



Disponible en ligne sur
 ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

www.em-consulte.com



MISE AU POINT

Circulations extracorporelles d'assistance respiratoire en réanimation chez l'adulte

Extracorporeal membrane oxygenation in the critically ill adults

C. Manzon^a, O. Barbot^a, F. Moronval^a,
C. Patry^a, S. Chocron^b, G. Capellier^{a,*}

^a SAMU, service de réanimation médicale, pôle d'urgences, CHU Jean-Minjoz, boulevard Fleming, 25030 Besançon, France

^b Service de chirurgie thoracique et cardiovasculaire, CHU Jean-Minjoz, boulevard Fleming, 25030 Besançon, France

Reçu le 2 avril 2009 ; accepté le 13 mai 2009

Disponible sur Internet le 2 juin 2009

MOTS CLÉS

Syndrome de détresse respiratoire aiguë ;
Oxygénation par circulation extracorporelle ;
Pompe ;
Canulation percutanée ;
Barotraumatisme ;
Épuration de CO₂

Résumé La prise en charge de la défaillance respiratoire du syndrome de détresse respiratoire aiguë a fait des progrès considérables depuis la description princeps. Si les mécanismes physiopathologiques sont encore à préciser, le retentissement de la ventilation mécanique par le biais de régime de pression et l'utilisation de volumes courants trop importants est démontré. Les techniques d'assistance respiratoire par circulation extracorporelle permettent la mise en œuvre de stratégies ventilatoires protectrices en épurant le dioxyde de carbone. Selon la technique utilisée, elles participent aussi à l'oxygénation et peuvent apporter un soutien hémodynamique. Malgré de nombreuses séries publiées, deux études prospectives randomisées n'ont pu démontrer un bénéfice de cette technique. Entachées de biais méthodologiques et techniques, confiant dans les évolutions technologiques, plusieurs études sont en cours ou prévues. Si l'assistance respiratoire n'a pas vocation à être utilisée pour toutes les défaillances respiratoires, cette technique doit être proposée après échec des traitements conventionnels, si nécessaire après transfert au sein de structures équipées et formées avec une activité suffisante garantissant la meilleure prévention des complications.

© 2009 Publié par Elsevier Masson SAS pour la Société de réanimation de langue française.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : gilles.capellier@univ-fcomte.fr (G. Capellier).

KEYWORDS

Acute respiratory distress syndrome;
Extracorporeal membrane oxygenation;
Pump;
Percutaneous cannulation;
Ventilator induced lung injury;
CO₂ removal

Summary Since its first description, the care of the acute respiratory distress syndrome has considerably changed. While pathophysiology remain a subject to debate and intensive research, the use of high tidal volume and airway pressure has been demonstrated to be harmful. Extracorporeal membrane oxygenation (ECMO) technics are able to remove carbon dioxide allowing gentle ventilation. According to the technic used, oxygenation and hemodynamic stability may be achieved. Several case reports have been published in the past and recent literature, however two prospective randomised trials failed to demonstrate an impact on survival rate. Heavily discussed on technics, experience and management of the teams involved in these study and according to new developments and concepts, several studies are waiting publication or under way. Extracorporeal membrane oxygenation is indicated as part of global strategy with dedicated and trained team to avoid complications and after referral if necessary.

© 2009 Published by Elsevier Masson SAS on behalf of Société de réanimation de langue française.

Introduction

L'évolution récente des stratégies ventilatoires dans le cadre du SDRA a permis d'améliorer le pronostic global de cette pathologie au décours des dix dernières années [1,2].

Les objectifs de la ventilation mécanique ont évolué d'une tentative de normalisation des gaz du sang, au prix de l'utilisation de hauts niveaux de ventilation minute et de régimes de pression importants conduisant à des complications barotraumatiques pulmonaires, vers une ventilation protectrice adaptée à la sévérité de l'atteinte respiratoire (concept de « *baby lung* »).

Malgré les progrès enregistrés, le recours à des techniques d'assistance respiratoire peut être nécessaire dans l'attente de l'amélioration ou de la guérison de l'échangeur pulmonaire.

