

Les assistances circulatoires : du pré-hospitalier à la réanimation

Romain JOUFFROY M.D.^{1,2}, Aurélie MAKHLOUKI ², Benoît VIVIEN M.D., Ph.D.²

¹ *Département d'anesthésie réanimation – SAMU de Paris, Hôpital Universitaire Necker - Enfants Malades, Assistance Publique - Hôpitaux de Paris, Université Paris Descartes, 149 rue de Sèvres, 75015 Paris, France.*

² *Departments of Anaesthesia & Clinical Epidemiology and Biostatistics, Michael DeGroot School of Medicine, Faculty of Health Sciences, McMaster University and the Perioperative Research Group, Population Health Research Institute, Hamilton, Canada.*

Auteur correspondant : Dr Romain JOUFFROY

Email : romain.jouffroy@aphp.fr

Aucun conflit d'intérêt

Points Essentiels

- L'assistance cardio-circulatoire vise à suppléer la défaillance du système cardiovasculaire et assurer une pression de perfusion tissulaire suffisante dans l'attente du traitement étiologique.
- L'assistance n'est pas un traitement étiologique mais un traitement symptomatique permettant d'attendre la récupération (« *bridge to recovery* ») ou la transplantation (« *bridge to transplant* »).
- Les principaux paramètres de l'assistance circulatoire sont le nombre de tours par minute de la pompe et le débit, qui déterminent la pression générée dans les vaisseaux.
- Lors d'une assistance circulatoire, la pression artérielle n'est pas continue mais pulsatile, et sa valeur est représentée par la pression artérielle moyenne.
- La mise en place d'une assistance circulatoire ne laisse pas de place à l'improvisation : l'anticipation et le travail en équipe sont les prérequis indispensables de cette technique.
- Si la mise en place d'une assistance circulatoire relève de la compétence médicale exclusive, le rôle de l'infirmière est fondamental tant lors de la pose que lors de la surveillance ultérieure.
- Une surveillance au minimum horaire est nécessaire, requérant une feuille de surveillance spécifique, au mieux préalablement établie en équipe.
- La principale complication lors de la pose d'une assistance circulatoire est l'hémorragie.
- L'assistance s'intègre dans la chaîne de survie de l'arrêt cardio-circulatoire (ACC).
- L'assistance a modifié le paradigme de la prise en charge de l'ACC ainsi que la notion d'ACC réfractaire, laissant plus de temps pour l'évaluation neurologique.
- L'utilisation de l'assistance circulatoire doit être large chez les patients hypothermes et/ou neuroprotégés.
- La problématique actuelle est la détermination des critères d'éligibilité à l'assistance circulatoire lors de l'ACC.
- L'assistance circulatoire ne doit pas faire oublier les autres thérapeutiques modifiant le pronostic de l'ACC.

- Le succès de l'assistance circulatoire repose à la fois sur une prise en charge d'équipe et une stratégie globale de la prise en charge de la défaillance cardio-circulatoire, dont l'ACC représente la forme la plus extrême.

Sommaire

I. Introduction

II. Terminologie et grands principes de fonctionnement

III. Principes de mise en place d'une ECLS

IV. Place et rôles infirmiers dans la pose et la surveillance d'une ECLS

V. Complications potentielles de l'ECLS

VI. Au-delà de la théorie, les résultats de l'ECLS en pratique

VII. Conclusion

VIII. Références

I. Introduction

L'assistance circulatoire, ou assistance cardio-circulatoire de façon plus précise, fait partie comme l'épuration extra rénale des circulations extracorporelles (CEC), dont le but est de suppléer la défaillance d'organe(s) noble(s).

Les CEC sont nées au début du 19^{ème} siècle suite aux travaux d'un physiologiste français, Le Gallois, qui en 1812 a montré la possibilité d'une circulation artificielle dans un organe séparé du cœur tout en préservant sa fonction [1].

Jusqu'à la moitié du 20^{ème} siècle, l'évolution a essentiellement été expérimentale. En 1951, sont réalisées, sans succès, les premières tentatives de chirurgie cardiaque sous CEC [2]. Le premier succès de CEC en chirurgie cardiaque remonte à 1953 pour une cure de communication inter-auriculaire (*ostium secundum*) avec une durée de CEC de 26 minutes [3]. En France, les premières interventions sont réalisées en 1957 à l'hôpital Broussais (Paris) et à l'hôpital Marie-Lannelongue (Le Plessis-Robinson).

