



Assistance circulatoire mécanique de longue durée

C. de La Bourdonnaye, N. Dib, A. Buschiazzo, M. Aymami, M. Charton, E. Flécher, J. Tomasi

Résumé : L'assistance circulatoire mécanique de longue durée regroupe l'ensemble des dispositifs médicaux implantables qui permettent de pallier une dysfonction myocardique prolongée et réfractaire au traitement médical optimal. Elle permet de suppléer la fonction circulatoire défaillante pendant plusieurs mois, voire plusieurs années. Les assistances ventriculaires (paracorporelles ou internes) et les cœurs artificiels totaux constituent les dispositifs implantés à ces rares patients, dans des centres experts et transplantateurs. Dans cet article sont décrites les indications et les techniques d'implantation des dispositifs actuels, ainsi que les résultats récents. L'assistance circulatoire mécanique de longue durée a fait des progrès considérables ces dernières années. Son développement au sein de centres transplantateurs experts est à encourager. Le défi reste de choisir la bonne pompe, au bon moment, pour le bon patient, en respectant les limites de la nature humaine.

© 2025 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés, y compris ceux relatifs à la fouille de textes et de données, à l'entraînement de l'intelligence artificielle et aux technologies similaires.

Note de l'éditeur : Elsevier adopte une position neutre en ce qui concerne les conflits territoriaux ou les revendications juridictionnelles dans les contenus qu'il publie, y compris dans les cartes et les affiliations institutionnelles.

Mots-clés : Assistance circulatoire de longue durée ; Assistance circulatoire ; Cœurs artificiels ; Transplantation cardiaque ; Insuffisance cardiaque ; Assistance monoventriculaire ; Assistance biventriculaire

Plan

■ Introduction	1
■ Principes généraux et indications	2
Insuffisance cardiaque avancée	2
Classification INTERMACS	2
Indication	2
Assister, mais avec quel objectif ?	2
Différents types d'assistance circulatoire mécanique de longue durée	3
Contre-indications à l'assistance circulatoire mécanique de longue durée	3
Règles d'allocation en France : le « score cœur »	3
■ Technique chirurgicale de l'assistance ventriculaire gauche	4
Préparation du patient	4
Canulation ventriculaire gauche	4
Tunnellisation du câble d'alimentation	5
Voie d'éjection aortique	5
Démarrage de la pompe	5
Fin de la procédure	6
Défaillance droite peropératoire	6
■ Technique chirurgicale d'implantation d'une assistance droite de longue durée	7
Implantation atriale droite	7
Voie d'éjection pulmonaire	7

■ Technique chirurgicale d'implantation d'une assistance biventriculaire de longue durée	7
En mode BiVAD HeartMate 6™	7
En mode BiVAD avec le dispositif Berlin Heart Excor®	7
■ Technique chirurgicale d'implantation d'un cœur artificiel total	8
Carmat®	8
Syncardia®	9
Cœur artificiel total à flux continu	9
Cœur artificiel homemade	9
■ Résultats cliniques	9
Dispositif d'assistance ventriculaire gauche	9
Dispositifs d'assistance biventriculaire et ventriculaire droit	10
Carmat®	10
BiVACOR®, ReinHeart®, SmartHeart®	11
■ Conclusion	11

■ Introduction

L'assistance circulatoire mécanique de longue durée regroupe l'ensemble des dispositifs médicaux implantables qui permettent de pallier une dysfonction myocardique prolongée et réfractaire au traitement médical optimal. Elle permet de suppléer la fonction circulatoire défaillante pendant plusieurs mois, voire plusieurs

années. Les assistances ventriculaires (paracorporelles ou internes) et les cœurs artificiels totaux constituent les dispositifs implantés à ces rares patients, dans des centres experts et transplantateurs.

■ Principes généraux et indications

Comprendre les indications d'assistance circulatoire mécanique implique de définir l'insuffisance cardiaque avancée, son caractère mono- ou biventriculaire, et de connaître la classification INTERMACS (Interagency Registry for Mechanically Assisted Circulatory Support).

Insuffisance cardiaque avancée

Elle correspond à la persistance d'une insuffisance cardiaque symptomatique malgré la mise en œuvre de toutes les thérapeutiques optimales usuelles. Sa survenue est une bascule pour le patient et impose de considérer des thérapeutiques d'exception telles que la transplantation et l'assistance circulatoire mécanique. Ces patients spécifiques et graves doivent être discutés et référés auprès d'un centre expert dans le domaine ^[1].

