracé (Fig. 2).

À l'expiration :

- phase 1 : segment nul, plat, correspondant à l'expiration des gaz provenant de l'espace mort anatomique, ne contenant pas de  $\text{CO}_2$  ;
- phase 2 : ascension de la courbe correspondant à l'apparition de gaz provenant des alvéoles et contenant du  $\text{CO}_2$  mélangé aux gaz de l'espace mort anatomique ;
- phase 3 : plateau alvéolaire légèrement ascendant correspondant au gaz alvéolaire uniquement, riche en  $\text{CO}_2$ . La pente existante est secondaire à deux mécanismes : la persistance d'une perfusion des alvéoles au cours de l'expiration qui enrichit les alvéoles en  $\text{CO}_2$  ainsi que l'épuration tardive des alvéoles à bas rapport ventilation/perfusion (donc plus riches en  $\text{CO}_2$ ).

À l'inspiration :

- phase 0 : pente à  $90^\circ$  correspondant à l'inspiration de gaz frais ne contenant pas de  $\text{CO}_2$ .

Le point terminal de la phase 3 représente la pression télé-expiratoire en  $\text{CO}_2$  ( $\text{PetCO}_2$ ). Cette valeur n'est fiable et interprétable qu'à la suite d'une phase de plateau. Elle est normalement égale à la pression alvéolaire en  $\text{CO}_2$  en fin d'expiration ( $\text{PACO}_2$ ) en cas d'absence de pathologie pulmonaire. La  $\text{PetCO}_2$  est la somme des concentrations en  $\text{CO}_2$  des alvéoles bien ventilées et perfusées mais aussi des alvéoles ventilées mais mal ou non perfusées (espace mort alvéolaire) donc pauvres en  $\text{CO}_2$ . La  $\text{PetCO}_2$  est de ce fait inférieure à la  $\text{PACO}_2$ . De plus, la  $\text{PACO}_2$  est assimilable à la pression artérielle en  $\text{CO}_2$  ( $\text{PaCO}_2$ ) du fait d'une excellente diffusion du  $\text{CO}_2$  à travers la membrane alvéolocapillaire qui permet un équilibre entre les deux compartiments ( $\text{PACO}_2 = \text{PaCO}_2$ ). Il existe donc un gradient moyen entre la  $\text{PetCO}_2$  et

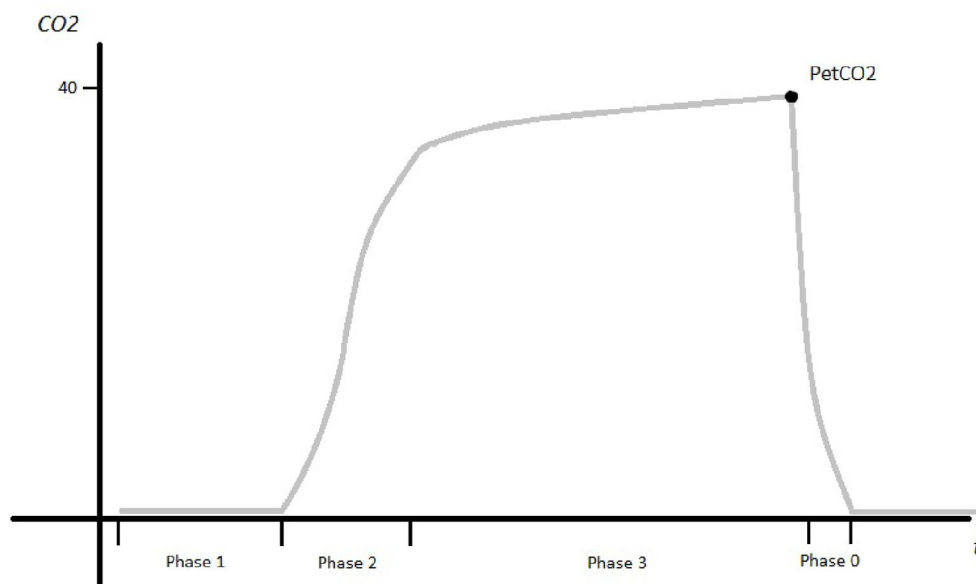


Fig. 2 Courbe de capnographie représentant la concentration de  $\text{CO}_2$  expiré en fonction du temps

la PaCO<sub>2</sub> d'environ 2–5 mmHg (plus faible chez l'enfant et la femme enceinte) [6].

Les modifications de la PetCO<sub>2</sub> sont rapides et sensibles, secondaires à de nombreux facteurs, et l'interprétation de ces modifications doit intégrer de multiples paramètres hémodynamiques et respiratoires (Tableau 2).

Au-delà de l'analyse de la valeur de PetCO<sub>2</sub>, l'aspect visuel de la courbe est important et fournit rapidement d'importantes informations sur la ventilation du patient (Fig. 3).