La seconde partie du 20^{ème} siècle connaît une importante évolution des matériels (pompes et oxygénateurs), des techniques de cannulation et des traitements adjuvants (héparinisation des circuits de CEC notamment).

Dans les années 2000, les circuits de CEC se miniaturisent et se simplifient, permettant leur utilisation routinière en chirurgie cardiovasculaire [4].

L'évolution des connaissances, la disponibilité de nouveaux biomatériaux, la progression des techniques de pose et de conduite de la CEC, ainsi que la miniaturisation des circuits, ont progressivement permis l'essor, dans des conditions de sécurité, de la chirurgie cardiovasculaire et son corollaire : l'assistance circulatoire.

En 2009, l'étude CESAR [5] observe un bénéfice en terme de survie de patients adultes atteints de SDRA, asseyant l'assistance circulatoire, à visée respiratoire (ECMO), comme une alternative thérapeutique efficace à la ventilation mécanique.

Après le développement intra-hospitalier, les dernières évolutions se sont faites pour le transfert inter-hospitalier de patients sous assistance et la mise en place d'assistance dès la prise en charge pré-hospitalière des patients. Au SAMU de Paris, la pose extrahospitalière d'assistance circulatoire pour arrêt cardio-circulatoire réfractaire par des médecins non chirurgiens de formation a vu le jour dès 2011 [6].

II. Terminologie et grands principes de fonctionnement

Il convient de différencier 2 modalités d'utilisation de ces assistances, bien que la technologie utilisée soit la même :

- l'ECMO = *Extra Corporeal Membrane Oxygenation* (ou ECMO VV) avec abord veino-veineux, indiquée pour défaillance respiratoire exclusive (SDRA par exemple)

et

- L'ECLS = *Extra Corporeal Life Support* (ou ECMO VA) avec abord veino-artériel, indiquée avant tout pour défaillance cardio-circulatoire (arrêt cardio-circulatoire par exemple), mais qui peut être associée à une défaillance respiratoire.

Le terme eCPR = *extra-corporeal CardioPulmonary Resuscitation* est réservé à la réanimation cardio-pulmonaire utilisant une ECLS.

L'assistance cardio-circulatoire ou ECLS/eCPR vise à suppléer la défaillance du système cardiovasculaire. Le rôle premier du système cardiovasculaire étant de perfuser les organes afin de permettre leur fonctionnement, l'objectif de l'assistance circulatoire est d'assurer une pression de perfusion tissulaire dans l'attente du traitement étiologique de la défaillance

cardiovasculaire. Ainsi, l'ECLS constitue un traitement symptomatique et non étiologique. La littérature anglo-saxonne lui attribue souvent le terme de « *bridge* », signifiant pont ou passerelle, vers la récupération (« *bridge to recovery* ») ou vers la transplantation cardiaque ou pulmonaire (« *bridge to, heart or lung, transplant* »).

Le fonctionnement de l'ECLS est simple. En pratique, le sang veineux, prélevé au niveau d'une grosse veine (fémorale ou jugulaire interne), est propulsé par une pompe centrifuge dans une artère de gros calibre (fémorale ou aorte). Le rôle de la pompe centrifuge est d'assurer la réinjection du sang sous pression pour assurer une perfusion tissulaire.

La réinjection est dite antérograde pour l'ECLS centrale (réinjection dans l'aorte) et rétrograde pour l'ECLS périphérique (réinjection via l'artère fémorale). Dans cette dernière, pour éviter l'ischémie d'aval liée à l'obstruction de l'artère fémorale par la canule artérielle, une ligne de reperfusion connectée sur la canule artérielle est insérée soit immédiatement en aval du point d'insertion de la canule artérielle au niveau fémoral (reperfusion antérograde), soit au niveau tibial ou pédieux (reperfusion rétrograde).

Dans l'ECLS, un oxygénateur ou « poumon artificiel » est ajouté afin de suppléer, toute ou partie, la fonction pulmonaire d'échanges gazeux permettant l'élimination du dioxyde de carbone (CO₂) et l'apport d'oxygène (O₂). Dans l'ECMO, il n'y a aucune forme d'assistance circulatoire : il s'agit d'une assistance respiratoire exclusive permettant de limiter l'agression pulmonaire liée à la ventilation mécanique, par exemple dans l'attente du traitement étiologique du SDRA.

