

ASSISTANCE CIRCULATOIRE DE COURTE DURÉE

52 —

Joachim CALDERON, Laurent BARANDON,
Gérard JANVIER et Alexandre OUATTARA

Définition

Une assistance circulatoire peut se définir comme un dispositif mis en place dans le système cardiovasculaire afin d'en permettre sa suppléance de façon plus ou moins prolongée. Ce système est le plus souvent extracorporel mais la miniaturisation de certains dispositifs permet, de nos jours, une implantation plus ou moins complète notamment pour les assistances de longue durée. La terminologie des assistances doit donc être plus en relation avec sa fonction qu'au matériel lui-même et il est probable que de nouvelles terminologies apparaîtront aux grés des futurs progrès technologiques. Seules les assistances circulatoires et/ou respiratoires de courte durée sont abordées dans ce chapitre. Le Tableau 52-I décrit les acronymes classiquement utilisés bien que, par vulgarisation, « l'ECMO » soit le terme le plus souvent utilisé pour désigner l'assistance circulatoire et/ou respiratoire de courte durée. Si la première assistance menée avec succès chez l'homme date de 1972 [1], la première série publiée d'assistance respiratoire par circuit extracorporel sept ans plus tard fut un échec, avec un taux de survie de 9,5 % dans le groupe ECMO versus 8,5 % chez les patients ayant reçu une stratégie médicale conventionnelle [2]. L'hypothèse avancée par les auteurs était avant tout une mauvaise sélection des patients. Toutefois, ces résultats négatifs limiteront pendant quelques années l'ECMO au traitement des détresses respiratoires des nouveaux-nés chez qui de meilleurs résultats ont été observés. En revanche, en 1986 Gattinoni et al. ont introduit la notion de l'assistance avec ventilation protectrice définie par la dissociation de l'oxygénation (assurée par la ventilation) et de la décarboxylation (assurée par l'assistance). L'assistance

permet la survie de plus de 48 % des patients présentant un syndrome de détresse respiratoire aiguë (SDRA) dont la mortalité prédite était de plus de 90 % [3]. Ces deux exemples de la littérature illustrent les impératifs de l'assistance circulatoire et/ou respiratoire quelles que soient ses indications : le respect de la sélection des patients et le maintien d'un traitement médical optimisé. L'observation d'une baisse du nombre d'assistances dans le registre ELSO dans la période 1995-2005 est d'ailleurs en rapport avec une amélioration de la prise en charge médicale [4]. Au cours de la dernière décennie, les indications des assistances ont donc évolué vers des situations où la prise en charge médicale trouve ses limites, mais avant l'apparition d'un syndrome de défaillance multiviscérale. À l'opposé, la mise en assistance expose à de possibles complications qui sont toutefois en nette diminution par rapport aux séries initiales. La réduction des complications hémorragiques s'explique aisément par une moindre anticoagulation rendue possible grâce aux traitements de surface des matériaux et à la miniaturisation des dispositifs.

Matériels d'assistance

On distingue les assistances circulatoires (ou *extracorporeal life support* pour ECLS) qui nécessitent obligatoirement une reperfusion dans le compartiment artériel (avec ou sans oxygénateur), des assistances respiratoires qui comportent une reperfusion artérielle ou veineuse (mais obligatoirement avec un oxygénateur). L'association d'un oxygénateur et d'une reperfusion artérielle permet d'assurer à la fois une assistance cardiaque et respiratoire si le drainage est en position veineuse.

Tableau 52-I Acronymes souvent utilisés pour désigner une assistance selon son indication thérapeutique.

Indication respiratoire	Indication hémodynamique
ECMO : <i>extracorporeal membrane oxygenation</i>	CPB* : <i>cardiopulmonary bypass</i>
ECLA : <i>extracorporeal lung assist</i>	ECLS : <i>extracorporeal life support</i>
ECCOR : <i>extracorporeal CO₂ removal</i>	CPS : <i>cardiopulmonary support</i>
	ECPR : <i>extracorporeal cardiopulmonary resuscitation</i>
	LVAD*/RVAD*/BIVAD* : <i>left/right/bi ventricular assist devices</i>
EISOR : <i>extracorporeal interval support for organ retrieval</i>	

* Termes plus souvent utilisés pour des assistances circulatoires de longue durée, d'implantation centrale ou pour un acte de chirurgie cardiaque.

Circuits à pompes centrifuges et occlusives

Ces circuits associent en série une pompe et un oxygénateur reliés par des lignes de tubulures. Ils peuvent donc assurer à la fois la fonction circulatoire et respiratoire jusqu'à 5 ou 6 L/min selon la performance de la pompe. La présence de l'oxygénateur n'est nécessaire que lorsqu'une fonction d'hématose est recherchée (oxygénation et/ou décarboxylation) ou si un shunt droite-gauche est créé par le circuit. Ces circuits sont implantés dans les vaisseaux sanguins périphériques (on parle d'assistances périphériques) mais peuvent aussi être insérés directement dans les cavités cardiaques ou les gros vaisseaux (on parle d'assistance centrale), nécessitant alors une thoracotomie ou une sternotomie. L'implantation se fait au moyen de canules dont les caractéristiques sont fonctions de la morphologie du patient mais aussi de l'indication. L'insertion dans les vaisseaux périphériques peut se faire par voie percutanée, à l'aide de « kits » spécifiques, mais elle requière toutefois une certaine expertise. Une lésion vasculaire étant toujours possible, il est donc préférable que l'insertion se fasse à proximité d'un bloc de chirurgie cardiovasculaire. L'insertion « centrale » fait appel à un chirurgien cardiaque.

La plupart des pompes utilisées de nos jours en Europe sont de type centrifuge non occlusives tandis qu'elles restent principalement occlusives dans les séries anglosaxonnes et notamment en

néonatalogie [5]. Le principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge est basé sur l'effet « vortex » de la rotation rapide d'un disque induite par des forces électromagnétiques, entraînant par couche successive le liquide à son contact. L'axe de rotation est éliminé par sustentation magnétique réduisant les forces de frottement et les débris liés à l'échauffement de l'axe. Le débit généré par une pompe centrifuge dépend des conditions de charge et impose une mesure par effet Doppler du débit à la sortie de la pompe. Une anticoagulation modérée est nécessaire, la principale complication étant une hémolyse et/ou une thrombopénie la plupart du temps modérées.

Les pompes dites « occlusives » ou « à galets » assurent une propulsion du liquide par écrasement puis déplacement d'un galet roulant à la surface du tuyau. Ainsi, en l'absence d'une précharge satisfaisante, une pompe occlusive génère une telle dépression qu'elle entraîne la formation de bulle d'air dans le sang (phénomène de « cavitation »). La cavitation peut aussi se produire sur une pompe centrifuge mais de façon moins intense et rapide. Si un obstacle se produit en aval de la pompe (une thrombose de l'oxygénateur ou une soudure des tuyaux), la pompe occlusive entraîne une hémolyse voire une rupture du circuit par hyperpression. La sécurité d'un circuit à pompe occlusive nécessite un asservissement de la pompe, à la précharge et à la post-charge, capable d'arrêter la pompe en cas d'anomalie. Cette contrainte explique pourquoi les pompes occlusives ont été progressivement

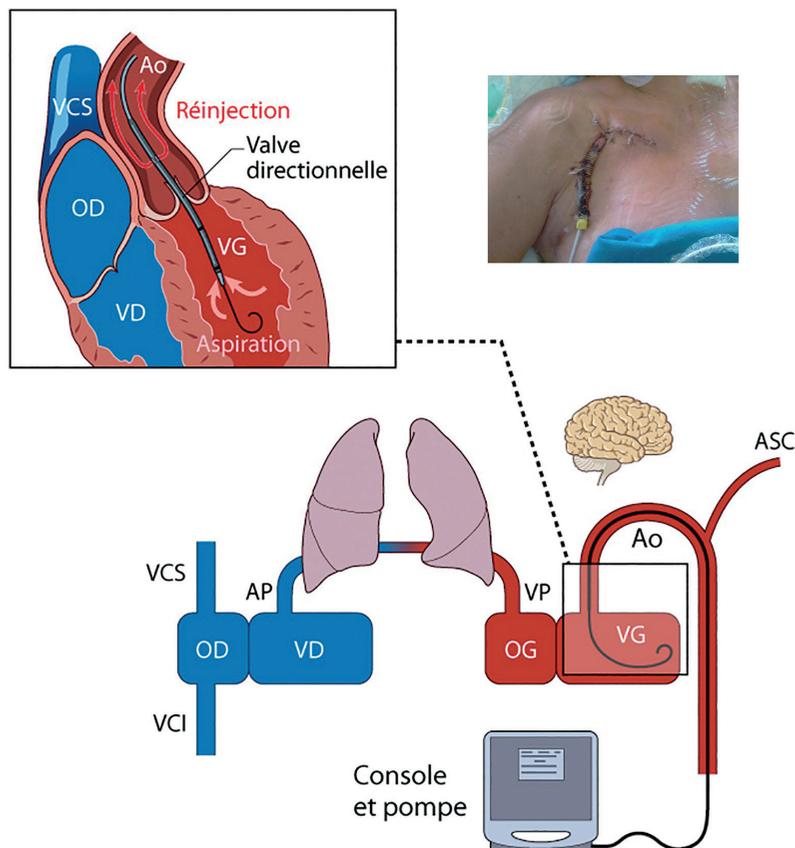


Figure 52-1 Impella™ insérée par voie fémorale ou axillaire (image de droite).

AO : aorte ; AP : artère pulmonaire ; ASC : artère sous-clavière ; OD : oreillette droite ; OG : oreillette gauche ; VCI : veine cave inférieure ; VCS : veine cave supérieure ; VD : ventricule droit ; VG : ventricule gauche ; VP : veine pulmonaire.

abandonnées au profit des pompes centrifuges. Toutefois, lorsque les diamètres et les longueurs des tubulures imposent d'importantes contraintes à l'écoulement du sang, les pompes occlusives restent indiquées. C'est le cas des assistances circulatoires utilisées chez les nouveau-nés où le diamètre des canules oppose une importante résistance à l'écoulement sanguin.