La définition de l'insuffisance cardiaque réfractaire associe nécessairement les quatre critères suivants ^[2] :

- des symptômes persistants d'insuffisance cardiaque (dyspnée de stade III ou IV de la classification de la New York Heart Association [NYHA]) ;
- une dysfonction cardiaque (fraction d'éjection du ventricule gauche < 30 %, défaillance droite isolée, valvulopathie sévère non opérable, anomalie congénitale sévère non opérable, ou la persistance de *brain natriuretic peptide* élevé associé à une dysfonction diastolique ou à une anomalie structurelle définissant une insuffisance cardiaque à fraction d'éjection préservée) ;
- une hospitalisation pour défaillance cardiaque dans les 12 mois précédents (nécessitant soit de hautes doses de diurétiques pour un épisode de congestion pulmonaire systolique, soit des inotropes positifs, soit dues à la présence de troubles du rythme ventriculaires) ;
- une diminution de la capacité d'exercice rattachée à l'origine cardiaque et définie par un test des 6 min à la marche (< 300 m) ou une consommation maximale d'oxygène inférieure à 12 ml/kg par minute ou inférieure à 50 % de la valeur prédictive.

Bien qu'ils n'entrent pas dans la définition reconnue de l'insuffisance cardiaque terminale, l'insuffisance rénale, hépatique, l'hypertension pulmonaire de type II et l'état cachectique sont des éléments à prendre en compte pour évaluer la sévérité de l'insuffisance cardiaque.

Classification INTERMACS

Elle permet de spécifier l'état clinique des patients en insuffisance cardiaque terminale. Elle détaille les stades III et IV de la NYHA et fait référence dans le domaine ^[3-6] :

- profil 1, *crash and burn* : le patient présente une hypotension persistante et aggravative malgré l'augmentation rapide des inotropes. L'hypoperfusion est critique et confirmée par une aggravation continue de l'acidose et du taux de lactates. Sans intervention rapide, le patient va décéder en quelques heures d'un choc cardiogénique ;
- profil 2, *sliding on drugs* : le patient présente des signes de détérioration progressive clinique et biologique malgré le traitement par inotropes intraveineux. Ce profil inclut le patient intolérant aux agents inotropes (exemple : trouble du rythme ventriculaire sous dobutamine) ;
- profil 3, *stable on drugs* : le patient est cliniquement et biologiquement stable sous traitement par inotropes, mais leur sevrage est impossible, échecs répétés de sevrage se traduisant par une hypotension ou une altération de la fonction rénale ;
- profil 4, « symptomatique au repos » : le patient est à domicile, sous traitement médicamenteux de l'insuffisance cardiaque

optimal, mais reste symptomatique dans la vie quotidienne au repos (congestion, dyspnée, symptômes gastro-intestinaux...). Ces patients nécessitent des hospitalisations fréquentes et itératives (*frequent flyer* des Anglo-Saxons) ;

- profil 5, « intolérance à l'effort » : le patient reste symptomatique à l'effort dans sa vie quotidienne. Ce stade est parfois associé à l'apparition/majoration d'une insuffisance rénale, avec des difficultés à juguler la volémie ;
- profil 6, « efforts limités » : le patient est peu gêné dans la vie quotidienne et mène des activités légères à l'extérieur de la maison. La fatigue se manifeste au bout de quelques minutes de tout effort physique significatif. Il n'y a pas de signe de surcharge volémique en dehors d'épisodes occasionnels d'aggravation des symptômes ;
- profil 7, NYHA III : le patient est stable au domicile avec peu d'effets dans sa vie quotidienne.

Des événements « modificateurs » peuvent faire basculer les patients d'un stade à l'autre, notamment les troubles du rythme ventriculaire, un choc par un défibrillateur implantable, une réhospitalisation pour décompensation (2 sur les 3 derniers mois ou 3 sur les 6 derniers mois), etc. Ces événements sont à considérer et doivent faire rediscuter la prise en charge et la stratégie thérapeutique.

Indication

Dès lors que le patient est en insuffisance cardiaque avancée, la question du traitement substitutif doit être posée au sein d'une équipe dédiée en centre expert. En pratique, on différencie deux catégories de patients : hospitalisés (INTERMACS 1-3) ou ambulatoires (INTERMACS 4-7) ^[1, 2, 7].