Historique de la CEC dans le SDRA

En 1972, Hill et al. décrivent la première assistance respiratoire par circulation extracorporelle (*extracorporeal membrane oxygenation* [ECMO]) chez l'adulte [3]. En 1979, l'ECMO est comparée à une stratégie de ventilation conventionnelle chez les patients en insuffisance respiratoire aiguë [4]. La survie dans le groupe traité par ECMO était de 9,5% contre 8,3% dans le groupe traité par ventilation mécanique conventionnelle. Dans cette étude, les conditions de ventilation mécanique n'étaient pas modifiées dans les deux bras (pressions et volumes importants), le circuit était veino-artériel, l'anticoagulation majeure source de complications hémorragiques et les délais de mise en route de plus de neuf jours après le début de la ventilation mécanique. Une seconde étude [9] publiée en 1994, portant sur 40 malades ne montrait pas non plus de différence de mortalité. Les complications hémorragiques ont été majeures et les centres participant avaient peu ou pas d'expérience de la technique pour certains. Le développement de cette technique a bénéficié de l'engagement de certaines équipes mais aussi des progrès techniques. Ainsi, depuis 1996, l'ECMO se développe chez l'adulte tout en étant encore sous-utilisée par comparaison aux populations de pédiatrie et néonatalogie. Actuellement selon les données du registre de l'*Extracorporeal lung*

support organisation (ESLO), plus de 21 500 nouveaux nés, 3500 enfants et 1300 adultes ont bénéficié d'une assistance respiratoire par circulation extracorporelle avec des survies respectivement de 76, 56 et 51%. Cette survie est modifiée par l'étiologie de l'insuffisance respiratoire aiguë [5].

Justificatif de l'ECMO dans le SDRA

La ventilation mécanique dans le SDRA induit des lésions irréversibles du parenchyme pulmonaire regroupées sous le terme *Ventilation induced lung injury* (VILI). Cette agression s'accompagne aussi d'une réaction inflammatoire locale et systémique pouvant conduire à des défaillances d'organe. Ces constatations sont à l'origine du développement de stratégies ventilatoires dites protectrices limitant le volume courant avec comme corollaire la survenue d'une hypercapnie [7,8].

L'ECMO a été étudiée expérimentalement dans de nombreux modèles (mouton, agneau, porc...) validant les capacités d'épuration de CO₂ de la technique [6]. L'effet sur l'oxygénation dépend de la technique utilisée, des débits sanguins à travers le circuit extracorporel et de l'échangeur pulmonaire.

En 2006, l'HAS n'a pas retenu d'indication de l'ECMO chez l'adulte. Toutefois, les études retenues pour étayer cette recommandation n'intègrent pas les séries récentes : en 1997 [10], l'équipe de Leicester rapporte une survie de 66% chez des patients SDRA avec un PO₂/FiO₂ (P/F) de 57 mmHg, IGS II à 57, PaCO₂ à 102 mmHG, pH à 7,03 pris en charge par ECMO. Ces résultats sont retrouvés dans des séries récentes [11,12], dans des contextes infectieux [13,14], postopératoires [15,16], post-traumatiques [17–19] et remettent en cause les conclusions des séries historiques. En dehors des changements de stratégies ventilatoires, les progrès réalisés au niveau du matériel (biocompatibilité, taille, durée de vie, qualité des membranes, utilisation de pompes non occlusives) et de la gestion des circulations extracorporelles (niveau d'anticoagulation) sont majeurs. Cela contribue certainement à la modification du pronostic des patients SDRA bénéficiant des techniques d'ECMO. Récemment l'étude CESAR (attente de publication), a démontré un bénéfice de l'ECMO dans la prise en charge du SDRA. Parmi les 90 malades randomisés dans le bras ECMO, 68 ont finalement bénéficié

de cette technique. En intention de traiter, il existe une diminution du risque de décès ou de handicap sévère à six mois dans le groupe ECMO avec un risque relatif à 0,69 (CI : 0,05–0,97 ; $p = 0,03$).