Les oxygénateurs utilisés sont à présent de type « membrane pleine » la plupart du temps siliconées. Les oxygénateurs les plus performants n'opposent que 20 à 30 mmHg de résistance pour un débit de 5 L/min (cette résistance constitue d'ailleurs un élément de surveillance prépondérant). L'oxygénateur permet aussi le réchauffement ou le refroidissement du sang par un circuit. Une anticoagulation modérée est souvent nécessaire et d'autant plus importante que le débit sanguin est faible.

Pompe axiale type Impella™

Ces pompes axiales à énergie électrique génèrent un débit systémique dans le torrent artériel aortique par aspiration du sang dans le ventricule gauche à l'origine d'une décharge en volume et en pression de ce dernier. Ce dispositif, d'un diamètre de 12 Fr (4 mm), peut être inséré de façon percutanée dans une artère fémorale ou axillaire au moyen d'un introducteur de 13 Fr. L'extrémité du dispositif est placée dans le ventricule gauche au travers de la valve aortique sous échographie transœsophagienne ou par scopie (Figure 52-1). Cette pompe axiale permet en théorie d'assurer un débit de 2,5 L/min, sans effet sur l'hématose. Une pompe d'un diamètre supérieur de 21 Fr (7 mm) générant un débit maximal de 5 L/min est également disponible et peut

être implantée dans l'artère fémorale ou axillaire par un abord chirurgical nécessitant une suture d'une prothèse sur le vaisseau. Son positionnement se fait selon les mêmes modalités que pour la pompe de 12 Fr mais les complications sont en relation avec l'acte chirurgical et le diamètre plus gros de la pompe exposant le patient à un risque hémorragique et d'ischémie de membre plus important. Le positionnement intraventriculaire expose aux risques de lésions valvulaire et sous valvulaires et de perforation. L'hémolyse est un effet indésirable qui peut survenir tout particulièrement lorsque des vitesses élevées sont utilisées (Impella™ 2,5 et 3,5). Ce type d'assistance, en permettant une décharge ventriculaire gauche, contribue à diminuer la tension pariétale, la consommation myocardique en oxygène et à améliorer le gradient de perfusion endopéricardique. Tous ces éléments constituent une aide précieuse à la récupération myocardique quand celle-ci est bien sûr envisageable.

Pompes de contreimpulsion

Les pompes de contreimpulsion sont des systèmes à énergie pneumatique qui exercent un déplacement de sang proportionnel au volume gonflé dans un ballon. Dans sa configuration classique, la contreimpulsion se fait à l'aide d'un ballon intra-aortique (BCPIA) assurant une assistance circulatoire de 0,5 à 1 L/min. À l'inverse, la contreimpulsion peut être externe permettant une décharge intraventriculaire (iVAC 3L™ PulseCath™, Pulsecath BV) par un jeu astucieux de valve unidirectionnelle permettant une assistance de 2,5 à 3 L/min (Figure 52-2). D'autres systèmes de contreimpulsion externe sont disponibles mais peu utilisés en France (CardiAssist™ ECP, Cardiomedics, Inc).

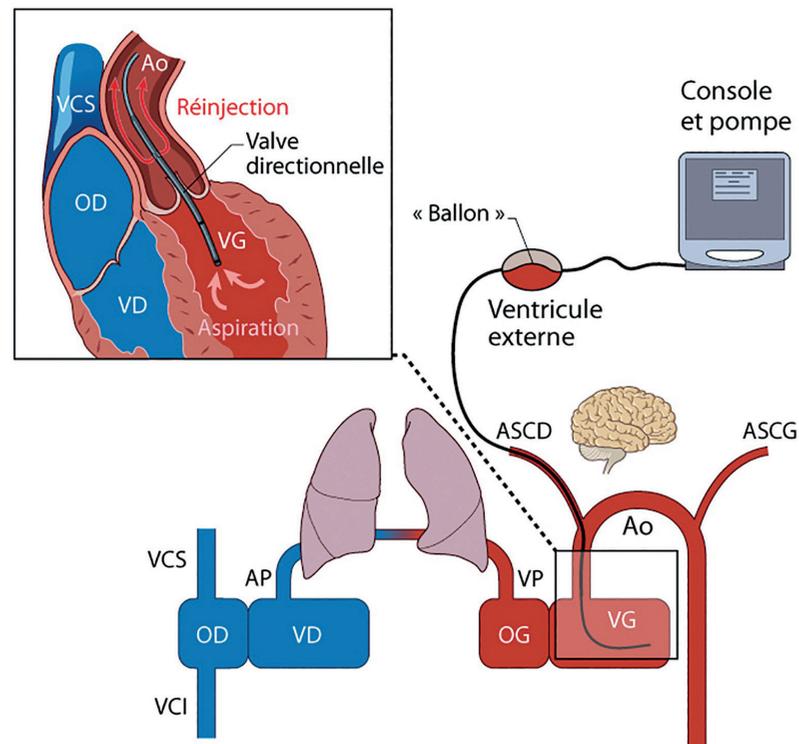


Figure 52-2 Contreimpulsion pneumatique externe (PulseCath IVAC 3L™).

L'insertion du BCPIA se fait par l'intermédiaire d'un désilet de 6,5 à 8F dans l'artère fémorale de façon percutanée. Le dispositif est monté soit sous scopie soit à l'aveugle en plaçant son extrémité au ras de l'artère sous-clavière gauche. Dans ce dernier cas, l'examen clinique retrouve un pouls radial gauche préservé et le contrôle radiologique permet d'ajuster le positionnement l'extrémité radiopaque au sommet du bouton aortique ou 2 cm au-delà de la carène en cas de déformation aortique [6]. Une insertion percutanée sous-clavière ou transaortique par thoracotomie est décrite mais expose le patient à des complications ischémiques, hémorragiques ou infectieuses. Le déplacement du sang généré par le gonflement diastolique du ballon (d'un volume allant de 30 à 50 mL) par de l'hélium entraîne une augmentation de pression artérielle diastolique (PAD), pression motrice de la perfusion coronaire. La PAD est diminuée juste avant l'ouverture des sigmoïdes aortiques afin de faciliter le travail d'éjection du ventricule gauche (VG).

Le système iVAC 3L™ PulseCath™ est inséré dans une artère sous-clavière jusque dans le ventricule gauche. Il reprend le principe du ballon pneumatique raccordé à une console classique de BCPIA. Mais il s'agit cette fois d'un ventricule externe (d'environ 32 mL) qui se remplit de sang et dont la fonction est cette fois d'aspirer le sang du ventricule pour le réinjecter au-dessus de la valve aortique par le jeu d'une valve directionnelle, à la façon de l'Impella™. Il permet d'abaisser sensiblement la pression télé-diastolique du ventricule gauche (PTDVG) et d'en améliorer le débit. D'un diamètre sensiblement identique au BCPIA (21 Fr), il expose au risque d'ischémie du membre et de lésion vasculaire. Son positionnement ventriculaire peut être théoriquement à l'origine de lésions ventriculaires gauche (cordages, valves, perforations...) et de troubles du rythme. Ces systèmes nécessitent une anticoagulation assez importante (TCA à 2 fois le témoin) et exposent aux risques d'hémolyse et de thrombopénie.

Circuits d'oxygénation sans pompe

Dans cette configuration, l'énergie générée par la pompe cardiaque est utilisée comme énergie motrice du circuit et permet la réduction de la longueur des circuits afin d'en améliorer théoriquement la tolérance. Ceci suppose que la fonction cardiaque soit préservée. Le circuit consiste en une dérivation artérioveineuse (fémorofémorale) sur lequel est interposé un oxygénateur (*extra-corporeal lung assist* ou ECLA) [7]. Même si ce système permet une oxygénation et une décarboxylation acceptables, il est peu utilisé en raison de ses performances modestes nécessitant une fonction cardiaque normale voire augmentée artificiellement à l'aide de drogues cardio-actives. Par ailleurs, son implantation nécessite une canule de taille importante à l'origine de complication ischémique du membre inférieur homolatéral en l'absence de reperfusion circulatoire instrumentale.

Conséquences physiopathologiques de l'assistance

La mise en place d'une assistance circulatoire, et tout particulièrement par voie périphérique, a des conséquences non négligeables sur l'hémodynamique intracardiaque. Potentiellement délétère

sur les capacités de récupération de la fonction cardiaque, ces modifications de conditions de charge et de la circulation pulmonaire mais aussi bronchique peuvent être à l'origine d'un œdème pulmonaire qui faudra savoir rechercher, anticiper et traiter. Bien qu'impliquant des mécanismes complexes et partiellement élucidés, les conséquences physiopathologiques des assistances varient selon le site d'implantation des canules et du type de circuit.

Assistance hémodynamique

Assistances centrales

Le terme d'assistance centrale sous-entend l'implantation des canules dans les cavités cardiaques ou dans les gros vaisseaux après ouverture thoracique (Figure 52-3). Elles font appel à une canulation des veines caves ou de l'oreillette droite et une reperfusion avec ou sans oxygénateur dans l'artère pulmonaire (assistance monoventriculaire du ventricule droit), ou obligatoirement avec oxygénateur si la reperfusion se fait dans l'aorte (assistance biventriculaire avec dérivation de la circulation pulmonaire). La canulation de l'oreillette gauche ou plus rarement du ventricule gauche avec une reperfusion dans la racine aortique ou dans l'aorte thoracique descendante avec ou sans oxygénateur assure une assistance monoventriculaire du ventricule gauche. Ce type d'assistance peut se faire par abord veineux mais nécessite alors une septotomie atriale (TandemHeart™ pVAD, Cardiac Assist, Inc). L'ouverture thoracique est ainsi évitée mais cette technique impose une expertise particulière [8]. Ce dernier constitue une assistance hémodynamique stricte sans oxygénateur dont l'indication est la défaillance isolée du ventricule gauche.

La canule de reperfusion du sang oxygéné se faisant au niveau de la racine de l'aorte (par sternotomie) ou dans une artère axillaire (après abord chirurgical et suture d'un tube sur l'artère), le débit sanguin est antérograde et permet une oxygénation optimale des organes et notamment des coronaires et des troncs supra-aortiques.