Les réglages d'une ECLS comportent ceux de la suppléance cardio-circulatoire et ceux de la suppléance pulmonaire.

Pour la suppléance cardio-circulatoire, les principaux paramètres sont le nombre de tours par minute de la pompe et le débit généré. De ces 2 paramètres résulte la pression générée par

l'ECLS. La pression de perfusion des organes, « pression artérielle », faisant, quant à elle, intervenir les résistances vasculaires (ou « tonus ») selon l'équation de Bernouilli : $P = R * Q$ avec P, la pression générée, Q le débit, ici assuré par l'ECLS et R, les résistances vasculaires systémiques. Il est donc aisé de comprendre que plus le débit d'ECLS est élevé, plus la pression de perfusion le sera. Ceci n'est évidemment vrai que si une volémie suffisante est assurée, une hypovolémie relative (vasoplégie) étant généralement présente du fait de la réaction inflammatoire préexistante ou secondaire à l'ECLS.

Il est important de comprendre que, la pompe ne générant pas de débit pulsatile mais un débit liminaire, on n'observe pas 3 chiffres de pression artérielle (systolique, diastolique et moyenne) mais une seule valeur, correspondant à la PAM, véritable pression de perfusion tissulaire. Ceci n'est évidemment vrai que lorsque la fonction « pompe » du cœur est insuffisante ou nulle, puisque lorsque celle-ci récupère ou est substituée (transplantation), il est possible d'obtenir une pression artérielle pulsée avec 3 chiffres de pression, alors même que l'ECLS est encore en fonction.

Pour la suppléance de la fonction pulmonaire par l'oxygénateur, 2 paramètres sont à connaître : le réglage de la fraction inspirée en oxygène (FiO_2) et le balayage. Le réglage de la FiO_2 est similaire à celui effectué sur un ventilateur classique : plus la FiO_2 est élevée et plus la pression artérielle partielle en O_2 le sera (fonction oxygénation). Le réglage du balayage permet quant à lui de suppléer la fonction d'épuration du CO_2 : plus le balayage, en litres par minute, est élevé, plus la pression artérielle partielle en CO_2 sera basse.

III. Principes de mise en place d'une ECLS

Que la mise en place de l'ECLS soit effectuée à ou en dehors de l'hôpital, les principes, la chronologie et la durée restent sensiblement les mêmes. Cette pose, dans le contexte de l'urgence vitale (arrêt cardio-circulatoire), ne doit pas laisser de place à l'improvisation.

L'anticipation et le travail en équipe sont les clés de la réussite de cette première étape cruciale de la mise en œuvre d'une ECLS. Chaque minute compte, le défaut de perfusion tissulaire, en particulier celle du cerveau, est associé à une augmentation de la morbidité.

L'équipe est constituée de 2 médecins opérateurs, 2 infirmiers et 1 aide-soignant. La pose dure, *stricto sensu*, en moyenne 20 minutes.

Après dépilation et une première déterision, l'opérateur prépare le champ opératoire, effectue une seconde déterision et procède, 2 à 3 centimètres en dessous du triangle de Scarpa, à une incision transversale de 5 centimètres environ pour une technique de pose à « ciel ouvert ». La dissection, plan par plan, permet de repérer la veine et l'artère fémorales anatomiquement situées à la partie interne du muscle sartorius ou couturier. La veine fémorale, la plus médiale, est repérée puis la canule veineuse insérée jusqu'à ce que son extrémité distale soit en regard de l'oreillette droite. A cet endroit, la distance « inter-parois » est la plus grande et évite les perturbations du fonctionnement de l'ECLS liés à la volo-dépendance. La canule artérielle, plus courte et de diamètre inférieur, est secondairement mise en place, son extrémité distale étant située au niveau de l'artère iliaque primitive droite. La taille des canules est choisie par l'opérateur en fonction de la morphologie du patient (âge, poids, diamètre des vaisseaux, pathologies sous-jacentes).

Une fois, les canules insérées, elles sont purgées avec du sérum salé isotonique puis connectées à l'ECLS. Cette dernière aura été préalablement purgée de l'air présent dans le circuit avec 2 litres de sérum salé isotonique. Cette opération dénommée « débullage » nécessite environ 5 minutes et est effectuée en parallèle de la pose des canules.