Les différentes techniques d'assistance respiratoire ou ECMO [20]

Différentes techniques d'ECMO

On distingue schématiquement trois différents types d'assistance respiratoire utilisables dans le cadre du SDRA. *ECMO veino-veineuse*. Cette technique demeure la technique la plus utilisée. Elle est indiquée en cas de défaillance respiratoire isolée avec une hémodynamique stable. Le sang est drainé depuis le territoire cave inférieur à travers des canules introduites par voie percutanée et est réinjecté dans le territoire cave supérieur ou l'oreillette droite après traitement. Les canules sont de taille 19 à 25 Fr selon le site utilisé et le malade. Les circuits se sont simplifiés avec utilisation d'un seul ensemble pompe-oxygénateur. Des débits sanguins de 2 à 4 L par minute peuvent être obtenus avec cette technique.

ECMO veino-artérielle. L'ECMO veino-artérielle est indiquée en cas de défaillance respiratoire avec instabilité hémodynamique. Cette technique implique dans la plupart des cas un abord chirurgical au scarpin avec pose d'un shunt artériel pour prévenir le risque d'ischémie du membre inférieur en aval de la canulation. Son avantage réside dans la possibilité d'assurer à la fois une assistance hémodynamique et respiratoire par l'obtention de débits importants, conditionnés par la taille des canules. Cette technique est plus complexe dans sa mise en œuvre et expose à des risques thrombotiques systémiques et/ou hémorragiques plus importants que les autres techniques.

Novalung® (pumpless extracorporeal interventionnal lung assist, ILA, GmbH, Hechingen, Allemagne). L'ILA ou « ventilateur à membrane » est un système respiratoire extrapulmonaire qui permet l'élimination du dioxyde de carbone à travers une membrane de diffusion enduite d'héparine. Le circuit extracorporel est établi après canulation artérielle et veineuse fémorale par voie percutanée en utilisant la technique de Seldinger. Ce dispositif ne requiert pas de pompe. Il peut être implanté jusqu'à 29 jours. Les canules sont de taille 13 et 15 Fr et de 15 et 17 Fr respectivement pour les canules artérielles et veineuses [21]. Les débits sanguins sont de l'ordre de 1,5 L par minute avec un débit de balayage de la membrane de l'ordre de 10 L d'oxygène par minute.

Description de la technique et du matériel

Quelques particularités techniques sont à prendre en considération.

Circuits. Un circuit d'ECMO comprend un échangeur gazeux à membrane, une pompe, des canules, des sécurités et un système de surveillance avec monitoring multimodal (pression, SvO₂, hémocrite...).

Anticoagulation. En ECMO, l'héparinisation est inférieure à celle utilisée en chirurgie cardiaque avec des objectifs d'environ 60 secondes pour le TCA et le maintien d'un taux de plaquettes à 80 000 par mm³. Les circuits préhéparinés permettent ainsi de limiter, voire d'interrompre

transitoirement l'anticoagulation (sous réserve d'un débit de pompe suffisant) et sont conçus pour des durées d'utilisation allant jusqu'à plusieurs semaines.

Indications

Les indications de l'ECMO dans le cadre du SDRA tendent à s'uniformiser. Les centres rompus à cette technique possèdent des algorithmes de prise en charge intégrant les traitements instaurés et l'évolutivité de la pathologie [22]. Une stratégie globale est proposée avec pour les malades remplissant des critères de SDRA (P/F < 200), PEEP > 10 cm H₂O et/ou pH < 7,25 le recours à l'ILA et pour un P/F < 70 le recours à l'ECMO [21]. Une étude prospective randomisée incluant 120 malades répondant à ces critères est en cours (NCT00538928).

Le protocole de recherche CESAR, dont les résultats sont soumis à publication, a défini l'utilisation de l'ECMO dans le cadre du SDRA devant [23] :

- l'insuffisance respiratoire sévère mais potentiellement réversible ;
- le score de Murray supérieur à 2,5 ou acidose hypercapnique non compensée avec pH < 7,20 ;
- l'âge de 18 à 65 ans ;
- la durée de ventilation avec pression thoracique ou FiO₂ élevée, inférieure ou égale à sept jours.