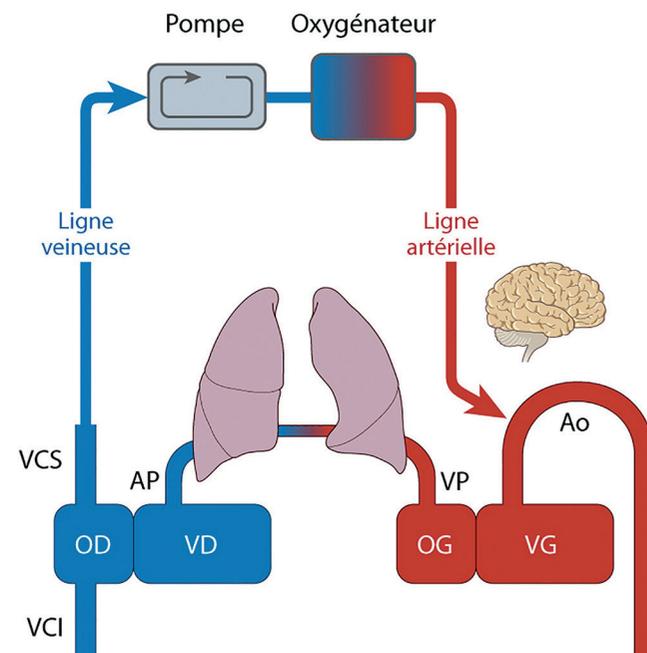


Figure 52-3 Assistance centrale.

Dans cette configuration, aucun conflit de débit entre le cœur et l'assistance n'est à déplorer. Toutefois, une décharge des cavités gauches peut s'avérer nécessaire. Soulignons aussi le risque hémorragique et infectieux de ce type de configuration.

Assistances périphériques

Dans cette configuration, à l'opposé de la précédente, la canule de reperfusion est positionnée dans une artère périphérique (fémorale ou iliaque). On parle alors d'assistance périphérique (Figure 52-4). Le flux sanguin est rétrograde et rentre en compétition directe avec le flux antérograde cardiaque. Cette compétition concerne à la fois les performances hémodynamiques mais aussi d'oxygénation. La modélisation des conséquences hémodynamiques d'une assistance rétrograde est complexe car elle impose d'intégrer plusieurs paramètres : la décharge des cavités droites par l'assistance, le couplage ventriculo-artériel et la modification de shunts physiopathologiques.

DÉCHARGE DES CAVITÉS DROITES PAR L'ASSISTANCE

Malgré la mise en place de canule de drainage et le phénomène aspiratif imposé par la pompe centrifuge, le drainage des cavités droites n'est le plus souvent que partiel et inconstant lors de la mise en place d'une assistance. L'efficacité de la décharge du ventricule droit dépend des caractéristiques anatomiques du patient, du positionnement des canules et de la valeur de la pression veineuse systémique.

COUPLAGE VENTRICULO-AORTIQUE

Afin de mieux appréhender les conséquences du flux aortique rétrograde d'une assistance périphérique face à un flux antérograde cardiaque défaillant, il est important de rappeler la relation

qui existe entre l'élastance ventriculaire et aortique. Le ventricule gauche est une chambre à élastance variable (E_v) que l'on peut définir par la droite passant par les valeurs de pressions télé-systoliques du ventricule gauche sur les courbes pression-volume et qui croise l'axe des abscisses à la valeur V_0 correspondant au volume ventriculaire mort. À l'opposé, l'élastance aortique (E_a) représente la charge hydraulique s'opposant au travail du cœur. Elle représente la relation entre la PTSVG et le volume éjecté (V_{ej}) selon l'équation $E_a = PTSVG / V_{ej}$. Le point de couplage ventriculo-aortique (CVA) optimal entre la fonction ventriculaire et les résistances vasculaires est représenté par l'intersection des deux droites E_a et E_v définissant le V_{ej} optimal à la PTSVG [9] (Figure 52-5). La mise en œuvre d'une assistance rétrograde modifie l'élastance aortique, déplaçant le point de CVA en haut et à droite. Afin de conserver un V_{ej} identique, la boucle PV se déplace dans le même sens avec une augmentation de la consommation en O_2 du myocarde (MVO_2) et de la PTDVG [10]. Si le gradient de pression entre l'artère pulmonaire et l'oreillette gauche augmente de façon dramatique, il se produit un œdème aigu du poumon malgré une assistance circulatoire performante (Figures 52-6).

EXISTENCE DE SHUNTS PATHOLOGIQUES

L'anatomie et les mécanismes de régulation des intrapulmonaires restent mal connus, mais des travaux relativement anciens ont rapporté une augmentation significative de la circulation artérielle bronchique dans des circonstances telles que l'hypoxémie et l'insuffisance cardiaque [11]. On peut alors supposer que la circulation artérielle bronchique participe à la fois à l'oxygénation et à l'équilibre hydrique pulmonaire. L'existence de tels shunts

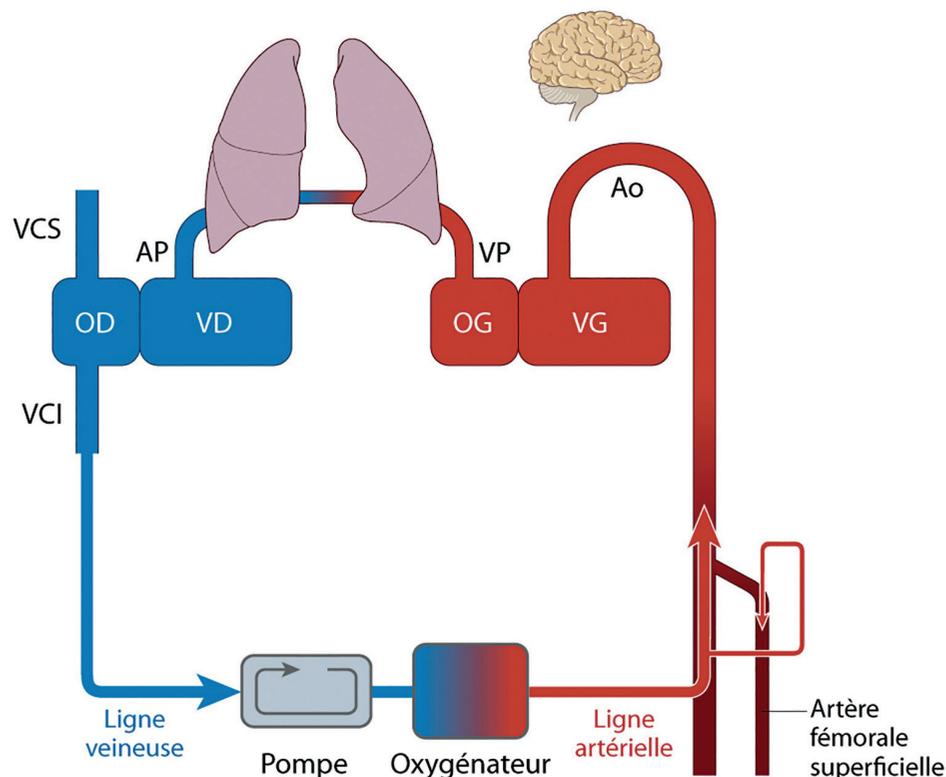


Figure 52-4 Assistance périphérique avec reperfusion de l'artère fémorale superficielle lors d'une assistance rétrograde fémorale.

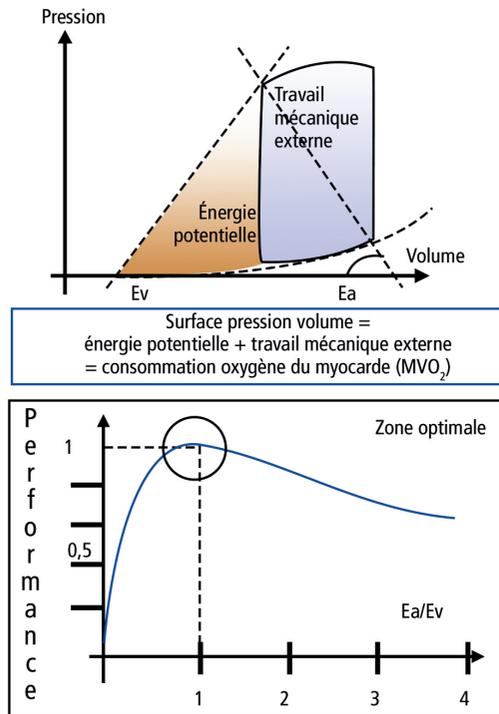


Figure 52-5 Boucle pression volume et ses déterminants. Représentation de la zone de performance optimale du couplage ventriculo-aortique. Ea : élastance aortique ; Ev : élastance ventriculaire.

pourraient être à l'origine d'une augmentation du débit retour veineux pulmonaire. Cette congestion auriculaire pourrait être accentuée par le débit artériel bronchique alimenté par l'assistance rétrograde. Si ce retour participe au développement de la congestion pulmonaire, il conduit, du moins sur le plan théorique, à ré-oxygéner le retour veineux pulmonaire en cas d'hypoxémie associée au choc cardiogénique. Le rôle et la modification de ces shunts lors de la mise en place d'une assistance périphérique sont encore mal connus mais ne doivent pas être sous-estimés.

Assistances combinées

Il est possible, selon les situations, d'adapter les montages non seulement selon l'indication initiale (circulatoire ou respiratoire) mais aussi selon la tolérance ou l'apparition de complications.

Dans le cas où quasiment aucune éjection cardiaque ne se produit, une ECLS rétrograde peut être mise en place. La pulsatilité de la pression artérielle disparaît au profit d'une pression artérielle continue générée par la pompe centrifuge de l'assistance périphérique. Les conséquences physiologiques de la perte de cette pulsatilité sont mal connues. Par analogie, on constate dans le registre INTERMACS des assistances de longue durée, que la mortalité des dispositifs non pulsatiles est plus basse que celle des assistances pulsatiles [12]. Au-delà de cette incertitude sur la perfusion d'organe, la décharge des cavités cardiaques est nécessaire à plus d'un titre. Premièrement, la stase intraventriculaire expose au risque de thromboses intracavitaires ainsi que dans la racine de l'aorte.