Dès que les 2 canules sont reliées à l'ECLS, la pompe est démarrée, et le massage cardiaque externe manuel ou mécanique peut être arrêté. Ceci permet de définir le *low-flow* ou temps de bas débit circulatoire, compris entre le début du massage cardiaque externe et la reprise d'un

débit circulatoire efficace, en l'occurrence ici débit lié à l'assistance circulatoire. Les réglages du débit de pompe sont effectués pour obtenir une PAM entre 50 et 60 mmHg, cette valeur ne faisant cependant pas l'objet d'une unanimité scientifique. La ligne de reperfusion est mise en place, purgée et connectée à l'ECLS.

Une fois les dispositifs intra vasculaires mis en place, une fermeture soigneuse plan par plan est effectuée et un pansement compressif non circulaire mis en place.

Lors d'une pose « percutanée », les principes restent les mêmes, les canules étant insérées selon la méthode de Seldinger avec ou sans repérage, guidage échographique. Le choix de la technique n'est pas unanime et dépend des choix d'équipe.

IV. Place et rôles infirmiers dans la pose et la surveillance d'une ECLS

A. Pose de l'ECLS :

Si la pose des canules de l'ECLS relève de la compétence médicale exclusive, la place de l'infirmière dans l'équipe est essentielle tant dans la mise en place que lors de la surveillance ultérieure du patient.

Lors de la pose d'ECLS, l'infirmière intervient dans la préparation du champ opératoire dont le protocole n'a rien de spécifique et suit les recommandations en vigueur. Elle assiste ensuite l'opérateur en lui donnant de façon stérile les matériels nécessaires à la mise en place des canules.

Sous réserve d'une formation préalable, il est possible que le « débullage » soit effectué par l'infirmière.

Outre la mise en place du monitoring électrocardioscopique usuel et plus spécialisé (BIS, NIRS, ScVO₂, ...), des actes infirmiers non spécifiques sont réalisés en parallèle de la pose de l'assistance. Ces actes consistent notamment en :

- administration de médicaments vasopresseurs et inotropes (adrénaline, noradrénaline, dobutamine),
- remplissage vasculaire par du sérum salé isotonique uniquement compte tenu de l'hypotonicité des autres cristalloïdes majorant l'œdème cérébral et de la neurotoxicité propre du glucose.
- administration d'une sédation et antibioprophylaxie selon les protocoles en vigueur,
- réalisation de prélèvements pour des bilans sanguins,
- administration de produits sanguins labiles (CG, PFC, plaquettes) et médicaments dérivés du sang (fibrinogène) avec des objectifs, non consensuels, de 10 g/dl d'hémoglobine, 100 000/mm³ de plaquettes, 50% de TP et 1,5 g/l de fibrinogène.

La pose des autres dispositifs, sondes urinaire et gastrique, est réalisée après celle de l'ECLS.

Les horaires des étapes clés de la mise en place de l'ECLS doivent être colligées : heure d'incision, heure de pose des canules veineuse et artérielle, heure de la mise en place de la reperfusion et heure de mise en route de la pompe.

B. Surveillance de l'ECLS :

Hormis la surveillance standard d'un patient de réanimation, l'ECLS nécessite une surveillance accrue, en général au minimum horaire du fait de l'instabilité hémodynamique initiale et des risques inhérents à l'ECLS. Pour ce faire, l'élaboration par l'équipe médicale et paramédicale d'une feuille de surveillance spécifique propre à chaque service s'avère nécessaire.

Les éléments de surveillance suivants peuvent y figurer (liste non exhaustive) :

* hémodynamique : pression artérielle, fréquence cardiaque, heure du retour à une activité

cardiaque spontanée (RACS), arythmie, doses de catécholamine, débit cardiaque, ScVO₂, autres spécificités de service. Le nombre de tours/minute de pompe, le débit de pompe, les pressions dans les lignes artérielle et veineuse, la perméabilité et la fonctionnalité de la ligne de reperfusion, l'aspect des canules et leur caractère « vibrant » éventuel ainsi que l'aspect de la membrane de l'oxygénateur (dépôts de fibrine) sont à surveiller. La surveillance du pansement (hémorragie) et de la perfusion d'aval (couleur, chaleur, souplesse des masses musculaires et pouls) du membre inférieur « canulé » est en général intégrée à la surveillance hémodynamique.