Contre-indications

Les contre-indications retenues sont [23] :

- l'hémorragie intracrânienne ;
- la contre-indication à l'utilisation d'héparine (relative) ;
- les patients moribonds ne justifiant pas d'une réanimation intensive ;
- l'âge supérieur à 65 ans.

Une durée de ventilation de plus de sept jours ne contre-indique pas l'ECMO mais augmente sa durée et diminue le pourcentage de guérison. Le traumatisme thoracique ou les infections intra-abdominales (pancréatites) doivent être évalués sur le plan du risque hémorragique.

Monitoring

Rédigées sous l'égide de l'HAS en 2004, des recommandations existent concernant le monitoring et les dispositifs de sécurité pour la CEC en chirurgie cardiaque. L'ECMO en réanimation devrait être soumise au même niveau de surveillance malgré la charge de travail que cela impose aux équipes.

Monitoring du circuit de CEC. La surveillance est adaptée à la technique.

Les objectifs de l'anticoagulation sont multiples :

- de prévenir la formation de thrombi pendant ou après la CEC ;
- de diminuer la consommation des facteurs de coagulation ;
- de limiter les pertes sanguines et les besoins transfusionnels.

La coagulation sur sang total peut être évaluée au lit du malade par réalisation du temps de coagulation activé ou *activated clotting time* (ACT). La mesure de l'héparinémie peut compléter ce monitoring.

Pour l'ECMO, on doit surveiller : les pressions d'entrée et de sortie, la SvO₂, l'hématocrite, la qualité du balayage, le nombre de tours par minute et le débit généré par la pompe. La température est mesurée sur le patient, le circuit et au niveau du générateur thermique.

Pour l'ILA, la surveillance porte sur le balayage, la SvO₂ et le débit sanguin extracorporel.

Monitoring hémodynamique et recherche de la bonne tolérance de l'ECMO. Un monitoring continu sera nécessaire, la pression artérielle moyenne par voie invasive demeure le seul moyen de déterminer les pressions de perfusion. L'échocardiographie transœsophagienne affirme le bon positionnement des canules, contribue à l'évaluation de la tolérance hémodynamique selon la technique utilisée, oriente les conditions du sevrage et recherche des complications (épanchement péricardique, thrombus intracavitaire...).

Complications [24]

Hémorragies, thromboses et hémolyse. En pratique, le clinicien est souvent confronté aux problèmes inhérents à la gestion des complications hémorragiques et thrombotiques.

Les complications hémorragiques sont fréquentes : au site de canulation, aux points de ponction. Plusieurs phénomènes sont observés :

- l'activation de la cascade du complément et fibrinolyse ;
- le déficit en facteurs de la coagulation secondaire à une consommation ;
- la dénaturation protéique spécifique ;
- la dysfonction plaquettaire [25,26].

Pour limiter ces effets, des traitements des surfaces internes permettent de fixer l'héparine et les protéines de façon stable conférant au système une biocompatibilité.

Les canules endovasculaires sont parfois responsables d'accidents thromboemboliques. Le risque embolique systémique, important au cours des assistances veino-artérielles prolongées oscille entre 6 et 15%. La fréquence des accidents asymptomatiques est sous-évaluée.

L'hémolyse dépend du type de canule, de son positionnement, de l'usure de la tête de pompe et de la perte de charge à travers l'oxygénateur.

Complications infectieuses. L'incidence des infections est élevée et responsable d'une mortalité et morbidité importante [27,28]. Ces infections peuvent se situer au niveau du site de canulation ou peuvent correspondre à d'autres infections nosocomiales.

Complications cardiovasculaires. L'ECMO artérioveineuse entraîne une augmentation de la postcharge du ventricule gauche responsable de distension ventriculaire en dehors d'une insuffisance aortique qui la contre-indique. Cette distension ventriculaire gauche peut être à l'origine de lésions ischémiques sous endocardiques qui peuvent compromettre la récupération myocardique [29–32]. Le maintien d'une systole cardiaque efficace est nécessaire,

et peut être suppléée en cas d'inefficacité par des moyens pharmacologiques ou mécaniques [33].