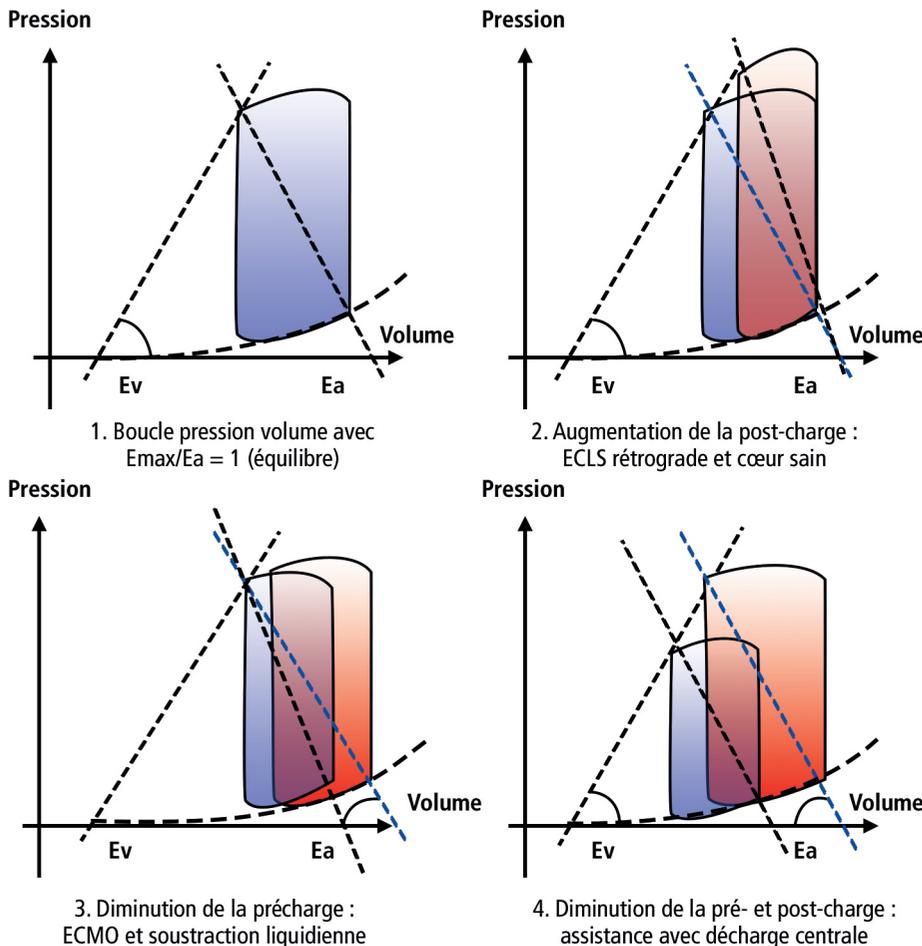


Figure 52-6 Boucles pressions-volumes du ventricule gauche lors de différentes assistances. La boucle bleue représente l'état hémodynamique basal avant assistance.

L'ostium des coronaires peut alors être concerné par un thrombus ce qui peut compromettre une récupération myocardique. Le niveau de l'anticoagulation doit alors être relevé exposant aux complications hémorragiques. Deuxièmement, la dilatation des cavités cardiaques est à l'origine des modifications neuro-humorales responsables de la pérennisation de l'insuffisance cardiaque et empêche le remodelage bénéfique que l'on observe classiquement sous assistance de longue durée. Enfin, une surcharge ventriculaire est accentuée par le retour bronchique et peut être à l'origine d'un œdème pulmonaire hydrostatique. La décongestion des cavités cardiaques est donc nécessaire en recherchant le niveau d'assistance optimal. Un recours à un support inotrope médicamenteux peut s'avérer efficace mais expose au risque de troubles du rythme cardiaque et peut avoir des conséquences sur les capacités de récupération de la fonction myocardique. Après un choc cardiogénique ischémique, la décharge systématique du ventricule pourrait favoriser un meilleur remodelage myocardique [13, 14]. La décharge peut être centrale et être disposée dans l'oreillette gauche, la veine pulmonaire ou encore la pointe du ventricule gauche (Figure 52-7). Toutefois, il s'agit d'une stratégie invasive potentiellement hémorragique qui justifie de privilégier la décharge périphérique (Impella™ 2,5 et 5 ou encore le BCPIA).

ECLS PÉRIPHÉRIQUE ET IMPELLA™

Cette association permet indiscutablement d'abaisser les pressions intraventriculaires gauche (Figure 52-8) [15]. Un débit de 2,5 L/min s'avère suffisante pour assurer une décharge ventriculaire gauche et privilégier la perfusion coronaire. Sur le plan physiologique, il doit se produire un équilibre entre la diminution de l'élastance ventriculaire en relation avec la baisse des pressions de remplissage ventriculaire d'une part et l'augmentation de l'élastance aortique en relation avec l'augmentation de la perfusion

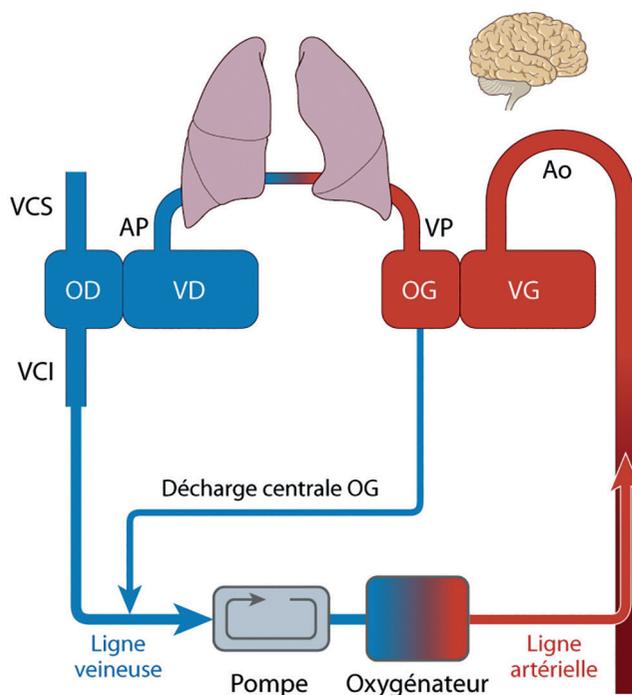


Figure 52-7 Assistance périphérique avec décharge centrale de l'oreillette gauche.

aortique d'autre part. Il est important de souligner que, bien que cette stratégie permette la décharge ventriculaire, elle ne traitera pas l'hypoxémie engendrée par l'œdème pulmonaire. Ainsi, quand la dysfonction cardiaque est associée à une importante altération des échanges gazeux pulmonaires (comme après un œdème aigu du poumon), le sang qui atteint le ventricule gauche est très hypoxémique et compromet l'oxygénation des coronaires et du cerveau. Des stratégies pour améliorer la qualité de la perfusion cérébrale et coronaire par du sang hypoxémique sont nécessaires et décrites plus loin.

ECLS PÉRIPHÉRIQUE ET BCPIA

L'axe controlatéral fémoral à l'ECLS périphérique peut être utilisé pour associer un BCPIA à l'assistance [10, 16]. La diminution de l'élastance aortique permet d'améliorer le travail systolique du ventricule gauche (voir Figure 52-6) [9]. L'effet d'augmentation diastolique privilégie la perfusion coronaire et améliore le débit sanguin cérébral. Toutefois, l'amélioration de l'éjection ventriculaire d'un sang hypoxémique expose aux mêmes risques d'ischémie myocardique ou cérébrale en cas de lésions pulmonaires majeures. Il est aussi intéressant de noter que l'inflation du ballon interrompt le débit de l'ECLS rétrograde pendant la diastole. Il y a donc un rétablissement d'une pulsatilité mais qui reste loin des caractéristiques physiologiques. De plus, le ballon est situé à un emplacement théorique proche des artères bronchiques et intercostales, et le rôle de l'inflation du ballon à ce niveau reste à définir.

Toutes les combinaisons sont envisageables si elles respectent la logique et la physiologie. À ce titre, l'Impella™ et le BCPIA ont été associées afin de restaurer une pulsatilité et améliorer de façon synergique le bénéfice de chaque type d'assistance [17].

Assistances circulatoire et respiratoire

Les objectifs thérapeutiques des assistances respiratoires sont de deux ordres : l'oxygénation et la décarboxylation. Il existe une relation étroite entre le CO₂ et l'O₂ selon l'effet de Bohr et la carboxy-hémoglobine (l'hypercapnie conduisant à une diminution de l'oxy-hémoglobine avec un déplacement vers la droite de la courbe de dissociation de l'hémoglobine). La correction d'une hypoxémie

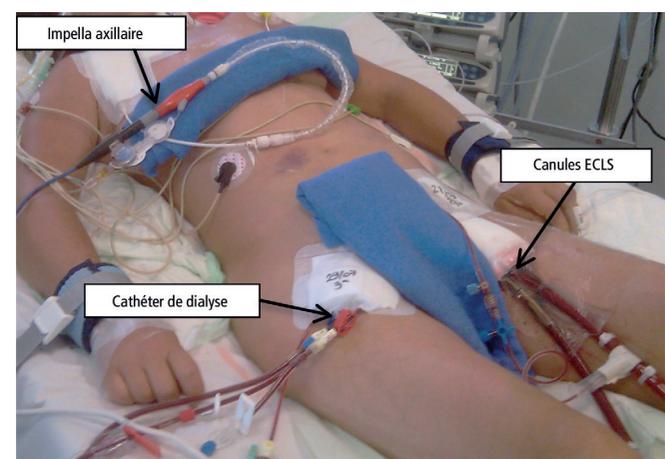


Figure 52-8 Association d'une Impella™ 5 avec une ECLS fémorale.