* ventilatoire : SpO₂, volume courant, fréquence respiratoire, PEP, pression de plateau et FiO₂ au niveau du ventilateur, FiO₂ et balayage de l'ECLS.

* neurologique : score de sédation (Ramsay par exemple), pupilles (taille et réactivité à la lumière), BIS ou autre monitoring neurologique.

* température corporelle centrale avec comme objectif la lutte contre toute épisode d'hyperthermie.

* autres éléments non spécifiques : diurèse avec coloration des urines (hématurie), aspect du tégument (marbrures).

V. Complications potentielles de l'ECLS

A. Complications principales :

Les principales complications lors de la pose d'une ECLS sont représentées par l'échec [7-9] et la survenue d'une hémorragie [7, 10].

La restitution du sang « artérialisé » après passage dans l'ECLS périphérique, sous pression et à contrecourant (rétrograde) peut générer un œdème aigu du poumon cardiogénique. Sa physiopathologie est la suivante : augmentation de la pression intra-aortique par l'ECLS,

entraînant en cascade une augmentation de la pression télé diastolique ventriculaire gauche puis de la pression auriculaire gauche, puis de la pression capillaire pulmonaire, et in fine aboutissant à une extravasation de plasma au niveau de l'interstitium pulmonaire. Les principes thérapeutiques visent, dans un premier temps, à favoriser la vidange des cavités cardiaques par l'administration d'inotropes positifs voire la mise en place d'un ballon de contre-pulsion aortique. En cas d'échec, la septotomie atriale percutanée ou la mise en place d'une assistance percutanée gauche peuvent être proposées avant de centraliser l'assistance.

B. Autres complications (liste non exhaustive) :

De multiples complications non spécifiques peuvent survenir chez un patient sous ECLS, a fortiori dans un contexte de post-ACC :

- Défaillances mécaniques du circuit d'ECLS : thrombose, embolies gazeuses [7].
- Neurologiques : convulsions (cliniques ou EEG), AVC ischémique ou hémorragique, état pauci-relationnel, mort encéphalique.
- Cardiaques : troubles du rythme, tamponnade, arrêt cardiaque.
- Respiratoires : pneumothorax.
- Infectieuses locales et générales.
- Métaboliques : acidose métabolique, dysglycémie.
- Hémorragiques : thrombopénie, CIVD.
- Digestives : hémorragie digestive, hyperbilirubinémie.
- Rénales : insuffisance rénale aiguë par nécrose tubulaire aiguë.
- Tardives au niveau du site d'explantation : désunion ou retard de cicatrisation, lymphorrhées, infection, hémorragie, dysesthésies musculo-cutanées de la cuisse, lymphœdème.

VI. Au-delà de la théorie, les résultats de l'ECLS en pratique

La prise en charge de l'arrêt cardio-circulatoire repose sur le concept de la « chaîne de survie » [11] au sein de laquelle chaque maillon a une importance majeure et influence le pronostic global. Au titre de traitement symptomatique de la défaillance cardio-circulatoire, l'ECLS trouve naturellement sa place dans cette chaîne de survie.

Avant le développement technologique ayant permis l'utilisation en dehors des blocs opératoires de l'ECLS, le paradigme était « simple » : la poursuite de la chaîne de survie était suspendue à l'obtention du RACS [12]. Depuis l'ECLS, le paradigme et les objectifs de la réanimation cardio-pulmonaire (RCP) ont évolués : désormais, l'objectif n'est plus l'obtention du RACS mais l'obtention d'une pression de perfusion suffisante pour limiter la souffrance tissulaire, essentiellement cérébrale, dans l'attente du traitement étiologique. L'option de l'ECLS/eCPR, est dorénavant proposée par les sociétés savantes pour y parvenir [13]. Il a en effet été observé que le massage cardiaque, externe ou automatisé, ne permet pas d'obtenir une pression de perfusion suffisante [14, 15]. L'ECLS a également modifié la notion d'ACC réfractaire : ce dernier est défini par un échec de la RCP [11, 16], mais certains pays y ont introduit une notion temporelle supplémentaire (30 minutes de RCP bien conduite en France [16, 17] issue de l'analyse de la littérature retrouvant l'absence de RACS, donc de survie, au-delà de 30 minutes de RCP bien conduite [12]).