Dans le premier cas, le traitement substitutif est d'emblée indiqué, et réalisé dans la même hospitalisation pour permettre au patient de sortir de l'hôpital ^[2, 4, 8-16]. Dans le second cas, il est indiqué en cas de patient à risque à court terme, notamment en cas de survenue d'événements péjoratifs (réhospitalisation pour décompensation, choc électrique d'un défibrillateur implantable, majoration de l'hypertension artérielle pulmonaire...). Le traitement substitutif de première intention reste la transplantation cardiaque, c'est le traitement de référence, avec une meilleure survie à long terme et une meilleure qualité de vie ^[1]. En cas de contre-indication, d'absence de greffon dans les délais souhaités, de possible récupération à long terme, l'assistance circulatoire mécanique doit être discutée ^[17, 18].

Les patients hospitalisés en réanimation sous assistance circulatoire mécanique temporaire de type oxygénation par membrane extracorporelle (ECMO) veinoartérielle constituent une population bien particulière. Ils sont prioritaires sur liste pendant un temps donné (cf. infra) au-delà duquel il est légitime de considérer l'implantation d'une assistance de longue durée.

Les patients INTERMACS 5 à 7 sans événement précipitant récent doivent bénéficier d'un suivi rapproché et être réévalués tous les 3 à 6 mois ^[1, 2, 19].

Assister, mais avec quel objectif ?

Il est important de définir pour chaque patient l'objectif a priori de la stratégie proposée avec l'assistance circulatoire de longue durée ^[1, 20]. Brièvement, ces dispositifs peuvent être implantés dans les circonstances suivantes :

- en attente de récupération (*bridge-to-recovery* des Anglo-Saxons), notamment dans les cardiopathies ischémiques aiguës et myocardiites. Cet objectif justifie néanmoins rarement la mise en place d'un dispositif de longue durée, car l'assistance de courte durée type ECMO ou Impella® a souvent permis d'explorer cette possibilité ;
- en attente de transplantation (*bridge-to-transplant* des Anglo-Saxons) ;
- pour réfléchir et explorer un possible projet de greffe, non certain au moment de l'implantation (*bridge-to-candidacy* des Anglo-Saxons). Il peut s'agir de vérifier un sevrage alcoolique dans le temps, un comportement et une compliance au suivi adaptés pour une greffe, prendre suffisamment de recul sur une néoplasie récente, etc. ;

- en alternative à la transplantation cardiaque (*destination therapy* des Anglo-Saxons). Il s'agit d'une implantation permanente et définitive du dispositif.

Il faut cependant garder à l'esprit que ces indications d'assistance circulatoire sont relativement théoriques et il n'est pas toujours aisé de catégoriser ainsi un patient, pour qui l'objectif peut varier dans le temps.

Différents types d'assistance circulatoire mécanique de longue durée

En matière d'assistance circulatoire de longue durée, le choix du dispositif dépend grandement du caractère uni- ou biventriculaire de la cardiopathie. La défaillance myocardique sera ainsi gauche, droite ou biventriculaire [20]. L'histoire clinique, le contexte, l'échocardiographie et le cathétérisme droit permettent de répondre à cette question. Les conséquences de cette appréciation sont importantes et orientent les choix vers certains dispositifs plutôt que vers d'autres. Il faut donc savoir réitérer les examens d'imagerie, avoir une approche multimodale, et apprécier en équipe le caractère uni- ou biventriculaire de la cardiopathie.

L'insuffisance cardiaque gauche réfractaire associée à un état d'hypoperfusion périphérique une surcharge pulmonaire. Elle peut être de trois types [1, 21] :

- l'insuffisance cardiaque gauche à fraction d'éjection réduite, dont le diagnostic est fait par la simple constatation échocardiographique de sa réduction ($< 40\%$) ;
- l'insuffisance cardiaque gauche à fraction d'éjection préservée, qui associe une fraction d'éjection supérieure à 50% à des anomalies structurelles et fonctionnelles du ventricule gauche (dysfonction diastolique échocardiographique, augmentation des pressions de remplissage ventriculaire gauche, cardiopathie hypertrophique) ;
- l'insuffisance cardiaque gauche à fraction d'éjection modérément réduite, qui associe une fraction d'éjection inférieure à 50% , mais supérieure à 40% , et des critères d'insuffisance cardiaque à fraction d'éjection préservée. Cette dernière catégorie n'est pas concernée par la mise en place de dispositifs d'assistance de longue durée.