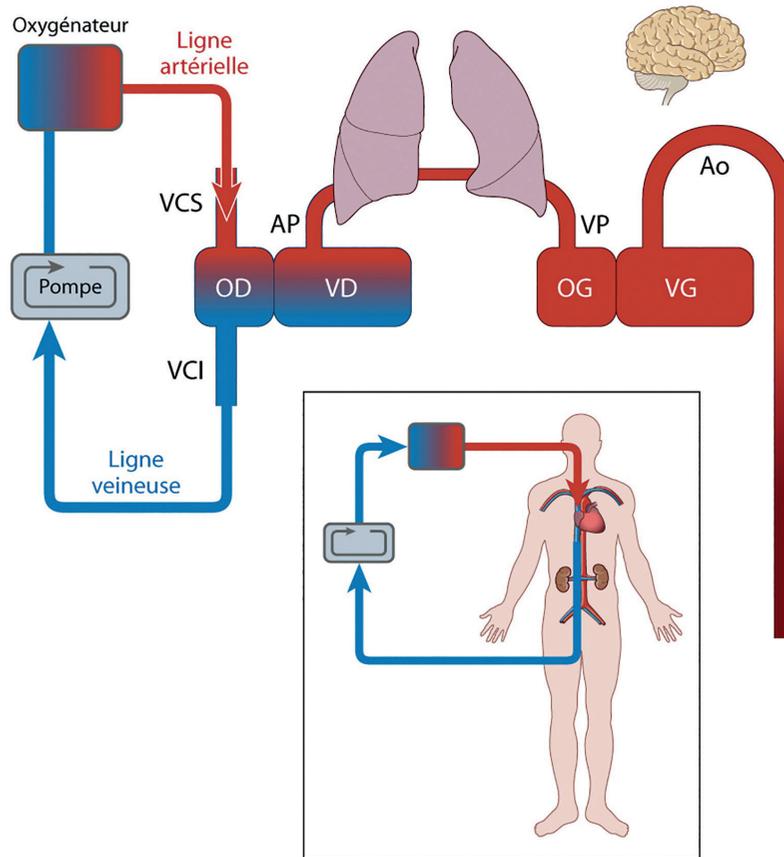


Figure 52-9 ECMO périphérique.

Il passe logiquement par la correction de l'hypercapnie. D'autre part, la correction de l'hypercapnie sera plus simple que celle de l'hypoxémie en relation avec une diffusibilité jusqu'à 25 fois plus importante du CO_2 au travers des membranes. Enfin, l'extraction en oxygène n'est pas un facteur limité sous circulation extracorporelle à la différence de ce que l'on peut observer lors d'une pathologie telle qu'un choc septique. En effet, le transport en oxygène (TaO_2) est fonction du débit cardiaque (DC) et de la différence entre le contenu artériel (CaO_2) et veineux (CvO_2) en oxygène (DAVO_2). La relation entre TaO_2 et la consommation en oxygène (VO_2) permet de définir la valeur de la SvO_2 critique ($\text{SvO}_{2\text{crit}}$), valeur en dessous de laquelle toute diminution du transport en oxygène ne peut pas être compensée par une augmentation d'extraction d'oxygène. En circulation extracorporelle, le débit circulatoire n'étant pas influencé par l'hypoxémie, la $\text{SvO}_{2\text{crit}}$ est atteinte pour des valeurs de TaO_2 plus basses. Ces propriétés expliquent l'efficacité des assistances extracorporelles « respiratoires » (ECMO).

Il existe donc deux types d'ECMO selon le site de reperfusion du sang provenant de l'assistance.

Assistance veineuse

Le sang est prélevé par l'intermédiaire d'une canule veineuse (la plupart du temps dans la veine cave inférieure), propulsé au travers de l'oxygénateur par la pompe, et reperfusé par une canule dans une veine de gros calibre à distance de la canule d'aspiration (généralement dans la veine cave supérieure, Figure 52-9).

Pendant le fonctionnement d'une ECMO, le sang qui pénètre dans le ventricule droit est un mélange mal connu du sang oxygéné et décarboxylé de l'assistance mais aussi du sang désaturé et riche en CO_2 provenant de la veine cave inférieure (et notamment de celui des veines sus hépatiques), de la veine cave supérieure et du sinus coronaire. Pour ajouter à la confusion, une recirculation entre les canules des veines caves inférieure et supérieure se produit de façon variable selon les mouvements respiratoires et les conditions de charge (Figure 52-10). Le sang provenant du ventricule droit passe au travers des capillaires pulmonaires uniquement selon la performance des ventricules, avec un échange gazeux variable selon l'état des poumons. Dans le cas d'un SDRA, il n'y aura quasiment pas de modification de la composition en O_2 ou CO_2 , si ce n'est que le mélange avec le sang des shunts bronchiques. Ce type d'assistance permet d'éviter l'ischémie pulmonaire, rétablit la vasoreactivité artériolaire pulmonaire (par normalisation du pH sanguin), améliore le plus souvent la fonction cardiaque en augmentant l'oxygénation coronaire et en réduisant la post-charge au ventricule droit, et évite l'hypoxémie cérébrale. En revanche, l'apport du sang oxygéné aux organes reste dépendant de la fonction cardiaque expliquant que ce type d'assistance ne peut être réservé qu'aux détresses respiratoires graves et isolées sans défaillance des ventricules gauche ou droit.

Il est à noter que la reperfusion du sang de l'assistance peut aussi se faire directement dans l'artère pulmonaire (le plus souvent par abord chirurgical ou par une canule disposée de façon

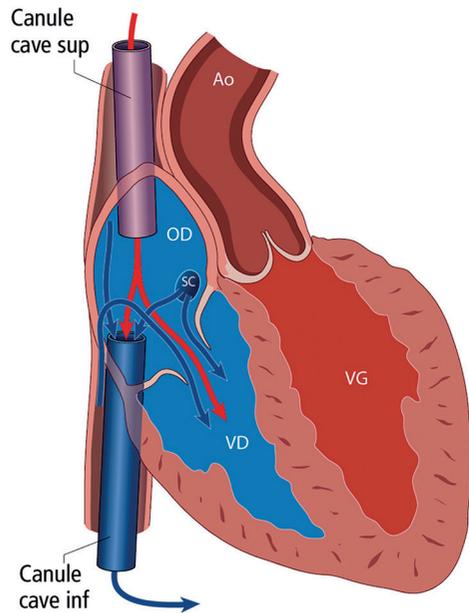


Figure 52-10 Représentation schématique du mélange artérioveineux dans l'oreillette droite lors d'une ECMO. SC : sinus coronaire.

percutanée à la façon d'un cathéter de Swan-Ganz [18]). Si cette technique à l'avantage de délivrer un contenu sanguin précis tout en suppléant à une dysfonction du ventricule droit, elle expose à des lésions d'hyper-débit pulmonaire pouvant aggraver la pathologie et nécessitant un monitoring délicat. Enfin, le prélèvement et la reperfusion de l'assistance veineuse peuvent se faire

par l'intermédiaire d'une canule coaxiale unique implantée en cave supérieure avec une extrémité placée dans la veine cave inférieure (Figure 52-11). Elle présente l'avantage de ne mobiliser qu'un seul site vasculaire [19]. L'aspiration du sang se fait dans les veines caves inférieure et supérieure tandis que la reperfusion du sang oxygéné se fait dans l'oreillette droite. Il est important de noter que si la taille de la canule correspond à celle des veines caves, il se produit un isolement d'alimentation vasculaire du ventricule droit. Dans ce cas un débit trop important de l'ECMO peut conduire au risque de surcharge barométrique d'un ventricule droit défaillant et d'autant que sa post-charge est élevée. Un monitoring précis et répété est alors indispensable.

Assistance artérioveineuse

Elle reprend les caractéristiques et les principes de l'assistance artérioveineuse hémodynamique et ne se conçoit que s'il existe une dysfonction cardiaque associée à l'hypoxémie. L'oxygénation est la plupart du temps suffisante y compris en cas de défaillance cardiaque. En revanche, si la fonction cardiaque est conservée et associée à une défaillance respiratoire, ce type d'assistance expose comme précédemment mentionné, au risque d'hypoxémie cérébrale et coronaire.

Assistances « hybrides »

Les principes des différentes assistances décrits précédemment doivent être mûrement discutés en fonction des situations et ce d'autant qu'un certain nombre de contre-indications existent : les accès vasculaires incertains, l'anticoagulation impossible, le risque hémorragique important, l'incertitude sur le pronostic neurologique, etc. L'évolution de la pathologie peut aussi être rapide et transformer une assistance d'indication initiale respiratoire en

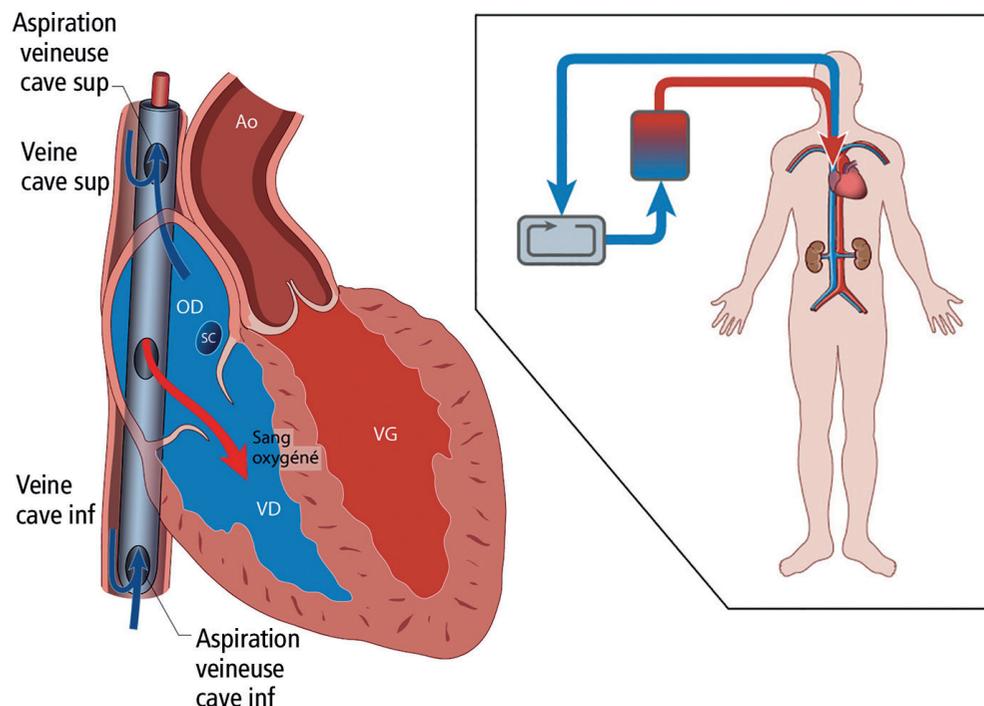


Figure 52-11 Assistance hybride.

assistance d'indication mixte cardiorespiratoire. De nombreuses solutions sont possibles et certaines équipes n'hésitent pas à cumuler les assistances [17, 19]. Mais afin de ne pas cumuler les risques d'association de plusieurs assistances, il est possible de « greffer » une reperfusion veineuse sur une ECLS périphérique (oxygénation et décarboxylation « précardiaques ») ou à l'opposé une reperfusion artérielle dans l'artère axillaire ou fémorale sur une ECMO. Cette situation « hybride » est simple à mettre en œuvre, permettant le plus souvent une amélioration clinique rapide (Figure 52-12). Pour autant, elle nécessite une évaluation précise des conditions d'implantation et un monitoring régulier des différents débits dans les circuits. Le principe initial repose sur le fait que le débit de la pompe est réparti à moitié dans la circulation artérielle et à moitié dans la circulation veineuse à condition que les longueurs et les diamètres des lignes (y compris des canules) et les conditions de post-charge soient comparables. Dans la pratique, ces conditions ne sont jamais remplies et une évaluation subtile des débits et pressions est nécessaire.