Les complications emboliques sont fibrinocruoriques et/ou gazeuses ayant pour origine le circuit et les canules. L'emploi de filtres artériels a permis de réduire significativement le risque embolique venant de la CEC. De plus, ils possèdent des propriétés de filtration des leucocytes impliqués dans la réaction inflammatoire de la CEC [34].

Complications respiratoires et adaptation de la ventilation mécanique. L'ECMO ne semble pas directement impliquée dans des atteintes pulmonaires qui sont souvent la conséquence de la pathologie initiale. Elle permet en théorie de limiter les lésions liées au baro- et au biotraumatisme.

Au cours de l'ECMO, la ventilation mécanique est adaptée pour limiter les pressions de plateau à 25 cm H₂O avec la PEP minimale garantissant une PaO₂ de 50 mmHg avec une SaO₂ de 85%. La FiO₂ est ajustée pour remplir ces objectifs. La fréquence ventilatoire (dix cycles par minute) et le volume courant sont réglés en limitant les pressions de crête à 35 cm H₂O et la pression de plateau à 25 cm H₂O. Dès que possible (trois à cinq jours), la sédation est allégée pour permettre une reprise de la ventilation spontanée en aide en conservant les mêmes objectifs ventilatoires. Le sevrage de la CEC interviendra sur des critères d'amélioration des échanges gazeux (PaO₂/FiO₂ > 200 mmHg avec PEP ≤ 10 cm H₂O et FiO₂ < 0,6 ; pH > 7,30 avec arrêt du balayage des membranes pendant six heures et pression de plateau des voies aériennes < 25 cm H₂O).

Complications neurologiques et psychiatriques. Essentiellement étudiées en néonatalogie et en pédiatrie, les complications de l'ECMO restent peu évaluées chez l'adulte. Des états psychotiques sont décrits quelques jours après sevrage de la CEC. En général, il s'agit d'épisodes délirants aigus avec thématique de persécution, de caractère transitoire et régressif. L'origine est là aussi multifactorielle :

- thromboembolique ;
- fluctuation hémodynamique ;
- variation de l'autorégulation du débit sanguin cérébral ;
- SRIS...

Complications mécaniques. Les complications mécaniques diffèrent d'un centre à l'autre. Une dysfonction de l'oxygénateur est notée dans 32% des cas (survie de 40,8%), une rupture de tubulure dans 15% (survie 33,3%), un dysfonctionnement de pompe dans 5% des cas (survie de 60%), des accidents emboliques : embolie gazeuse : 3% des cas (33% de survie), embolies fibrinocruoriques : 9% des cas (survie : 56%). En 2000, Mols et al. [22], sur une série de 66 patients traités par ECMO retrouvaient :

- trois cas de rupture de tubulure avec un décès ;
- cinq cas de complications liées à la canulation veineuse ;
- trois cas de complications emboliques ;
- une CIVD.

Retentissement sur la pharmacocinétique des médicaments [35]. La pharmacocinétique de nombreuses molécules, fentanyl, antibiotiques, voriconazole, héparine non fractionnée, semble être modifiée au décours de l'ECMO.

Considérations pharmacoéconomiques

Le surcoût actuel de l'ECMO représente 10% de l'ensemble des coûts générés par le traitement conventionnel du SDRA.

Augmentation de la charge de soin

La prise en charge multidisciplinaire comprend un personnel dédié de réanimation (ratio IDE / malade de 1/1) et la sollicitation des équipes (perfusionnistes et chirurgiens) des services de chirurgie cardiaque. En cas de généralisation de l'utilisation des techniques d'ECMO dans le SDRA, les effectifs devront être dimensionnés en conséquence avec une formation spécifique des personnels médicaux et paramédicaux. Même si le recours à l'ILA semble plus facile, son utilisation dans des structures habituées à gérer les circulations extracorporelles est nécessaire pour permettre la conversion vers une ECMO en cas d'inefficacité.