L'insuffisance cardiaque droite associe un état d'hypoperfusion périphérique à une surcharge veineuse (œdèmes des membres inférieurs, anasarque, hépatomégalie, voire cirrhose). Au stade avancé de la maladie, elle est souvent associée à des dysfonctions hépatiques ou rénales.

Enfin, l'insuffisance cardiaque réfractaire monoventriculaire devient souvent biventriculaire au stade terminal de la maladie [1, 21]. Une présentation d'emblée sur un mode biventriculaire est également possible dans certaines étiologies (cardiopathies dilatées primitives, myocardites).

De façon schématique, une assistance ventriculaire gauche ou droite peut être proposée en première intention en cas de défaillance monoventriculaire. Une assistance biventriculaire (paracorporelle ou interne) est proposée dans le cadre d'une insuffisance cardiaque biventriculaire. Dans ce dernier cas, la mise en place d'un cœur artificiel total peut également être proposée au patient en alternative aux dispositifs d'assistance biventriculaire [1, 17, 18, 21].

Contre-indications à l'assistance circulatoire mécanique de longue durée

L'assistance circulatoire mécanique est une thérapeutique d'exception, lourde, durable (quelques mois en attente de greffe, mais possiblement définitive dans certaines indications). Il est indispensable d'avoir examiné le désir du patient avant d'envisager cette approche résolument invasive et aux lourdes conséquences corporelles [1]. La décision de mettre en place de tels dispositifs doit donc, idéalement, être discutée avec le patient. La rencontre avec les proches est souhaitable pour les patients sédatisés en réanimation. Lorsque cela est possible, des rencontres itératives avec l'équipe médicale implantatrice, voire avec

un patient déjà implanté, permettent d'optimiser l'information délivrée en préopératoire. Il apparaît donc d'emblée que le patient réticent à cette stratégie, aux antécédents récents et significatifs psychiatriques, souffrant d'addiction aux drogues ou à l'alcool, socialement isolé ou en incapacité de comprendre la gestion du matériel est contre-indiqué à cette prise en charge, quel que soit le dispositif [1, 2, 4, 8-16].

La défaillance biventriculaire est une contre-indication à l'assistance univentriculaire. Rappelons la difficulté de caractériser parfois le caractère uni- ou biventriculaire de certains insuffisants cardiaques. Les patients dont l'état physiologique général ou les comorbidités n'offrent pas une espérance de vie prolongée « minimale » sont contre-indiqués à l'assistance de longue durée (pathologie néoplasique non contrôlée, pathologie vasculaire sévère, insuffisance d'organe terminale sans projet de supplémentation).

Certains critères morphologiques, comme la grande cachexie ou l'obésité très morbide (indice de masse corporelle > 35), sont des contre-indications relatives à ces dispositifs.

Des contre-indications morphologiques et anatomiques sont également à apprécier, notamment pour les cœurs artificiels totaux [22]. Un scanner thoracique, au mieux avec des reconstructions/simulations d'implantation, permet de préciser l'encombrement intrathoracique du dispositif et les potentiels conflits avec les organes de voisinage. Pour l'assistance ventriculaire, il faut disposer d'une cavité minimale et une lumière ventriculaire trop réduite dans des cas de cardiomyopathie hypertrophique peut générer des difficultés de drainage et des phénomènes de succion (diamètre télédiastolique du ventricule gauche < 45 mm).

Sans être nécessairement des contre-indications, certaines cardiopathies justifient de procédures associées et peuvent significativement alourdir la prise en charge. Ainsi, par exemple, il faut envisager en cas d'implantation d'une assistance ventriculaire gauche le remplacement d'une valve aortique fuyante, un pontage sur une coronaire droite sténosée, la fermeture d'une communication interatriale (possible inversion des pressions et des flux sanguins), etc. [23].

Une infection active est une contre-indication au moins temporaire à l'implantation d'un dispositif d'assistance circulatoire [1]. Tous les dispositifs d'assistance justifiant d'une anticoagulation efficace, leur contre-indication est aussi une contre-indication à cette stratégie. Enfin, à ce jour, l'assistance biventriculaire impose un projet de greffe et l'implantation permanente (*destination therapy*) est contre-indiquée avec les cœurs artificiels ou dispositifs d'assistance biventriculaire. Cette approche est, théoriquement du moins, l'apanage des seules assistances monoventriculaires.