### Capnographie volumétrique

Il s'agit d'une représentation graphique de la concentration de CO<sub>2</sub> en fonction du volume courant expiratoire. Cette courbe est accessible par la réalisation d'un Single Breath Test (SBT- CO<sub>2</sub>) (Fig. 4). Comme sur une représentation du CO<sub>2</sub> en fonction du temps, la courbe de CO<sub>2</sub> débute par une phase nulle et plate qui correspond à l'air présent dans

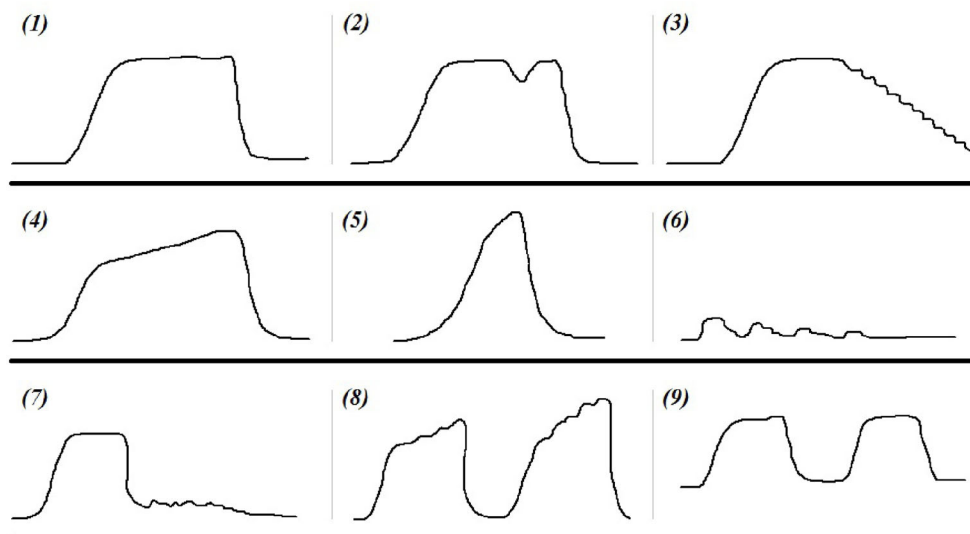
l'espace mort anatomique. S'ensuit une phase de transition avec un air mélangé provenant de l'espace mort anatomique et des alvéoles. La pente de cette courbe est importante (SII). Enfin, la courbe arrive à un plateau correspondant au gaz alvéolaire uniquement. La pente (SIII) est ici beaucoup plus douce et est un reflet des variations du rapport ventilation/perfusion.

L'objectif de la capnographie volumétrique est d'obtenir une évaluation de l'espace mort [7].

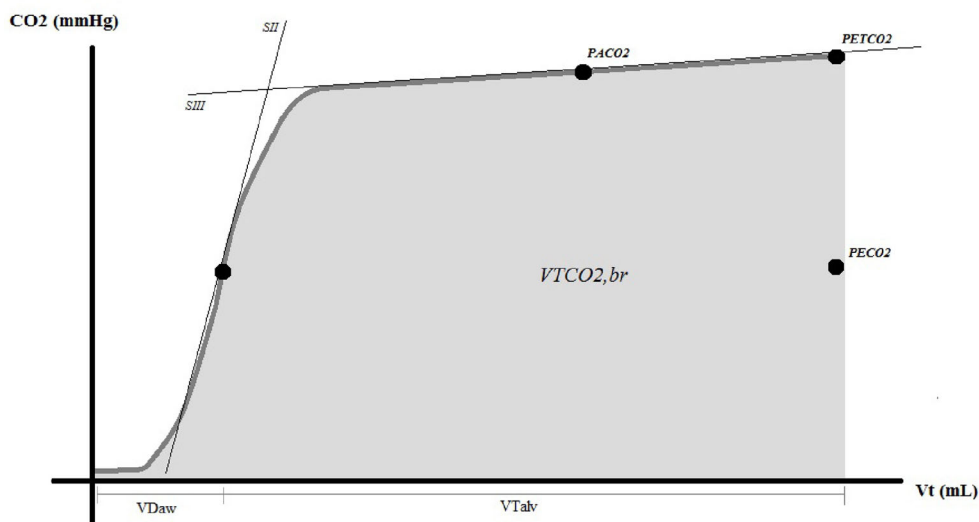
Pour rappel, l'espace mort physiologique ( $V_{Dphys}$ ) est la somme de l'espace mort anatomique ( $V_{Daw}$ ), c'est-à-dire de la partie des voies aériennes qui ne participe pas aux échanges gazeux et de l'espace mort alvéolaire ( $V_{Dalv}$ ) qui regroupe les alvéoles ventilées mais peu ou non perfusées.

Initialement, l'espace mort était mesuré par la formule de Bohr [8]. Les concentrations en CO<sub>2</sub> étaient mesurées à l'aide de sac de Douglas, méthode complexe à utiliser au lit du patient. Dans un souci de simplification, Fowler décrit

Absence de PetCO <sub>2</sub>	Diminution de PetCO <sub>2</sub>	Augmentation de PetCO <sub>2</sub>
Arrêt cardiorespiratoire Extubation ou déconnexion circuit Obstruction Panne du capteur	<i>Hémodynamique</i> : baisse du débit cardiaque, pneumothorax compressif <i>Métabolique</i> : hypothermie <i>Respiratoire</i> : embolie pulmonaire, hyperventilation, ventilation sélective	<i>Hémodynamique</i> : augmentation du débit cardiaque <i>Métabolique</i> : hyperthermie, levée d'un garrot, convulsion, apport de bicarbonate (CO <sub>2</sub> exogène), hyperthermie maligne <i>Respiratoire</i> : hypoventilation, bronchospasme, réinhalation de CO <sub>2</sub>



**Fig. 3** Interprétation de courbes de capnographie. (1) capnogramme habituel ; (2) encoche au niveau de la phase 3 : ventilation spontanée suite à une décurarisation, asynchronie, fuite autour du ballonnet ; (3) oscillations cardiaques lors d'une pause expiratoire ; (4) augmentation de la pente de la phase 3 chez les patients BPCO ; (5) bronchospasme sévère ; (6) intubation œsophagienne, la courbe correspond à l'évacuation de l'air gastrique pouvant contenir du CO<sub>2</sub> ; (7) chute brutale de la courbe de CO<sub>2</sub> : arrêt cardiorespiratoire, extubation, déconnexion du respirateur ; (8) intubation sélective ; (9) augmentation de la ligne de base en cas de réinhalation de CO<sub>2</sub>