Indications et contre-indications

Indications

La mise en œuvre de ces types d'assistances n'est pas anodine pouvant conduire à des complications plus sévères que la pathologie initiale expliquant l'absence de bénéfice évident sur la mortalité dans certaines études. C'est pourquoi les stratégies sont variables selon les indications (Figure 52-13).

Assistance respiratoire

Les groupes d'expert (Réseau de recherche en ventilation artificielle) [20] ont émis des recommandations suite à l'épidémie du virus H1N1 [21]. Ils ont précisé que le recours à l'ECMO ne devait se faire que chez les patients échappant au traitement médical optimisé :

- une hypoxémie réfractaire définie par un rapport $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ inférieur à 50 persistant malgré une FiO_2 supérieure à 80 %, une $\text{PEP}_{\text{totale}} (\leq 20 \text{ cmH}_2\text{O})$ telle que la pression de plateau soit égale à $32 \text{ cmH}_2\text{O}$, le décubitus ventral associé ou non au NO inhalé ;
- une pression de plateau élevée ($\geq 35 \text{ cm}_2\text{O}$) malgré une PEP réduite à $5 \text{ cmH}_2\text{O}$ et un VT réduit à sa valeur minimale ($\geq 4 \text{ mL/kg PP}$) compatible avec un pH supérieur ou égal à 7,15.

Ces recommandations considèrent une absence de défaillance cardiaque bien que le ventricule droit soit souvent difficile à évaluer dans le contexte du cœur pulmonaire aigu secondaire au SDRA et bien souvent réversible par l'amélioration des conditions d'oxygénation et de ventilation alvéolaire par l'ECMO. Il est clair qu'une ECMO ne peut être proposée si une défaillance ventriculaire gauche sévère est associée. On lui préférera une ECLS dans l'urgence avec un monitoring précis de la qualité du sang allant vers les troncs supra aortiques et au moindre doute la réalisation d'une assistance « hybride ». Le bon respect de ces recommandations explique probablement la variabilité du pronostic des assistances dans ces indications [22, 23].

Assistance hémodynamique

Les stratégies sont moins bien précisées car les situations sont souvent très différentes. Des recommandations pour la mise en place d'une assistance circulatoire sont disponibles dans un contexte d'arrêt cardiocirculatoire [24] ou d'intoxication médicamenteuse aux cardiotropes [25], mais le degré d'urgence reste le premier niveau dans la stratégie.

Chez un patient présentant un arrêt cardiaque ou un choc cardiogénique réfractaire et sans contre-indication à la mise en assistance, il sera toujours proposé une assistance périphérique rétrograde le plus souvent percutanée avec reperfusion de membre en un temps. Cette assistance pourra permettre une hypothermie thérapeutique dans le cas d'un arrêt cardiaque secondaire à un trouble du rythme [26]. Au cours du choc cardiogénique réfractaire, la mise en assistance doit être envisagée avant l'apparition du syndrome de défaillance multiviscérale (SDMV). La définition

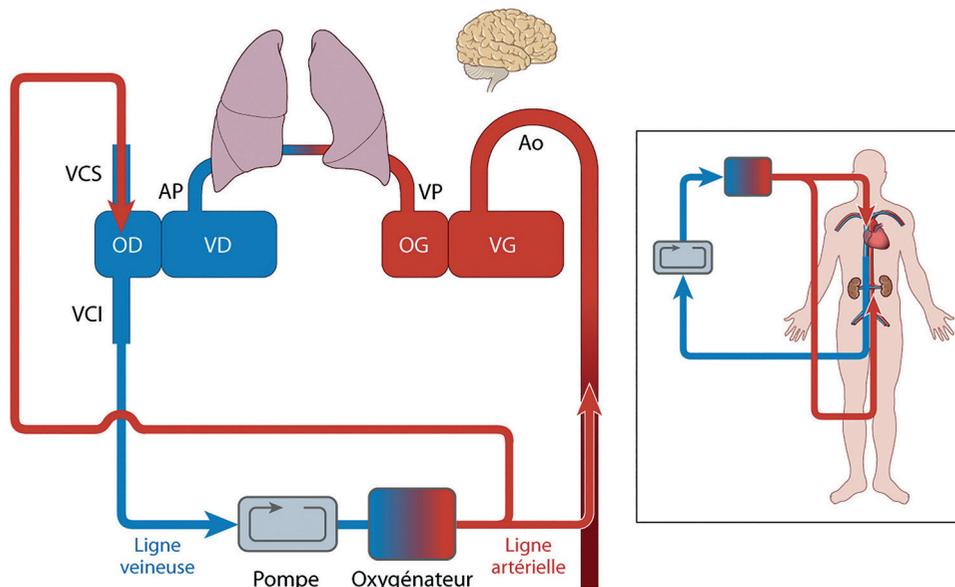


Figure 52-12 Assistance composite. Notez que le circuit expose au risque de shunt gauche → droit si l'énergie cinétique de l'assistance est trop faible.

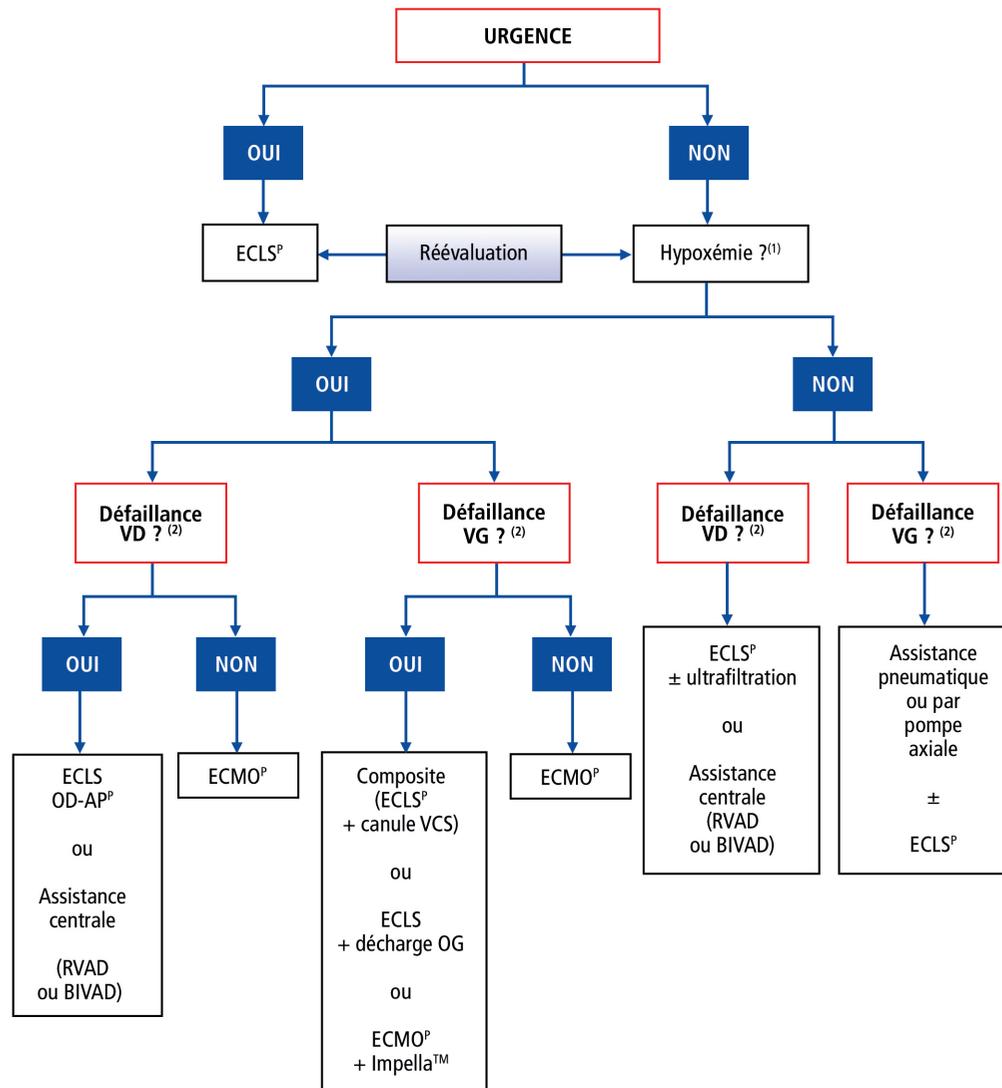


Figure 52-13 Exemple de stratégies d'assistance selon le niveau de défaillance.

(1) L'hypoxémie est définie selon les critères du REVA.

(2) La défaillance ventriculaire est responsable d'un choc cardiogénique réfractaire. Dans le cas d'une dysfonction biventriculaire, la stratégie priorisera l'oxygénation puis la dysfonction VG. L'assistance centrale court-circuite le cœur et les poumons et peut être proposée dans toutes les situations. P : assistance périphérique.

du SDM_V n'étant pas univoque, un faisceau d'arguments clinico-biologiques est souvent nécessaire (Tableau 52-II).

Si le choc cardiogénique est en relation avec une défaillance isolée et brutale du ventricule droit (le plus souvent ischémique, sans hypoxémie et sans HTAP) une assistance périphérique percutanée est possible en association avec une soustraction liquidienne vasculaire (diurétiques, ultra ou hémofiltration).

Tableau 52-II Éléments biologiques proposés pour contre-indiquer la mise en assistance [27].