Règles d'allocation en France : le « score cœur »

Si la décision d'accepter ou non un greffon reste à la discrétion de l'équipe transplantatrice, l'allocation des greffons aux receveurs est gérée par un organisme d'état indépendant, l'Agence de la biomédecine. Le score national d'attribution des greffons cardiaque a été mis en place en 2018 (modifié en 2019 et 2020). Sans rentrer dans les détails des règles d'attribution, l'assistance circulatoire mécanique de longue durée peut justifier d'une priorisation sur liste dans certaines circonstances, notamment en cas de dysfonction du dispositif, de thrombose de pompe, du caractère biventriculaire de l'assistance ou cœur artificiel, d'infection contrôlée du dispositif. Une demande de priorité est alors formulée auprès d'experts de l'Agence de la biomédecine, qui peuvent décider d'attribuer d'emblée ou sur 3 mois 900 points au patient concerné.

Pour éviter l'accumulation sur liste de patients sous assistance ventriculaire gauche, un artifice a été mis en place (2020) pour attribuer, tous les cinq greffons, 750 points à ces patients spécifiques pour la suivante proposition d'un greffon cardiaque. L'ancienneté sur liste (délai d'attente depuis l'implantation) est également prise en compte pour tâcher de diminuer les délais d'attente [24].

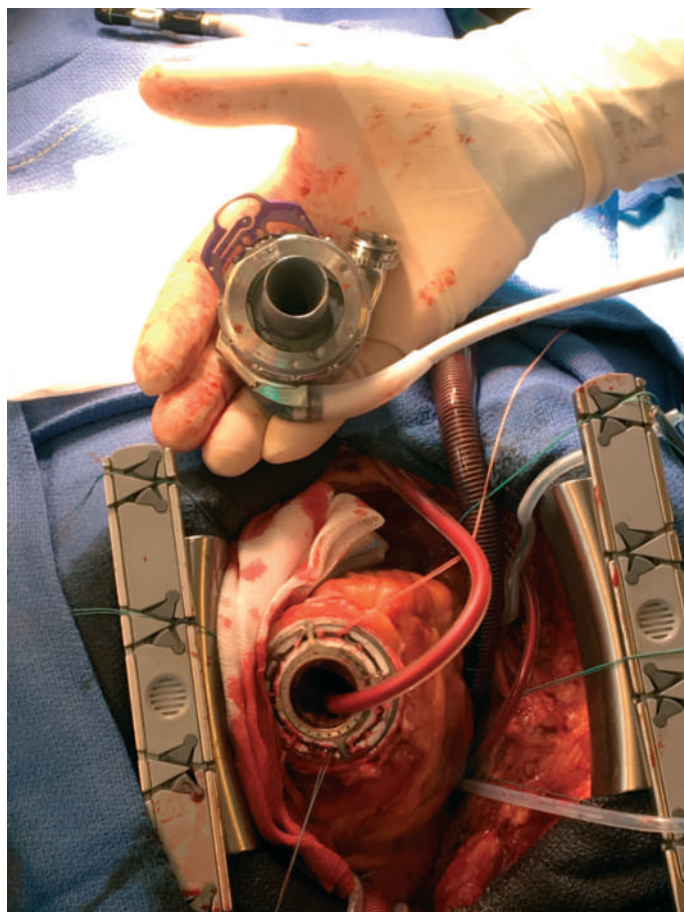


Figure 1. HeartMate 3™ avant l'amarrage à la collerette apicale.

■ Technique chirurgicale de l'assistance ventriculaire gauche

De façon générale, une canule d'admission est placée à l'apex du ventricule gauche et un conduit d'éjection est anastomosé au système artériel systémique (aorte ascendante le plus souvent, artère sous-clavière ou aorte descendante dans certaines circonstances spécifiques). L'implantation est classiquement effectuée sous circulation extracorporelle (CEC) d'assistance et à cœur battant, pour limiter autant que possible l'ischémie myocardique et protéger la fonction ventriculaire droite. Certaines équipes privilégient néanmoins une implantation à cœur arrêté, avec délivrance d'une cardioplégie. Enfin, une implantation sans CEC est techniquement possible, mais peu réalisée en pratique clinique. Nous rapportons et détaillons ici la technique chirurgicale la plus pratiquée, de multiples variantes restent possibles, à la discrétion des équipes.