**Fig. 4** Single Breath Test de CO<sub>2</sub> en capnographie volumétrique. Vt représente le volume courant expiré ; V<sub>daw</sub> l'espace mort anatomique ; le volume expiratoire alvéolaire ; P<sub>ACO<sub>2</sub></sub> la pression alvéolaire en CO<sub>2</sub> ; P<sub>E<sub>CO<sub>2</sub></sub></sub> la pression en CO<sub>2</sub> des gaz mélangés expirés ; P<sub>etCO<sub>2</sub></sub> la pression de fin d'expiration en CO<sub>2</sub>

plus tard de son côté [9] une analyse riche de la courbe de capnographie maintenant validée [10]. Ainsi, la valeur de P<sub>ACO<sub>2</sub></sub> correspond au milieu de la phase de plateau, P<sub>E<sub>CO<sub>2</sub></sub></sub> à la pression moyenne en CO<sub>2</sub> du volume expiré (VTCO<sub>2,br</sub>). De plus, la division en deux de la phase d'ascension du CO<sub>2</sub> (point A) permet de diviser le volume expiré en V<sub>Daw</sub> et en volume courant alvéolaire (V<sub>Talv</sub>). On a donc une mesure possible de l'espace mort par la formule suivante :

$$V_{D_{alv}} = \left( \frac{P_{ACO_2} - P_{E_{CO_2}}}{P_{ACO_2}} \times V_T \right) - V_{D_{Aw}}$$

Du fait des différents paramètres de cette équation, il est évident que de nombreux facteurs vont modifier cet espace mort alvéolaire.

## Indications en réanimation

L'utilisation d'un tel dispositif de mesure en réanimation est étudiée depuis de nombreuses années et nous allons comprendre que le capnographe peut accompagner un patient durant l'ensemble de son séjour en réanimation.

### Contrôle de l'intubation trachéale

En réanimation, les patients sont tous considérés à risque d'intubation difficile, ainsi exposés à des complications potentiellement graves. En anesthésie, le capnogramme est utilisé de façon systématique afin de confirmer le positionnement endotrachéal de la sonde d'intubation. Son usage en réanimation l'est moins.

Une étude prospective descriptive de 2014 de Duwat et al. sur les pratiques de l'intubation, réalisée auprès de plus de

500 réanimateurs français, retrouve seulement 59 % d'utilisation systématique de la capnométrie (auscultation : 97 %, soulèvement du thorax : 73 % et graduation de la sonde : 24 %) [11]. Et ce, alors que la Sfar et la Société de réanimation de langue française (SRLF), dans une recommandation formalisée d'experts (RFE) commune, préconisent avec un accord fort son utilisation systématique pour confirmer la bonne position de la sonde d'intubation [12].

Li et al. retrouvent dans une méta-analyse publiée en 2001 une sensibilité de 93 % et une spécificité de 97 % de la technique [13].

Cette technique n'étant pas infaillible, l'American Association for Respiratory Care (AARC) recommande la présence de courbes continues de capnographie en association à une évaluation clinique pour la confirmation de l'emplacement correct de la sonde [14].

### Optimisation de la ventilation mécanique invasive (VMI)

Une fois les voies aériennes sécurisées, la surveillance de la VMI peut être poursuivie à l'aide de la capnographie. En effet, utilisée en continu, la capnographie offre une surveillance sensible des modifications des conditions de ventilation.

Comme abordé lors de l'explication physiologique, l'évaluation de la valeur de P<sub>etCO<sub>2</sub></sub> et l'aspect visuel de la courbe de capnographie temporelle permettent de poser le diagnostic de complications respiratoires fréquentes en réanimation (obstruction de la sonde d'intubation, extubation, bronchospasme, hypoventilation, etc.). Cette analyse requiert cependant une expertise de l'équipe médicale, obtenue par



l'utilisation fréquente de ce dispositif, afin d'apporter une réponse adaptée [15].

La prise en charge précoce des complications respiratoires permet de limiter les épisodes d'hypoxie. Un audit national réalisé en Angleterre entre 2008 et 2009 met en exergue le rôle préventif de l'utilisation de la capnographie dans la prise en charge des voies aériennes supérieures lors de l'anesthésie en réanimation ou au déchocage [16]. Le défaut d'utilisation du capnographe contribue à 74 % des complications graves (décès, séquelles neurologiques graves, recours à un abord chirurgical des voies aériennes, etc.).

Le raisonnement est le même lorsqu'il s'agit de la surveillance de la ventilation mécanique lors du transport de patient (scanner, bloc opératoire, etc.), situation encore plus à risque pour le patient [17].

La capnographie peut être utilisée dans le but de diminuer le nombre d'examens biologiques. Malgré l'existence d'un gradient entre la  $P_{et}CO_2$  et la  $P_{a}CO_2$ , Razi et al. retrouvent une corrélation satisfaisante entre la  $P_{a}CO_2$  et la  $P_{et}CO_2$  chez des patients traités par VMI ( $R^2 = 0,798$ , gradient moyen à 3,37 mmHg). Le suivi de ce paramètre pourrait permettre de limiter le nombre de gazométries lors de la VMI [18]. Cette méthode semble surtout valable en l'absence de complication respiratoire ou de modification des paramètres du respirateur qui imposent un contrôle sanguin de la  $P_{a}CO_2$ .