SpVO ₂ ≤ 8 % (saturation en oxygène du sang veineux mêlé)
Lactatémie ≥ 21 mmol/L
Taux de prothrombine ≤ 11 %
Fibrinogène ≤ 0,8 g/L

Dans le cas d'un choc cardiogénique par atteinte du ventricule gauche, une assistance périphérique artérioveineuse peut suffire en l'absence d'hypoxémie. Une décharge ventriculaire centrale ou combinée (ImpellaTM ou BCPIA) est indiquée si le patient présente des signes de congestion pulmonaire sans hypoxémie d'autant que la fonction ventriculaire droite est préservée. En cas d'hypoxémie, une oxygénation précordiale par reperfusion dans le système cave supérieur ou artérielle par perfusion axillaire est indiquée.

Contre-indications

Les contre-indications sont la plupart du temps relatives et le plus souvent soumises à une discussion éthique concernant le pronostic vital du patient à court terme (< 1 an). Les limitations techniques sont principalement les seules situations où cette discussion éthique n'intervient pas. Elles concernent le diamètre et la qualité des axes

vasculaires ainsi que leur gestion notamment chez le patient obèse (BMI > 40 kg/m²). L'existence d'un syndrome de défaillance multiviscérale avancé et une insuffisance aortique constituent souvent une contre-indication aux assistances « périphériques ».

Dans les autres circonstances, il s'agit de contre-indications nécessitant une concertation [27] :

- comorbidité sévère engageant le pronostic vital dans les 5 ans ;
- défaillance multiviscérale attestée par un IGS II supérieur à 90 et/ou un score SOFA supérieur à 15.

La mise en place d'une assistance malgré la constatation d'un coma non médicamenteux dans les suites d'un arrêt cardiaque, par exemple, permet à la fois une évaluation du pronostic neurologique mais aussi d'envisager le prélèvement d'organe à cœur arrêté ou chez un patient en état de mort encéphalique [28].

Il faudra intégrer dans la stratégie les contre-indications absolues ou relatives des autres assistances éventuellement associées. L'Impella™ et la pompe de contre-pulsion ont comme contre-indications communes l'absence d'abord vasculaires de bonne qualité et une anticoagulation impossible. L'absence de possibilité de franchissement de la valve aortique est une contre-indication spécifique à l'Impella™ tandis que l'insuffisance aortique est à évaluer en fonction de son importance dans tous les cas.

Surveillance

Quelles que soient les situations, un monitoring précis est indispensable. Il est multimodal et multidisciplinaire. Comme lors de sa mise en place, la surveillance d'un tel dispositif requiert une expertise dans le domaine de la perfusion.

De la mise en place

Si l'accès au bloc opératoire est possible, elle reste à privilégier. La mise en place des canules nécessite une évaluation des conditions cardiocirculatoires et vasculaires. Dans ce contexte, les techniques ultrasoniques sont d'une aide certaine. Elles permettent de préciser le diamètre (écho 2D) et la vacuité des axes vasculaires concernés (écho-Doppler). Le Doppler vasculaire visualise la qualité des flux sanguins et localise les axes vasculaires. La confirmation du placement des guides métalliques dans la lumière vasculaire lors du cathétérisme percutané évite les complications classiques de dissection ou d'hématomes notamment lors de la ponction des vaisseaux fémoraux. L'échographie transœsophagienne est souvent nécessaire pour préciser la fonction cardiaque afin de confirmer l'indication du type d'assistance. Elle précise également le bon placement du guide métallique dans l'oreillette droite puis secondairement le bon placement des canules veineuses. Dans le cas d'une ECMO, elle évite l'affrontement des canules caves supérieures et inférieures en précisant par le Doppler la direction des flux. Enfin, dans certaines circonstances, l'artériographie peut s'avérer utile pour vérifier le bon positionnement des canules artérielles.

Tolérance et complications

Tolérance initiale

Les conséquences après la mise en fonctionnement d'une assistance sont variables en fonction des circonstances. La composition du

liquide d'amorçage du circuit (appelé *priming*) est à adapter afin de prévenir les conséquences d'une perfusion brutale d'un soluté à la température de la pièce, d'une composition et d'un pH non adaptés et de basse viscosité. Ce priming pourra être composé de produit sanguin afin de ne pas entraîner une hémodilution trop importante. Le départ d'une ECMO à priming cristalloïde se traduit souvent par une chute de pression artérielle qui peut nécessiter une augmentation transitoire des vasopresseurs. Mais la rapide normalisation du pH et des échanges gazeux permet souvent, dans un deuxième temps, un sevrage quasi complet des vasopresseurs et la mise en ventilation protectrice. L'analyse échographique transœsophagienne évalue la tolérance initiale et notamment du cœur droit, ainsi que l'absence de recirculation entre les canules.

Dans le cas d'une assistance hémodynamique périphérique, l'évaluation par ETO atteste de la qualité de la décharge cardiaque droite et de l'absence de congestion cardiaque gauche (notamment l'absence de majoration d'une insuffisance mitrale et la persistance d'une éjection ventriculaire gauche).

Complications

La mise en place d'une circulation extracorporelle est une circonstance extraordinaire à l'origine de complications variées et parfois imprévisibles. La multiplication des systèmes de surveillance peut aider à les anticiper. Cette surveillance concerne à la fois le circuit extracorporel et le patient (Tableau 52-III).

- **Surveillance du circuit** : il nécessite une surveillance visuelle attentive de la surface des matériaux (inspection) à la recherche de dépôts de fibrine ou de caillot afin d'adapter l'anticoagulation. Outre les tests de coagulation classiques quotidiens, il peut être fait une analyse délocalisée par ACT du niveau d'anticoagulation dont le seuil varie selon les dispositifs. La thrombo-élastographie peut être utile dans certains cas de façon itérative [29]. La mesure des pressions est indispensable dans différents compartiments du circuit (pré- et postoxygénateur) permettant la mesure quotidienne de la qualité des échanges gazeux de l'oxygénateur. La mesure du gradient de pression transmembranaire de l'oxygénateur sera à adapter selon le type d'oxygénateur. Enfin, outre les mesures affichées par la console de débit et de vitesse de rotation de la pompe, une mesure des débits des lignes est parfois indispensable notamment dans le cas des assistances « hybrides ».

- **Surveillance du patient** : elle fait appel bien entendu à la surveillance clinique mais recherche plus particulièrement les indicateurs de la qualité de la perfusion périphérique et de tolérance cardiaque. L'échographie transœsophagienne a une place primordiale pour l'analyse de la cinétique cardiaque bien qu'aucun indice ne soit formellement validé sur un cœur assisté et déchargé. En outre, sa répétition peut être à l'origine de complications locales. La qualité de la perfusion peut être appréhendée par cathétérisme droit de Swan-Ganz avec monitoring continu de la SvO₂ souvent à 100 % lors d'une ECMO mais très informative en cas d'anomalie sur le positionnement des canules ou de dysfonctionnement de l'assistance et pour son sevrage. Elle renseigne sur le gradient transpulmonaire et la congestion pulmonaire lors d'une ECLS rétrograde.

La qualité de la perfusion cérébrale peut faire appel à un Doppler transcrânien [30] ou à la saturométrie cérébrale [31]. L'analyse gazométrique du sang provenant d'un cathéter radial droit informera précisément sur la qualité de l'oxygénation du sang dans le tronc artériel brachio-céphalique.

La perfusion du membre homolatéral à une assistance peut être compromise et la surveillance de la qualité de sa perfusion peut

Tableau 52-III Exemples de complications et de monitoring permettant leur identification précoce.

ECMO		ECLS périphérique	
Complication	Monitoring	Complication	Monitoring
Surcharge VD	ETO, Swan-Ganz, pression veineuse centrale (PVC)	Surcharge du VG	ETO, Swan-Ganz
Recirculation	Inspection des canules, analyse de l'oxymétrie pré- et postoxygénateur	Stase intracardiaque	ETO
Thrombose de filtre	Inspection, analyse de l'oxymétrie et des pressions pré- et postoxygénateur, ACT	Thrombose d'une ligne de décharge	Inspection, débitmètre sur la ligne, ACT
Hypovolémie	ETO, PVC, pressions pré- et postoxygénateur	Hypoxémie cérébrale ou coronaire	Clinique, gazométrie radiale, NIRS
		Ischémie de membre	Clinique, NIRS
		Ouverture d'un FOP	ETO

faire appel au Doppler vasculaire ou à la saturométrie transcutanée [32] (la pulsatilité ayant logiquement disparue). Une reperfusion systématique de l'artère fémorale superficielle est d'ailleurs souvent faite d'emblée en « Y » sur la canule de reperfusion artérielle (voir Figure 52-4).

La surveillance biologique est également essentielle et concerne de façon répétée et au mieux délocalisée au lit du patient l'analyse gazométrique du sang artériel et veineux, la lactatémie ou encore l'anticoagulation par ACT ou thrombo-élastographie. Une analyse quotidienne des fonctions hépatiques ou rénales est également souhaitable. La mesure du taux d'hémoglobine libre anormalement élevé est évocateur d'une hémolyse et peut justifier de changer le circuit de l'assistance.

Critères de sevrage

ECMO

La réduction du débit de pompe sans modification de la concentration et du débit de gaz dans l'oxygénateur est possible. Elle conduit à diminuer l'apport en oxygène mais la diminution du débit sanguin au travers de l'oxygénateur entraîne progressivement une réduction de l'homogénéité de la répartition des échanges au travers du filtre. Il se produit des trajets sanguins préférentiels avec thromboses et diminution de la performance des oxygénateurs. Cette attitude devrait conduire à augmenter l'anticoagulation souvent non souhaitable. Ainsi, il n'est pas recommandé de diminuer le débit de pompe d'assistance en dessous de 1 L/min.

La réduction de la concentration d'oxygène dans l'oxygénateur est également possible conduisant aussi à diminuer l'apport en oxygène tandis que la diminution du débit de gaz frais diminue l'épuration en CO₂ (à l'image d'un respirateur conventionnel). En pratique, une réduction du débit sanguin puis du débit de gaz frais et de la concentration en oxygène se fait successivement afin d'évaluer les capacités d'oxygénation et de décarboxylation du patient de façon séparée. Le contrôle gazométrique artériel du patient après reprise d'une ventilation normale permet d'attester le succès du sevrage. Il est recommandé de réaliser l'ablation des canules dans un contexte chirurgical permettant une vérification minutieuse des lésions vasculaires éventuelles pouvant avoir été occasionnées lors de la pose, d'autant plus que celle-ci a été effectuée en urgence.