Ainsi, l'ECLS en tant que traitement symptomatique de la défaillance circulatoire de l'ACC permet conceptuellement de modifier la composante temporelle dans la définition de l'ACC réfractaire. Elle permet de donner du temps pour d'une part le traitement étiologique de l'ACC, et d'autre part l'évaluation neurologique [18-22].

La faisabilité et l'efficacité de l'ECLS dans la prise en charge de l'ACC extra ou intra-

hospitalier ont été démontrées [19, 23]. La question actuelle réside dans la détermination des critères d'éligibilité à l'ECLS chez les patients en ACC. S'il est admis que son utilisation doit être large dans certains groupes de patients, en particulier ceux hypothermes et/ou neuroprotégés (intoxiqués ou sous anesthésie générale préalable), la détermination de ces critères est essentielle pour éviter l'instauration d'une technique lourde chez des patients sans espoir de survie.

L'ECLS ne doit pas faire oublier les autres thérapeutiques influençant le pronostic des patients. L'ACC en lui-même, la RCP et le recours à l'ECLS entraînent la survenue du « syndrome post-ACC » pouvant conduire à un syndrome de défaillance multi-viscérale [24, 25]. Sa prise en charge nécessite la mise en œuvre d'un ensemble de thérapeutiques tels que le contrôle de l'oxygénation post-ACC et le contrôle de la température [26-28].

VII. Conclusion

La mise en œuvre d'une ECLS nécessite un travail d'équipe, s'intégrant dans une stratégie globale de prise en charge de la défaillance cardio-circulatoire, dont l'ACC représente la forme la plus extrême.

Références

- [1] JC. LG. Expériences sur le principe de la vie, notamment sur le siège de ce principe ; suivies du rapport fait à la première classe de l'Institut sur celles relatives aux mouvements du cœur. Paris : d'Hautel, 1812.
- [2] Dennis C, Spreng DS, Jr., Nelson GE, Karlson KE, Nelson RM, Thomas JV, et al. Development of a pump-oxygenator to replace the heart and lungs; an apparatus applicable to human patients, and application to one case. *Ann Surg.* 1951;134(4):709-21.
- [3] Gibbon JH, Jr. Application of a mechanical heart and lung apparatus to cardiac surgery. *Minn Med.* 1954;37(3):171-85.
- [4] Christiansen S, Gobel C, Buhre W, Reul H, Autschbach R. Successful use of a miniaturized bypass system with the DeltaStream extracorporeal rotary blood pump. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2003;125(1):43-4.
- [5] Peek GJ, Mugford M, Tiruvoipati R, Wilson A, Allen E, Thalanany MM, et al. Efficacy and economic assessment of conventional ventilatory support versus extracorporeal membrane oxygenation for severe adult respiratory failure (CESAR): a multicentre randomised controlled trial. *Lancet.* 2009;374(9698):1351-63.
- [6] Lamhaut L, Jouffroy R, Kalpodjian A, Deluze T, Phillippe P, Vivien B, et al. Successful treatment of refractory cardiac arrest by emergency physicians using pre-hospital ECLS. *Resuscitation.* 2012;83(8):e177-8.
- [7] Vanzetto G, Akret C, Bach V, Barone G, Durand M, Chavanon O, et al. [Percutaneous extracorporeal life support in acute severe hemodynamic collapses: single centre experience in 100 consecutive patients]. *Can J Cardiol.* 2009;25(6):e179-86.

- [8] Megarbane B, Leprince P, Deye N, Resiere D, Guerrier G, Rettab S, et al. Emergency feasibility in medical intensive care unit of extracorporeal life support for refractory cardiac arrest. *Intensive Care Med.* 2007;33(5):758-64.
- [9] Schwarz B, Mair P, Margreiter J, Pomaroli A, Hoermann C, Bonatti J, et al. Experience with percutaneous venoarterial cardiopulmonary bypass for emergency circulatory support. *Crit Care Med.* 2003;31(3):758-64.
- [10] Kurusz M, Zwischenberger JB. Percutaneous cardiopulmonary bypass for cardiac emergencies. *Perfusion.* 2002;17(4):269-77.
- [11] Perkins GD, Jacobs IG, Nadkarni VM, Berg RA, Bhanji F, Biarent D, et al. 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.* 2015;132(13):1286-300.
- [12] Goldberger ZD, Chan PS, Berg RA, Kronick SL, Cooke CR, Lu M, et al. Duration of resuscitation efforts and survival after in-hospital cardiac arrest: an observational study. *Lancet.* 2012;380(9852):1473-81.
- [13] Cave DM, Gazmuri RJ, Otto CW, Nadkarni VM, Cheng A, Brooks SC, et al. Part 7: CPR techniques and devices: 2010 American Heart Association

Guidelines for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care. *Circulation*. 2010;122(18 Suppl 3):S720-8.