### *En neuroréanimation*

De nombreuses études évaluent l'intérêt de ce dispositif chez le neurolésé chez qui la prévention des lésions secondaires cérébrales impose un objectif strict de normocapnie. La capnie est en effet une des variables principales de la régulation hémodynamique cérébrale.

En 2008, Lee et al. retrouvent une corrélation correcte entre les valeurs alvéolaires et artérielles de  $CO_2$  chez 66 patients traités par VMI à la suite d'un traumatisme crânien grave ( $R = 0,666$ , gradient moyen à 3,6 mmHg) [19]. Dans cette étude, les patients avec un haut gradient, du fait d'une valeur de  $P_{et}CO_2$  diminuée, présentent comme attendu plus d'hypotension et d'acidose métabolique. De même, les auteurs retrouvent une plus grande disparité entre la  $P_{a}CO_2$  et la  $P_{et}CO_2$  chez les patients avec un traumatisme thoracique associé. Cela s'explique par des perturbations hémodynamiques ou du rapport ventilation/perfusion.

Kerr et al. en 1996 retrouvent une bonne corrélation ( $R^2 = 0,77$ ) entre ces deux valeurs chez des patients traumatisés crâniens graves sans complication respiratoire [20].

La  $P_{et}CO_2$  est donc un moyen simple de monitorer la  $P_{a}CO_2$  chez les patients neurolésés en prenant en compte les variations hémodynamiques et respiratoires qui imposent un contrôle biologique de la  $P_{a}CO_2$  afin de calibrer le gradient existant.

Enfin, une équipe propose, l'utilisation du  $CO_2$  expiré pour confirmer l'absence de reprise de ventilation spontanée au cours du test d'hypercapnie réalisé pour le diagnostic clinique de mort encéphalique [21]. Son utilisation n'est en revanche pas recommandée de façon systématique par l'Agence de biomédecine. D'autres études sont nécessaires pour confirmer ces résultats encourageants.

### *SDRA*

Du fait de la possibilité offerte par la capnographie pour évaluer l'espace mort, son rôle a été étudié chez les patients atteints de syndrome de détresse respiratoire aiguë (SDRA) [22].

L'importance de cet espace mort est par ailleurs corrélée de manière significative dans les phases précoces et intermédiaires de SDRA à la mortalité [23,24].

Depuis de nombreuses années, l'intérêt de la mesure de l'espace mort à l'aide de la capnographie pour titrer le meilleur niveau de pression expiratoire positive (PEP) est évalué. Suter et al. retrouvent une diminution significative de l'espace mort mesuré par la modification d'Enghoff de l'équation de Bohr lors de l'application de la PEP optimale chez des patients intubés pour une détresse respiratoire aiguë [25]. Blanch et al. ne retrouvent pas d'effet de la PEP sur la mesure de l'espace mort chez huit patients atteints de SDRA malgré un espace mort augmenté par rapport à des patients sans pathologie respiratoire sous anesthésie générale [26]. Il s'agit bien entendu d'études anciennes portant sur de faibles cohortes. Les recherches plus récentes en faveur de l'utilisation de la capnographie volumétrique pour le réglage d'une PEP optimale sont principalement réalisées sur modèle animal [27].

Il est ainsi difficile de conclure sur l'apport réel de la capnographie dans la SDRA. Si dans le domaine de la recherche son apport est indéniable pour comprendre les modifications des rapports ventilation/perfusion et l'évolution de l'espace mort en fonction de la ventilation ou des thérapeutiques, il n'y a pas d'étude suffisamment puissante pour justifier une utilisation courante de la capnographie volumétrique au lit du malade dans ce contexte.

### *Sevrage respiratoire*

Une étude plutôt ancienne de Saura et al. présente le monitoring du  $CO_2$  expiré comme un outil d'aide au sevrage ventilatoire puisque ce dernier pourrait permettre de détecter des épisodes d'hypercapnie au cours d'un test de sevrage, synonymes d'échec probable du retour à une ventilation spontanée [28]. L'utilisation de la CPAP comme mode ventilatoire de test de sevrage remet en cause l'utilité clinique de cette étude.

Plus tôt, Withington et al. utilisent la  $PetCO_2$  dans le sevrage de la ventilation mécanique chez 40 patients après une CEC pour chirurgie cardiaque [29]. Après une période nécessaire de mesure du gradient alvéoloartériel, la capnométrie permet de nouveau de détecter les épisodes d'hypercapnie.

Une autre équipe évalue son intérêt chez 51 patients en cours de sevrage de la ventilation mécanique [30]. La corrélation entre la  $PetCO_2$  et la  $PaCO_2$  est bonne même au cours du sevrage ( $R = 0,97$  chez les patients sans atteinte respiratoire,  $R = 0,68$  chez des patients présentant de l'emphysème pulmonaire).

Plus récemment, les industriels ont proposé des modes ventilatoires d'aide au sevrage (Dräger SmartCare<sup>®</sup>) intégrant des paramètres variables, dont la  $PetCO_2$  pour adapter progressivement l'assistance ventilatoire apportée au patient jusqu'au sevrage du respirateur. Lellouche et al. obtiennent à l'aide de ce mode ventilatoire par rapport à une approche standard une diminution significative de la durée de sevrage (trois versus cinq jours) et de la durée totale de ventilation mécanique (7,5 versus 12 jours) sans augmentation du nombre de réintubations [31]. Cette différence est expliquée par le fait que ce dispositif permet une diminution progressive de l'aide respiratoire et une évaluation continue de la possibilité d'un sevrage du respirateur. Burns et al. avancent les mêmes conclusions dans une méta-analyse : une diminution de la durée de ventilation mécanique, de la durée de sevrage et de la durée d'hospitalisation en réanimation sans augmentation du taux de réintubation [32]. Il n'y a pas d'impact sur la mortalité ou l'incidence des pneumopathies acquises sous ventilation mécanique. Cependant, cette méta-analyse regroupe des études hétérogènes de faible effectif, et une étude de grande ampleur est nécessaire pour confirmer ces résultats et mettre en avant les populations les plus à même de bénéficier de ce mode ventilatoire (sevrage difficile, antécédents pulmonaires, etc.).