ECLS

Le principe de sevrage de l'ECLS est le même que dans le cas d'une ECMO mais son évaluation nécessite, outre les capacités d'oxygénation et de décarboxylation, une évaluation hémodynamique notamment échographique. Elle recherche les indices évoquant une augmentation de remplissage pathologique des cavités cardiaques ou l'apparition d'une valvulopathie. L'analyse de la SvO₂ permet de renseigner sur la tolérance tout au long de la période de sevrage qui doit être selon les cas la plus courte possible. L'ablation des canules se fera la plupart du temps lors d'un geste chirurgical avec réparation des vaisseaux.

La séquence de sevrage et d'ablation des assistances combinées est à analyser selon les situations et la tolérance : l'assistance à retirer en priorité est bien évidemment celle nécessitant le plus de précautions ou à l'origine des complications les plus graves. Ainsi, lors de la combinaison d'une ECLS avec Impella™, le retrait de l'ECLS se fera en premier tandis qu'en cas d'hypoxémie sans défaillance cardiaque on préférera laisser l'ECLS permettant une oxygénation.

Conclusion

La mise en place d'une assistance de courte durée a pour but de restaurer une homéostasie chez le patient dont l'état est précaire et de diminuer les conséquences de l'état de choc en restaurant une perfusion et une oxygénation des organes périphériques. Cette mise en condition est propice à la récupération de la fonction cardiaque et/ou respiratoire tout en permettant d'établir une stratégie thérapeutique à long terme en cas de besoin.

Les stratégies permettant de poser l'indication de la mise en place d'une assistance voire de leur combinaison sont assez bien identifiées pour un patient présentant une détresse respiratoire non cardiogénique. En revanche, celles concernant un choc cardiogénique avec ou sans hypoxémie sont plus délicates et nécessitent une mûre réflexion qui doit être volontiers multidisciplinaire. Quoi qu'il en soit, la décision du moment de sa mise en place reste difficile à appréhender et doit certainement être prise avant l'apparition du syndrome de défaillance multiviscérale irréversible. Il est important de bien identifier les quelques contre-indications notamment techniques de la mise en place des assistances circulatoires. L'échec du sevrage des assistances

conduit à orienter le patient vers des structures spécialisées en transplantation ou en assistances de longue durée.

Les progrès techniques des différentes assistances tendent à simplifier leur mise en place et permet leur utilisation au-delà des réanimations spécialisées de chirurgie cardiaque. Néanmoins, le terme « simplification » ne doit pas être confondu par nos lecteurs avec « banalisation » car la prise en charge de ces patients relève d'une haute technicité faisant appel à des compétences le plus souvent multidisciplinaire : réanimateur, chirurgien, cardiologue, perfusionniste et hématologiste.

BIBLIOGRAPHIE

- Hill JD, O'Brien TG, Murray JJ, Dontigny L, Bramson ML, Osborn JJ, Gerbode F. Prolonged extracorporeal oxygenation for acute post-traumatic respiratory failure (shock-lung syndrome). Use of the Bramson membrane lung. *N Engl J Med*. 1972;286: 629-34.
- Zapol WM, Snider MT, Hill JD, Fallat RJ, Bartlett RH, Edmunds LH, et al. Extracorporeal membrane oxygenation in severe acute respiratory failure. A randomized prospective study. *JAMA*. 1979;242:2193-6.
- Gattinoni L, Pesenti A, Mascheroni D, Marcolin R, Fumagalli R, Rossi F, et al. Low-frequency positive-pressure ventilation with extracorporeal CO₂ removal in severe acute respiratory failure. *JAMA*. 1986;256:881-6.
- Conrad SA, Rycus PT, Dalton H. Extracorporeal life support registry report 2004. *ASAIO J*. 2005;51:4-10.
- Groom RC, Froebe S, Martin J, Manfra MJ, Cormack JE, Morse C, et al. Update on pediatric perfusion practice in North America: 2005 survey. *J Extra Corpor Technol*. 2005;37:343-50.
- Kim JT, Lee JR, Kim JK, Yoon SZ, Jeon Y, Bahk JH, et al. The carina as a useful radiographic landmark for positioning the intra-aortic balloon pump. *Anesth Analg*. 2007;105:735-8.
- Walles T. Clinical experience with the iLA Membrane Ventilator pumpless extracorporeal lung-assist device. *Expert Rev Med Devices*. 2007;4:297-305.
- Neuzil P, Kmonicek P, Skoda J, Reddy VY. Temporary (short-term) percutaneous left ventricular assist device (Tandem Heart) in a patient with STEMI, multivessel coronary artery disease, cardiogenic shock and severe peripheral artery disease. *Acute Card Care*. 2009;11:146-50.
- Kawaguchi O, Pae WE, Daily BB, Pierce WS. Ventriculoarterial coupling with intra-aortic balloon pump in acute ischemic heart failure. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 1999;117:164-71.
- Sauren LD, Reesink KD, Selder JL, Beghi C, van der Veen FH, Maessen JG. The acute effect of intra-aortic balloon counterpulsation during extracorporeal life support: an experimental study. *Artif Organs*. 2007;31:31-8.
- Camari E, Marini G. La circulation bronchique à l'état normal et pathologique. Paris: Doin, Deren et C^{ic}; 1965.
- Kirklin JK, Naftel DC, Kormos RL, Stevenson LW, Pagani FD, Miller MA, et al. Third INTERMACS annual report: the evolution of destination therapy in the United States. *J Heart Lung Transplant*. 2011;30:115-23.
- Drakos SG, Kfoury AG, Selzman CH, Verma DR, Nanas JN, Li DY, et al. Left ventricular assist device unloading effects on myocardial structure and function: current status of the field and call for action. *Curr Opin Cardiol*. 2011;26:245-55.
- Soppa GK, Barton PJ, Terracciano CM, Yacoub MH. Left ventricular assist device-induced molecular changes in the failing myocardium. *Curr Opin Cardiol*. 2008;23:206-18.
- Vlasselaers D, Desmet M, Desmet L, Meyns B, Dens J. Ventricular unloading with a miniature axial flow pump in combination with extracorporeal membrane oxygenation. *Intensive Care Med*. 2006;32:329-33.
- Lim CH, Son HS, Baek KJ, Lee JJ, Ahn CB, Moon KC, et al. Comparison of coronary artery blood flow and hemodynamic energy in a pulsatile pump versus a combined nonpulsatile pump and an intra-aortic balloon pump. *ASAIO J*. 2006;52:595-7.
- Sauren LD, Accord RE, Hamzeh K, de Jong M, van der Nagel T, van der Veen FH, et al. Combined Impella™ and intra-aortic balloon pump support to improve both ventricular unloading and coronary blood flow for myocardial recovery: an experimental study. *Artif Organs*. 2007;31:839-42.
- Takayama H, Naka Y, Kodali SK, Vincent JA, Addonizio LJ, Jorde UP, et al. A novel approach to percutaneous right-ventricular mechanical support. *Eur J Cardiothorac Surg*. 2011.
- Bacchetta M, Javidfar J, Sonett J, Kim H, Zwischenberger J, Wang D. Ease of conversion from venovenous extracorporeal membrane oxygenation to cardiopulmonary bypass and venoarterial extracorporeal membrane oxygenation with a bicaval dual lumen catheter. *ASAIO J*. 2011;57:283-5.
- Réseau de recherche en ventilation artificielle. Recommandations pour l'assistance respiratoire des patients atteints de SDRA lié à la grippe A. [En ligne]. Disponible sur: [http://www.srlf.org/Data/upload/file/Grippe %20A/reco %20REVA %20SDRA-H1N1.pdf](http://www.srlf.org/Data/upload/file/Grippe%20A/reco%20REVA%20SDRA-H1N1.pdf) (dernier accès le 1 septembre 2011)
- Jaber S, Conseil M, Coisel Y, Jung B, Chanques G. Grippe A (H1N1) et SDRA: caractéristiques des patients admis en réanimation et prise en charge. *Revue de la littérature. Ann Fr Anesth Réanim*. 2010;29:117-25.
- Davies A, Jones D, Bailey M, Beca J, Bellomo R, Blackwell N, et al. Extracorporeal membrane oxygenation for 2009 influenza A(H1N1) acute respiratory distress syndrome. *JAMA*. 2009;302:1888-95.
- 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;374:1351-63.
- Recommandations sur les indications de l'assistance circulatoire dans le traitement des arrêts cardiaques réfractaires. Ministère français de la Santé. *Ann Fr Anesth Réanim*. 2009;28:182-90.
- Megarbane B, Deye N, Baud FJ. Assistance circulatoire périphérique au cours des intoxications aiguës par cardiotropes. *Rev Prat*. 2008;58:855-60.
- Nunnally ME, Jaeschke R, Bellingan GJ, Lacroix J, Mourvillier B, Rodriguez-Vega GM, et al. Targeted temperature management in critical care: a report and recommendations from five professional societies. *Crit Care Med*. 2011;39:1113-25.
- Chen JS, Ko WJ, Yu HY, Lai LP, Huang SC, Chi NH, et al. Analysis of the outcome for patients experiencing myocardial infarction and cardiopulmonary resuscitation refractory to conventional therapies necessitating extracorporeal life support rescue. *Crit Care Med*. 2006;34:950-7.
- Dejohn C, Zwischenberger JB. Ethical implications of extracorporeal interval support for organ retrieval (EISOR). *ASAIO J*. 2006;52:119-22.
- Alexander DC, Butt WW, Best JD, Donath SM, Monagle PT, Shekerdemian LS. Correlation of thromboelastography with standard tests of anticoagulation in paediatric patients receiving extracorporeal life support. *Thromb Res*. 2010;125:387-92.
- Zanatta P, Forti A, Bosco E, Salvador L, Borsato M, Baldanzi F, et al. Microembolic signals and strategy to prevent gas embolism during extracorporeal membrane oxygenation. *J Cardiothorac Surg*. 2010;5:5.
- Tyree K, Tyree M, DiGeronimo R. Correlation of brain tissue oxygen tension with cerebral near-infrared spectroscopy and mixed venous oxygen saturation during extracorporeal membrane oxygenation. *Perfusion*. 2009;24:325-31.
- Schachner T, Bonaros N, Bonatti J, Kolbitsch C. Near infrared spectroscopy for controlling the quality of distal leg perfusion in remote access cardiopulmonary bypass. *Eur J Cardiothorac Surg*. 2008;34:1253-4.