Coût matériel [36–39]

Une étude ancienne réalisée en néonatalogie [36] retrouve un coût trois fois supérieur à la prise en charge classique des insuffisances respiratoires sévères des nourrissons par ECMO. Il reste inférieur par année de vie gagnée à ceux générés par une transplantation hépatique, une greffe de moelle osseuse, une transplantation cardiaque ou rénale. Des données plus précises seront disponibles avec la publication de l'étude CESAR [39].

ECMO et SDRA : devenir des patients

Une étude récente [40] s'est intéressée au devenir des patients ayant bénéficié d'une prise en charge par ECMO. L'évaluation du statut respiratoire était réalisée par l'association d'un scanner thoracique en coupes fines, d'EFR avec détermination de la DLCO, l'estimation de la qualité de vie était faite par questionnaire (SGRQ). La majorité des patients présentaient des atteintes anatomiques à type de fibrose modérée au scanner mais d'allure limitée sans prédominance de la localisation antérieure typique des lésions séquellaires du SDRA. Les tests d'EFR montraient des valeurs normales basses avec un syndrome obstructif infraclinique. La plupart des patients décrivaient une altération de leur qualité de vie sans lien objectif avec leur statut respiratoire. Il est à noter que la majorité des patients ayant bénéficié de l'ECMO avaient retrouvé leur activité professionnelle à un an.

Conclusion

L'ECMO utilisée dans le cadre du SDRA doit s'intégrer dans une approche multimodale au sein de stratégies de prise en charge prédéfinies et réévaluées régulièrement. Ces thérapeutiques doivent être proposées avant l'installation de lésions pulmonaires ou de défaillances d'organes pour permettre la mise en œuvre de stratégies ventilatoires protectrices. Une expérience suffisante et un environnement propice sont requis pour limiter la survenue de complications techniques. Ces modalités sont à définir, une ébauche de réponse est apportée avec les résultats préliminaires de l'étude CESAR. L'étude allemande en cours et le projet d'étude multicentrique française devraient permettre de les préciser.

Conflits d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflits d'intérêts.

Remerciements

Remerciements à l'équipe soignante du service de réanimation médicale et l'équipe de chirurgiens et perfusionnistes du service de chirurgie cardiaque pour leur implication dans ces techniques.