### *Asthme aigu grave*

Les modifications physiopathologiques induites par le bronchospasme sévère dans l'asthme aigu grave ont un retentissement sur la courbe de capnographie. Les modifications générées entraînent une modification des rapports ventilation/perfusion avec notamment un retard à la vidange des zones alvéolaires riches en  $CO_2$ . Ainsi, sur la courbe de capnographie (Fig. 4), on voit apparaître une diminution de la pente 2 et une augmentation de la pente 3 et de l'angle alpha entre ces deux courbes. Elle prend un aspect « d'aileron de requin » (Fig. 3).

Une corrélation est retrouvée entre ces modifications de la courbe et une efficacité thérapeutique mais principalement aux urgences lors de crise d'asthme ne nécessitant pas de prise en charge réanimatoire [33].

La littérature médicale concernant l'apport du capnogramme dans l'asthme aigu grave traité par VMI étant par ailleurs très pauvre, il est difficile de recommander son utilisation autrement qu'avec l'analyse visuelle simple de la courbe de capnographie pour apprécier l'intensité et l'évolution du bronchospasme.

### **Embolie pulmonaire**

Le raisonnement diagnostique n'est pas évident, puisque fondé sur des critères cliniques et paracliniques non spécifiques pour la plupart [34]. La valeur de  $PetCO_2$  est d'abord utilisée pour exclure ce diagnostic chez des patients avec une faible probabilité d'embolie, mais chez des patients en ventilation spontanée, souvent dans un service d'urgence [35].

L'intérêt de la capnographie volumétrique est ensuite évalué dans cette indication [7]. Vershuren et al. comparent en 2010 l'utilisation de la capnographie volumétrique à l'utilisation du gradient alvéoloartériel chez des patients en ventilation spontanée avec des résultats peu concluants [36]. Au cours de la capnographie volumétrique, ce sont des index issus des courbes (index associant le gradient alvéoloartériel et la pente de la courbe de capnographie) qui sont utilisés et non une évaluation de l'espace mort.

Les études publiées dans ce domaine sont nombreuses, non homogènes et les critères diagnostiques utilisés non comparables. Il est ainsi normal qu'en 2013, Manara et al. ne parviennent pas à apporter une réponse claire dans une méta-analyse sur l'apport de la capnographie dans le diagnostic d'embolie pulmonaire (EP) [37].

Concernant les patients de réanimation, Wiegand et al. explorent l'intérêt de la surveillance de l' $EtCO_2$  et du gradient alvéoloartériel au cours de l'EP massive (amines, ventilation mécanique requise) traitée par thrombolyse [38]. Ils retrouvent un intérêt pronostique puisque le gradient alvéoloartériel du  $CO_2$  décroît chez les patients répondeurs à la thrombolyse. Il s'agit d'une étude isolée qui ne permet pas d'indiquer son utilisation courante dans ce cas.

Il n'y a finalement que peu de publications sur l'utilisation de la capnographie en réanimation pour le diagnostic d'EP. Les variations du gradient alvéolocapillaire ne sont pas assez spécifiques et l'utilisation de la capnographie volumétrique trop complexe.

### **Au cours d'un arrêt cardiorespiratoire**

Dès les premiers instants de la réanimation cardiopulmonaire (RCP), l'utilisation du capnogramme aide le clinicien dans sa prise en charge.

Tout d'abord, nous rappelons qu'il doit être utilisé pour confirmer la position endotrachéale de la sonde d'intubation.

Ensuite, et comme le recommande l'American Heart Association (AHA) à l'aide d'une littérature dense sur le

sujet, lors de la mise à jour de 2015, sur la prise en charge des arrêts cardiorespiratoires (ACR), l' $\text{EtCO}_2$  a une valeur pronostique puisque :

« l'incapacité d'atteindre des valeurs de  $\text{PetCO}_2$  supérieures à 10 mmHg par capnographie après 20 minutes de RCP peut être considérée comme un des paramètres permettant de déterminer à quel moment mettre fin aux manœuvres de réanimation, mais la prise de décision ne doit pas reposer sur cette seule composante » [39].