À ce jour, seul le dispositif HeartMate 3™ est commercialisé et disponible en France (Fig. 1). Il s'agit d'une pompe monoventriculaire centrifuge à lévitation magnétique.

Préparation du patient

Avant d'opérer le patient, il faut idéalement discuter avec lui l'emplacement de sortie du câble d'alimentation de la machine, en prenant en compte le côté dominant (droitier ou gaucher), son gabarit et sa morphologie, éventuellement son habitude vestimentaire (ceinture, bretelles, pantalons taille basse...).

Le patient est en position habituelle de chirurgie cardiaque, en décubitus dorsal. Les scarpas sont placés dans le champ opératoire (la totalité des membres inférieurs si pontage associé). La sternotomie est la voie d'abord de référence, notamment en cas de procédures chirurgicales associées à l'implantation. Une implantation dite mini-invasive par double thoracotomie est possible :

une incision antérolatérale gauche au 5^e espace pour la canulation apicale et une seconde antérodroite au 2-3^e espace intercostal pour la voie d'éjection aortique. Cette dernière approche permet de faciliter une sternotomie et la dissection médiastinale ultérieure en cas de greffe future [20, 23]. Elle permettrait également une meilleure protection de la fonction ventriculaire droite et pourrait diminuer la défaillance droite périopératoire.

La CEC est classiquement établie entre l'aorte ascendante, canulée haute, au pied du tronc artériel brachiocéphalique, et l'oreillette droite. Une canulation bicave est possible, notamment pour certaines procédures associées (fermeture de communication interauriculaire, plastie tricuspidale). Une décharge gauche placée dans la veine pulmonaire supérieure droite est mise en place.

L'implantation peut être faite à cœur battant en l'absence d'insuffisance aortique. Une injection de dioxyde de carbone permet dans ce cas de diminuer les embolies gazeux. Des fils d'exposition sont passés au fond du sac péricardique pour basculer l'apex du ventricule gauche vers le haut.

Canulation ventriculaire gauche

La pompe a préalablement été assemblée, préparée et testée quelques minutes en immersion complète. Avant le départ en CEC, sous contrôle échographique, le site d'implantation de la canule apicale est repéré au doigt sur la paroi apicale (en général 1 ou 2 cm en dehors de l'artère interventriculaire antérieure). Il faut orienter la canule vers l'orifice mitral, en évitant les piliers mitraux. Une canule d'aspiration trop proche du septum interventriculaire ou trop proche de la paroi libre du ventricule peut empêcher le bon remplissage de la machine et générer des troubles du rythme ventriculaires. Il faut prendre en compte l'état de dilatation du ventricule gauche dans les cardiopathies dilatées ou l'axe valve mitrale/apex peut être modifié [9, 11, 23, 25].

L'utilisation d'un écarteur sternal à cœur battant avec plusieurs fils de traction péricardique permet ensuite facilement d'exposer l'apex cardiaque. Après le départ en CEC d'assistance, la table opératoire est mise en position franche de Trendelenburg.

On prépare plusieurs fils tressés (par exemple Ti-Cron™ 2/0, aiguilles de 26 mm), en U inversé, tous appuyés sur un téflon un peu large. Les fils sont passés de dehors en dedans à travers la paroi du myocarde, en piquant 5 à 10 mm à l'extérieur du cercle destiné (Fig. 2A). Puis ils sont passés dans la collerette de fixation spécifique, à mi-distance, sur la ligne noire, du dessous vers le dessus. Une fois que quatre points ont été passés et noués aux quatre points cardinaux, il n'est plus nécessaire pour l'aide de tenir la collerette et les points suivants sont progressivement ajoutés de façon circulaire. Les téflons sont donc extérieurs à la coiffe apicale et ces points en U viennent plaquer en couronne la paroi myocardique (Fig. 2B). Un soin particulier est apporté à la fixation de cette collerette apicale, car son accès est ensuite impossible (sans démonter la pompe) en cas de saignement postérieur. L'ajout de colle biologique est possible en complément pour assurer une hémostase parfaite. Il n'est pas recommandé de nouer les fils à cheval sur les barres métalliques qui supportent la collerette de feutre apicale.

Attention à ne pas trop serrer les fils en nouant pour ne pas endommager le myocarde, en particulier dans les cardiopathies ischémiques avec une séquelle récente apicale et dans le cas d'une cardiopathie dilatée avec une paroi anévrysmale ventriculaire fine.