- [14] Li H, Wang D, Yu Y, Zhao X, Jing X. Mechanical versus manual chest compressions for cardiac arrest: a systematic review and meta-analysis. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med*. 2016;24:10.
- [15] Delguercio LR, Feins NR, Cohn JD, Coomaraswamy RP, Wollman SB, State D. Comparison of Blood Flow during External and Internal Cardiac Massage in Man. *Circulation*. 1965;31:SUPPL 1:171-80.
- [16] Neumar RW, Eigel B, Callaway CW, Estes NA, 3rd, Jollis JG, Kleinman ME, et al. American Heart Association Response to the 2015 Institute of Medicine Report on Strategies to Improve Cardiac Arrest Survival. *Circulation*. 2015;132(11):1049-70.
- [17] Guidelines for indications for the use of extracorporeal life support in refractory cardiac arrest. *Ann Fr Anesth Reanim*. 2009;28(2):182-6.
- [18] Kagawa E, Inoue I, Kawagoe T, Ishihara M, Shimatani Y, Kurisu S, et al. Assessment of outcomes and differences between in- and out-of-hospital cardiac arrest patients treated with cardiopulmonary resuscitation using extracorporeal life support. *Resuscitation*. 2010;81(8):968-73.
- [19] Cardarelli MG, Young AJ, Griffith B. Use of extracorporeal membrane oxygenation for adults in cardiac arrest (E-CPR): a meta-analysis of observational studies. *ASAIO J*. 2009;55(6):581-6.
- [20] Chen YS, Yu HY, Huang SC, Lin JW, Chi NH, Wang CH, et al. Extracorporeal membrane oxygenation support can extend the duration of cardiopulmonary resuscitation. *Crit Care Med*. 2008;36(9):2529-35.

- [21] Chen B, Chang YM. CPR with assisted extracorporeal life support. *Lancet*. 2008;372(9653):1879.
- [22] Ouweneel DM, Schotborgh JV, Limpens J, Sjauw KD, Engstrom AE, Lagrand WK, et al. Extracorporeal life support during cardiac arrest and cardiogenic shock: a systematic review and meta-analysis. *Intensive Care Med*. 2016;42(12):1922-34.
- [23] Morimura N, Sakamoto T, Nagao K, Asai Y, Yokota H, Tahara Y, et al. Extracorporeal cardiopulmonary resuscitation for out-of-hospital cardiac arrest: A review of the Japanese literature. *Resuscitation*. 2011;82(1):10-4.
- [24] Nolan JP, Neumar RW, Adrie C, Aibiki M, Berg RA, Böttiger BW, et al. Post-cardiac arrest syndrome: epidemiology, pathophysiology, treatment, and prognostication: a scientific statement from the International Liaison Committee on Resuscitation; the American Heart Association Emergency Cardiovascular Care Committee; the Council on Cardiovascular Surgery and Anesthesia; the Council on Cardiopulmonary, Perioperative, and Critical Care; the Council on Clinical Cardiology; the Council on Stroke (Part II). *Int Emerg Nurs*. 2010;18(1):8-28.
- [25] Negovsky VA. The second step in resuscitation--the treatment of the 'post-resuscitation disease'. *Resuscitation*. 1972;1(1):1-7.
- [26] Jouffroy R, Vivien B. Targeted therapeutic mild hypercapnia after cardiac arrest: a part of the bundle of care for mitigating secondary injury after cardiac arrest. *Crit Care*. 2017;21(1):236.

- [27] Kilgannon JH, Jones AE, Parrillo JE, Dellinger RP, Milcarek B, Hunter K, et al. Relationship between supranormal oxygen tension and outcome after resuscitation from cardiac arrest. *Circulation*. 2011;123(23):2717-22.
- [28] Kilgannon JH, Jones AE, Shapiro NI, Angelos MG, Milcarek B, Hunter K, et al. Association between arterial hyperoxia following resuscitation from cardiac arrest and in-hospital mortality. *JAMA*. 2010;303(21):2165-71.