Ainsi, la valeur de  $\text{PetCO}_2$  est un facteur pronostique associé à un retour à un rythme cardiaque spontané au cours de la RCP qui va guider l'optimisation de la RCP. Comme le confirme une revue de la littérature médicale sur le sujet (regroupant des ACR intra- et extrahospitaliers), une valeur de  $\text{PetCO}_2$  inférieure à 10 mmHg obtenue dès l'intubation ou après 20 minutes de RCP, selon les études, est en faveur d'un décès [40]. Ce même article rapporte une sensibilité variable selon les études (40–100 %) ainsi qu'une spécificité plutôt mauvaise (50–87 %). Par ailleurs, des études plus récentes sont en faveur d'une valeur de  $\text{PetCO}_2$  plus élevée (environ 25 mmHg) pour le groupe de patients retrouvant une activité cardiaque spontanée [41]. Ces différences sont dues au fait que de nombreux facteurs vont modifier la valeur de  $\text{PetCO}_2$  au cours de la RCP (étiologie de l'arrêt cardiaque, paramètres ventilatoires) [42,43]. C'est pour ces raisons que Brinkrolf et al. évaluent la tendance de la  $\text{PetCO}_2$  (pourcentage de valeurs supérieures à 10 mmHg) plutôt qu'une valeur isolée au cours de la RCP [44]. Ils retrouvent une aire sous la courbe de 63,5 % ainsi qu'une sensibilité à 73,9 % et une spécificité à 58,4 % pour un *cut-off* à 13 %. Enfin, la majorité des études citées évaluent le retour à une activité cardiaque spontanée mais peu renseignent sur le pronostic neurologique. D'autres études sont ainsi nécessaires pour homogénéiser les objectifs et les pratiques au cours de la RCP pour espérer un retour à un rythme cardiaque.

Concernant la surveillance en réanimation au décours de l'ACR et le devenir à plus long terme (survie, devenir neuro-

logique, etc.), il existe principalement des études rétrospectives recommandant un objectif d'hypercapnie modérée fondé sur la surveillance de la  $\text{PaCO}_2$  et non la capnographie [45].

## Conclusion

Du fait de son métabolisme cellulaire, d'un transport sanguin et d'une élimination respiratoire, le monitoring du  $\text{CO}_2$  expiratoire fournit de nombreuses informations hémodynamiques, respiratoires et métaboliques.

La capnographie « classique » représentant le  $\text{CO}_2$  expiré en fonction du temps est simple d'utilisation et riche en données. L'analyse visuelle de sa courbe permet le diagnostic précoce de nombreuses complications respiratoires, et son utilisation est requise chez tous les patients traités par VMI. L'obtention d'une courbe de capnographie est indispensable pour confirmer le positionnement endotrachéal de la sonde d'intubation. La  $\text{PetCO}_2$  est assimilable à la valeur de  $\text{PaCO}_2$  après mesure du gradient chez le patient ventilé afin de guider la ventilation mécanique. Elle ne remplace donc pas la mesure de  $\text{PaCO}_2$  biologique mais peut permettre de limiter le recours à la gazométrie dans de nombreuses situations, en neuro-réanimation par exemple. Il est cependant nécessaire de s'assurer de l'absence d'un des nombreux facteurs faisant varier ce gradient avant toute interprétation. Pour l'aide au sevrage respiratoire par contre, d'autres études doivent être menées pour conforter son utilisation courante. Enfin, la  $\text{PetCO}_2$  est un objectif d'optimisation de la RCP au cours d'un ACR, puisqu'il s'agit d'un facteur pronostique de retour à un rythme cardiaque spontané.

La capnographie volumétrique, prometteuse sur le plan physiologique pour son évaluation de l'espace mort alvéolaire, ne semble pas adaptée à une utilisation courante en réanimation. En effet, son intérêt pour le diagnostic d'EP n'est pas démontré, surtout en réanimation, et son apport dans le SDRA (pronostic ou pour orienter le réglage de la PEP optimale) reste pour le moment cantonné au domaine de la recherche.

**Tableau 3** Tableau récapitulatif des points clés

### Points clés

- Reflet du statut métabolique, hémodynamique et respiratoire • La technique la plus utilisée est la spectrométrie à infrarouge • Indications en réanimation : – Contrôle du bon positionnement endotrachéal de la sonde lors de l'intubation, en association avec une évaluation clinique – Monitoring de la ventilation mécanique en continu afin de limiter le nombre de bilans biologiques (corrélation satisfaisante entre  $\text{PaCO}_2$  et  $\text{PetCO}_2$ ), d'assurer la sécurité du patient, de prévenir les complications et d'orienter la prise en charge (neuro-réanimation, etc.) – Arrêt cardiorespiratoire : intérêt pronostique sur le retour à un rythme cardiaque spontané et orientation de la thérapeutique • Pas d'indication franche en réanimation – Embolie pulmonaire : non utile au diagnostic en réanimation – SDRA : méthode pour évaluer l'espace mort mais pour le moment difficilement applicable au lit du malade • Nécessité d'une expertise des équipes médicales et paramédicales



La capnométrie a donc une réelle place en réanimation avec des indications précises. Comme tout outil de surveillance, il est nécessaire d'en connaître les limites avant toute utilisation et d'intégrer son analyse dans une démarche globale (Tableau 3).