Références

- [1] Zambon M, Vincent JL. Mortality rates for patients with acute lung injury. ARDS have decreased over time. *Chest* 2008;133:1020–7.
- [2] Lindén V, Palmér K, Reinhard J, Westman R, Ehrén H, Granholm T, et al. High survival in adult patients with acute respiratory distress syndrome treated by extracorporeal membrane oxygenation, minimal sedation, and pressure supported ventilation. *Intensive Care Med* 2000;26:1630–7.
- [3] Hill JD, de Leval MR, Mielek Jr CH, Bramson ML, Gerbode F. Clinical prolonged extra-corporeal circulation for respiratory insufficiency: hematological effect. *Trans Am Soc Artif Intern Organ* 1972;18:546–52 [561].
- [4] Zapol WM, Snider MT, Hill JD. Extracorporeal membrane oxygenation in severe respiratory failure: a randomized prospective study. *JAMA* 1979;242:2193–6.
- [5] Conrad SA, Rycus PT, Dalton H. Extracorporeal life support registry report 2004. *ASAIO J* 2005;51:4–10.
- [6] Brederlau J, Muellenbach R, Kredel M, Schwemmer U, Anet-seder M, Greim C, et al. The contribution of artero-venous extracorporeal lung assist to gas exchange in a porcine model of lavage-induced acute lung injury. *Perfusion* 2006;21:277–84.
- [7] Hickling KG, Henderson S, Jackson R. Low mortality associated with low volume pressure limited ventilation permissive hypercapnia in severe adult respiratory distress syndrome. *Intensive Care Med* 1990;16:372–7.
- [8] Amato MB, Barbas CS, Medeiros DM, Magali RB, Schettino GP, Lorenzi-Filho G, et al. Effect of protective ventilation strategy on mortality in the acute respiratory distress syndrome? *N Engl J Med* 1998;338:347–54.
- [9] Morris AH, Wallace CJ, Menlove RL, et al. Randomized clinical trial of pressure controlled inverse ratio ventilation and extracorporeal CO₂ removal for acute respiratory distress syndrome. *Am J Respir Crit Care Med* 1994;149:295–305.
- [10] Peek GJ, Hilliary MM, Moore N, Sosnowski AW, Firmin R. Extracorporeal membrane oxygenation for adult respiratory failure. *Chest* 1997;112:759–64.
- [11] Lewandowski K, Rossaint R, Pappert D, Gerlach H, Slama KJ, Weidmann H, et al. High survival rate in 122 ARDS patients managed according to a clinical algorithm including extracorporeal membrane oxygenation. *Intensive Care Med* 1997;23:819–35.
- [12] Kahn J, Müller H, Marte W, Rehak P, Wasler A, Prenner G, et al. Establishing extracorporeal oxygenation in a university clinic: cases series. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2007;21:384–7.
- [13] Rosamel P, Delannoy B, Jault V, Metton O, Dubien PY, Flamens C, et al. SDRA infectieux refractaire : place de l'oxygénation extracorporelle [Refractory infectious ARDS: place of extracorporeal oxygenation]. *Ann Fr Anesth Reanim* 2008;27:446–9.
- [14] Blasco V, Leone M, Xeridat F, Albanese J, Martin C. Syndrome de Lemierre avec pneumopathie nécrosante assistée avec succès par épuration extracorporelle de CO₂ [Lemierre's syndrome