**Liens d'intérêts :** les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

## Références

- 1994) Décret sécurité — 8/12/1994. Sfar — Société française d'anesthésie et de réanimation
- Whitaker DK, (2011) Time for capnography — everywhere. *Anaesthesia* 66: 544–549
- Soltner C, Huztinger J, Beydon L, (2003) Monitoring du CO<sub>2</sub> expiré. *Réanimation* 13: 62–70
- Kodali BS, (2013) Capnography outside the operating rooms. *Anesthesiology* 118: 192–201
- Bhavani-Shankar K, Kumar AY, Moseley HS, Ahyee-Hallsworth R, (1995) Terminology and the current limitations of time capnography: a brief review. *J Clin Monit* 11: 175–182
- Liu Z, Vargas F, Stansbury D, Sasse SA, Light RW, (1995) Comparison of the end-tidal arterial PCO<sub>2</sub> gradient during exercise in normal subjects and in patients with severe COPD. *Chest* 107: 1218–1224
- Tusman G, Sipmann FS, Bohm SH, (2012) Rationale of dead space measurement by volumetric capnography. *Anesth Analg* 114: 866–874
- Bohr C, (1891) Ueber die Lungenathmung. *Skand Arch Für Physiol* 2: 236–268
- Fowler WS, (1948) Lung function studies; the respiratory dead space. *Am J Physiol* 154: 405–416
- Tusman G, Sipmann FS, Borges JB, Hedenstierna G, Bohm SH, (2011) Validation of Bohr dead space measured by volumetric capnography. *Intensive Care Med* 37: 870–874
- Duwat A, Turbelin A, Petiot S, Hubert V, Deransy R, Mahjoub Y, Dupont H, (2014) Enquête nationale sur l'intubation difficile dans les services de réanimation français. *Ann Fr Anesth Reanim* 33: 297–303
- Quintard H, l'Her E, Pottecher J, Adnet F, Constantin JM, De Jong A, Diemunsch P, Fesseau R, Freynet A, Girault C, Guitton C, Hamonic Y, Maury E, Mekontso-Dessap A, Michel F, Nolent P, Perbet S, Prat G, Roquilly A, Tazarourte K, Terzi N, Thille AW, Alves M, Gayat E, Donetti L, (2017) Intubation and extubation of the ICU patient. *Anaesth Crit Care Pain Med* 36: 327–341
- Li J, (2001) Capnography alone is imperfect for endotracheal tube placement confirmation during emergency intubation. *J Emerg Med* 20: 223–229
- Walsh BK, Crotwell DN, Resrtrepo RD, (2011) Capnography/Capnometry during mechanical ventilation: 2011. *Respir Care* 56: 503–509
- McGrath BA, (2014) The (Correct) use of capnography will reduce airway complications in intensive care. *Br J Anaesth* 113: 521
- Cook TM, Woodall N, Harper J, Benger J, Fourth National Audit Project, (2011) Major complications of airway management in the UK: results of the Fourth National Audit Project of the Royal College of Anaesthetists and the Difficult Airway Society. Part 2: intensive care and emergency departments. *Br J Anaesth* 106: 632–642
- Wall BF, Magee K, Campbell SG, Zed PJ, (2017) Capnography versus standard monitoring for emergency department procedural sedation and analgesia. *Cochrane Database Syst Rev* 3: CD010698
- Razi E, Moosavi GA, Omid K, Khakpour Saebi A, Razi A, (2012) Correlation of end-tidal carbon dioxide with arterial carbon dioxide in mechanically ventilated patients. *Arch Trauma Res* 1: 58–62
- Lee SW, Hong YS, Han C, Kim SJ, Moon SW, Shin JH, Baek KJ, (2009) Concordance of end-tidal carbon dioxide and arterial carbon dioxide in severe traumatic brain injury. *J Trauma* 67: 526–530
- Kerr ME, Zempsky J, Sereika S, Orndoff P, Rudy EB, (1996) Relationship between arterial carbon dioxide and end-tidal carbon dioxide in mechanically ventilated adults with severe head trauma. *Crit Care Med* 24: 785–790
- Vivien B, Amour J, Nicolas-Robin A, Vesque M, Langeron O, Coriat P, Riou B, (2007) An evaluation of capnography monitoring during the apnoea test in brain-dead patients. *Eur J Anaesthesiol* 24: 868–875
- Doorduyn J, Nollet JL, Vugts MPAJ, Roesthuis LH, Akankan F, van der Hoeven JG, van Hees HW, Heunks LM, (2016) Assessment of dead-space ventilation in patients with acute respiratory distress syndrome: a prospective observational study. *Crit Care Lond Engl* 20: 121
- Raurich JM, Vilar M, Colomar A, Ibáñez J, Ayestarán I, Pérez-Bárcena J, Llompert-Pou JA, (2010) Prognostic value of the pulmonary dead-space fraction during the early and intermediate phases of acute respiratory distress syndrome. *Respir Care* 55: 282–287
- Kallet RH, Alonso JA, Pittet JF, Matthay MA, (2004) Prognostic value of the pulmonary dead-space fraction during the first 6 days of acute respiratory distress syndrome. *Respir Care* 49: 1008–1014
- Suter PM, Fairley B, Isenberg MD, (1975) Optimum end-expiratory airway pressure in patients with acute pulmonary failure. *N Engl J Med* 292: 284–289
- Blanch L, Lucangelo U, Lopez-Aguilar J, Fernandez R, Romero PV, (1999) Volumetric capnography in patients with acute lung injury: effects of positive end-expiratory pressure. *Eur Respir J* 13: 1048–1054
- Bian W, Chen W, Chao Y, Wang L, Li L, Guan J, Zang X, Zhen J, Sheng B, Zhu X, (2017) Application of dead space fraction to titrate optimal positive end-expiratory pressure in an ARDS swine model. *Exp Ther Med* 13: 1572–1577
- Saura P, Blanch L, Lucangelo U, Fernández R, Mestre J, Artigas A, (1996) Use of capnography to detect hypercapnic episodes during weaning from mechanical ventilation. *Intensive Care Med* 22: 374–381
- Withington DE, Ramsay JG, Saoud AT, Bilodeau J, (1991) Weaning from ventilation after cardiopulmonary bypass: evaluation of a non-invasive technique. *Can J Anaesth J Can Anesth* 38: 15–19
- Morley TF, Giaimo J, Maroszan E, Birmingham J, Gordon R, Griesback R, Zappasodi SJ, Giudice JC, (1993) Use of capnography for assessment of the adequacy of alveolar ventilation during weaning from mechanical ventilation. *Am Rev Respir Dis* 148: 339–344
- Lellouche F, Mancebo J, Jolliet P, Roeseler J, Schortgen F, Dojat M, Cabello B, Bouadma L, Rodriguez P, Maggiore S, Reynaert M, Mersmann S, Brochard L, (2006) A multicenter randomized trial of computer-driven protocolized weaning from mechanical ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 174: 894–900
- Burns KEA, Lellouche F, Nisenbaum R, Lessard MR, Friedrich JO, (2014) Automated weaning and SBT systems versus non-automated weaning strategies for weaning time in invasively