- frome necrotizing pneumonia treated with extracorporeal CO₂ removal]. *Ann Fr Anesth Reanim* 2007;27:244–8.
- [15] Dünser M, Hasibeder W, Rieger M, Mayr AJ. Successful therapy of severe ARDS after pneumectomy with ECMO and steroids. *Ann Thorac Surg* 2004;78:335–7.
- [16] Habashi NM, Reynolds HN, Borg U, Cowley RA. Clinical trials of pressure-controlled inverse ratio ventilation and extracorporeal CO₂ removal for ARDS. *Am J Respir Crit Care Med* 1995;151:255–6.
- [17] Navarrete-Navaro P, Rodriguez A, Reynolds N, West R, Habashi N, Rivera R, et al. Acute respiratory distress syndrome among trauma patients: trends in ICU mortality, risk factors, complications and resource utilization. *Intensive Care Med* 2001;27:1133–40.
- [18] Rich S, Reickert BP, Younger C, Hirschl J, Barlett RB, Robert H. Extracorporeal life support in pulmonary failure after trauma. *J Trauma* 1999;46:638–45.
- [19] Cordell-Smith JA, Roberts N, Peek GJ, Firmin RK. Traumatic lung injury treated by extracorporeal membrane oxygenation. *Injury* 2006;37:29–32.
- [20] Pouard P, Laquay N. ECMO en pédiatrie. In: Robert R, Honoré PM, Bastien O, editors. *Les circulations extracorporelles en réanimation*. Elsevier; 2005. p. 505–29.
- [21] Zimmermann M, Bein T, Artl M, Philipp A, Rupprecht L, Mueller T, et al. Pumpless extracorporeal interventional lung assist in patients with acute respiratory distress syndrome: a prospective pilot study. *Crit Care* 2009;13:R10 [<http://ccforum.com/content/13/1/R10>].
- [22] Mols G, Loop, Geiger K, Farthma E, Benzing A. Extracorporeal membrane oxygenation: a ten year experience. *Am J Surg* 2000;180:144–54.
- [23] Peek GJ, Clemens F, Elbourne D, Firmin R, Hardy P, Hibbert C, et al. CESAR: conventional ventilatory support vs membrane oxygenation for severe adult respiratory failure. *BMC Health Serv Res* 2006;6:163.
- [24] Kolla SM, Awad S, Rich P, Hirschl R, Barlett R. Extracorporeal life support for 100 adult patients with severe respiratory failure. *Ann Surg* 1997;226:544–66.
- [25] Weerasinghe A, Taylor KM. The platelet in cardiopulmonary bypass. *Ann Thorac Surg* 1998;66:2145–52.
- [26] Cheung PY, Sawicki G, Salas E, Etches PC, Schultz R, Radomski MW. The mechanisms of platelets dysfunction during extracorporeal membrane oxygenation in critically ill neonates. *Crit Care Med* 2000;28:2584–90.
- [27] Burket JS, Bartlett RH, Hyde KV, Chenoweth CE. Nosocomial infections in adult patients undergoing extracorporeal membrane oxygenation. *Clin Infect Dis* 1999;28:828–33.
- [28] O'Neill JM, Schutze GE, Heulitt MJ, Simpson PM, Taylor BJ. Nosocomial infections during extracorporeal oxygenation. *Intensive Care Med* 2001;27:1247–53.
- [29] Schwartz B, Mair P, Margreiter J. Experience with percutaneous venoarterial cardiopulmonary bypass for emergency circulatory support. *Crit Care Med* 2003;21:758–64.
- [30] Secker-Walter JS, Edmonds JF, Spratt EH, Conn AW. The source of coronary perfusion during partial bypass for ECMO. *Ann Thorac Surg* 1976;21:138–43.
- [31] Kato J, Seo T, Ando H, Takagi H, Ito T. Coronary arterial perfusion during venoarterial membrane oxygenation. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1996;111:630–6.
- [32] Martin GR, Short BL, Abott C, O'Brien AM. Cardiac stun in infants undergoing extracorporeal membrane oxygenation. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1991;101:607.
- [33] Scholtz KH, Schroder T, Hering JP. Need for active left-ventricular decompression during percutaneous cardiopulmonary support in cardiac arrest. *Cardiology* 1994;84:222–30.
- [34] Hessel EA, Hill AG. Circuitry and cannulation techniques. In: Gravlee GP, Davis RF, Kurusz M, Utley J, editors. *Cardiopulmonary bypass: principles and practice*. 2nd ed. Philadelphia (PA): Lippincott William and Wilkins; 2000. p. 69–97.
- [35] Mehta NM, Halwick DR, Dodson BL, Thompson JE, Arnold JH. Potential drug sequestration during extracorporeal membrane oxygenation: results from an ex vivo experiment. *Intensive Care Med* 2007;33:1018–24.
- [36] Schumacher RE, Roloff DW, Chapman R, et al. Extracorporeal membrane oxygenation in term new borns. A prospective cost-benefit analysis. *ASAIO J* 1993;39:873–9.
- [37] Barlett RH, Schumacher RE, Chapman RA, et al. In: Zwischenberger JB, Steinborn RH, Barlett RH, editors. *ECMO: Extracorporeal Cardiopulmonary Support in Critical Care* (ed 2). Ann Arbor, MI: ELSO; 2000. p. 659–75.
- [38] Roberts TE, the Extracorporeal Membrane Oxygenation Economics Working Group on behalf of the Extracorporeal Membrane Oxygenation Trial Steering Group. Economic evaluation and randomised controlled trial of extracorporeal membrane oxygenation: UK collaborative trial. *BMJ* 1998;317:911–6.
- [39] Thalanany MM, Mugford M, Hibbert C, Cooper NJ, Truesdale A, Robinson S, et al. Methods of data collection and analysis for the economic evaluation alongside a national, multi-centre trial in the UK: conventional ventilation or ECMO for Severe Adult Respiratory Failure (CESAR). *BMC Health Serv Res* 2008;8:94.
- [40] Lindén VB, Lidégran MK, Frisé G, Dahlgren P, Frenckner BP, Larsen F. ECMO in ARDS: a long term follow-up study regarding pulmonary morphology and function and health-related quality of life. *Acta Anaesthesiol Scand* 2009;1–7.