- ventilated critically ill adults. *Cochrane Database Syst Rev* 9: CD008638
33. Nik Hisamuddin NAR, Rashidi A, Chew KS, Kamaruddin J, Idzwan Z, Teo AH, (2009) Correlations between capnographic waveforms and peak flow meter measurement in emergency department management of asthma. *Int J Emerg Med* 2: 83–89
  34. Konstantinides SV, Torbicki A, Agnelli G, Danchin N, Fitzmaurice D, Galiè N, Gibbs JSR, Huisman MV, Humbert M, Kucher N, Lang I, Lankeit M, Lekakis J, Maack C, Mayer E, Meneveau N, Perrier A, Pruszczyk P, Rasmussen LH, Schindler TH, Svitil P, Vonk Noordegraaf A, Zamorano JL, Zompatori M, Task Force for the Diagnosis and Management of Acute Pulmonary Embolism of the European Society of Cardiology (ESC), (2014) 2014 ESC guidelines on the diagnosis and management of acute pulmonary embolism. *Eur Heart J* 35: 3033–3069, 3069a–3069k
  35. Kline JA, Meek S, Boudrow D, Warner D, Colucciello S, (1997) Use of the alveolar dead space fraction (Vd/Vt) and plasma D-dimers to exclude acute pulmonary embolism in ambulatory patients. *Acad Emerg Med* 4: 856–863
  36. Verschuren F, Sanchez O, Righini M, Heinonen E, Le Gal G, Meyer G, Perrier A, Thys F, (2010) Volumetric or time-based capnography for excluding pulmonary embolism in outpatients? *J Thromb Haemost* 8: 60–67
  37. Manara A, D'hoore W, Thys F, (2013) Capnography as a diagnostic tool for pulmonary embolism: a meta-analysis. *Ann Emerg Med* 62: 584–591
  38. Wiegand UK, Kurowski V, Giannitsis E, Katus HA, Djonlagic H, (2000) Effectiveness of end-tidal carbon dioxide tension for monitoring thrombolytic therapy in acute pulmonary embolism. *Crit Care Med* 28: 3588–3592
  39. Perkins GD, Jacobs IG, Nadkarni VM, Berg RA, Bhanji F, Biarant D, Bossaert LL, Brett SJ, Chamberlain D, Caen AR de, Deakin CD, Finn JC, Gräsner JT, Hazinski MF, Iwami T, Koster RW, Lim SH, Ma MHM, McNally BF, Morley PT, Morrison LJ, Monsieurs KG, Montgomery W, Nichol G, Okada K, Ong MEH, Travers AH, Nolan JP, (2015) Cardiac Arrest and Cardiopulmonary Resuscitation Outcome Reports: Update of the Utstein Resuscitation Registry Templates for Out-of-Hospital Cardiac Arrest: A Statement for Healthcare Professionals From a Task Force of the International Liaison Committee on Resuscitation (American Heart Association, European Resuscitation Council, Australian and New Zealand Council on Resuscitation, Heart and Stroke Foundation of Canada, InterAmerican Heart Foundation, Resuscitation Council of Southern Africa, Resuscitation Council of Asia); and the American Heart Association Emergency Cardiovascular Care Committee and the Council on Cardiopulmonary, Critical Care, Perioperative and Resuscitation. *Circulation* 132: 1286–1300
  40. Touma O, Davies M, (2013) The prognostic value of end tidal carbon dioxide during cardiac arrest: a systematic review. *Resuscitation* 84: 1470–1479
  41. Hartmann SM, Farris RWD, Di Gennaro JL, Roberts JS, (2015) Systematic review and meta-analysis of end-tidal carbon dioxide values associated with return of spontaneous circulation during cardiopulmonary resuscitation. *J Intensive Care Med* 30: 426–435
  42. Lah K, Križmarić M, Grmec S, (2011) The dynamic pattern of end-tidal carbon dioxide during cardiopulmonary resuscitation: difference between asphyxial cardiac arrest and ventricular fibrillation/pulseless ventricular tachycardia cardiac arrest. *Crit Care Lond Engl* 15: R13
  43. Sheak KR, Wiebe DJ, Leary M, Babaeizadeh S, Yuen TC, Zive D, Owens PC, Edelson DP, Daya MR, Idris AH, Abella BS, (2015) Quantitative relationship between end-tidal carbon dioxide and CPR quality during both in-hospital and out-of-hospital cardiac arrest. *Resuscitation* 89: 149–154
  44. Brinkrolf P, Borowski M, Metelmann C, Lukas RP, Pidde-Küllenbergl L, Bohn A, (2018) Predicting ROSC in out-of-hospital cardiac arrest using expiratory carbon dioxide concentration: is trend-detection instead of absolute threshold values the key? *Resuscitation* 122: 19–24
  45. Lee BK, Jeung KW, Lee HY, Lee SJ, Jung YH, Lee WK, Heo T, Min YI, (2014) Association between mean arterial blood gas tension and outcome in cardiac arrest patients treated with therapeutic hypothermia. *Am J Emerg Med* 32: 55–60