Une fois la collerette de fixation nouée et appliquée à l'apex, nous recommandons de passer un fil dans le myocarde, qui sera réséqué. Cela permet de ne pas perdre la pièce musculaire dans la cavité ventriculaire gauche, en particulier à cœur battant. On réalise l'orifice apical à l'aide de l'emporte-pièce spécifique. Une fois l'orifice créé à l'aide de l'emporte-pièce spécifique, il faut vérifier l'absence de thrombus ou de bande musculaire qui pourraient gêner l'introduction de la canule et entraver l'aspiration du flux sanguin. Il est recommandé d'envoyer au laboratoire d'anatomopathologie pour analyse ultérieure la carotte apicale retirée avec l'emporte-pièce.

La pompe d'assistance est ensuite introduite et clipsée sur la coiffe apicale. La voie d'éjection doit être dirigée vers la droite du patient, parallèle au diaphragme.

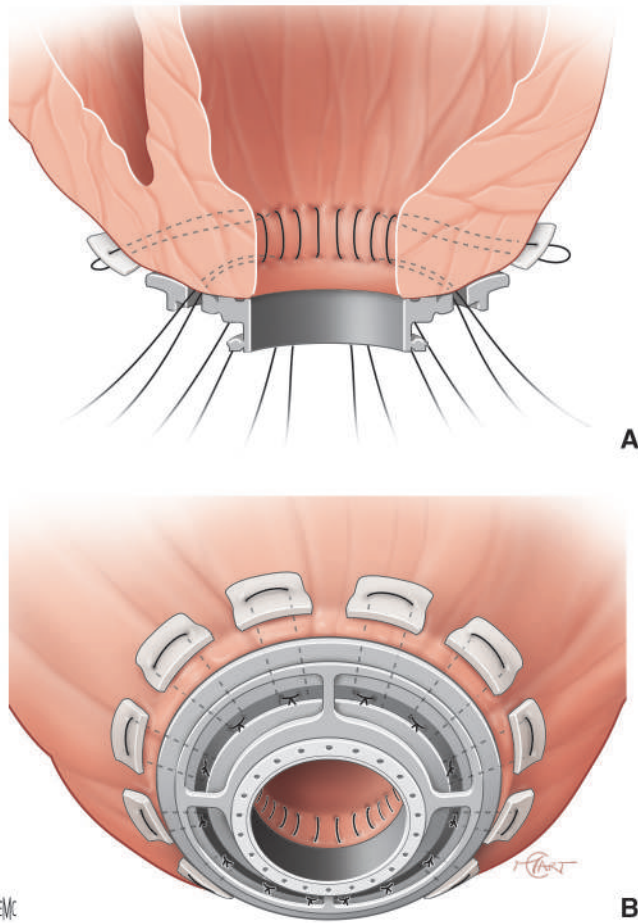


Figure 2. Canulation ventriculaire gauche.
A. Fils de valve en U transpariétaux appuyés sur téflons.
B. Colerette en place.

Notons que certaines équipes proposent de réaliser d'abord l'orifice apical, de passer les points en U extériorisés par l'orifice pour secondairement les passer dans la colerette de fixation. Certaines équipes réalisent également la fixation apicale par une suture continue. Enfin, en cas d'anévrisme ventriculaire gauche important, de calcifications apicales ou d'antécédents de procédures de Dor, l'implantation de la pompe peut se faire alternativement sur la face inférieure du ventricule gauche [23].

Tunnellisation du câble d'alimentation

La tunnellisation est généralement réalisée après la fixation de la pompe à l'orifice apical. Son trajet est effectué en ouvrant l'aponévrose des grands droits de l'abdomen (Fig. 3A), avec un câble placé en arrière de ces muscles, mais en prépéritonéal, le câble restant idéalement dans la gaine musculaire (Fig. 3B), à sa face profonde. Le site d'extériorisation à la peau doit avoir été réfléchi en amont, prenant en compte le gabarit du patient, sa dominance (droitier ou gaucher, pour les soins de câble), voire ses habitudes vestimentaires. Certains auteurs proposent une tunnellation en deux étapes, dite en C, avec une contre-incision pour allonger le trajet de tunnellation et possiblement diminuer les infections de câble [20]. Le Dacron® velours est désormais laissé en profondeur pour n'avoir que la partie siliconée du câble à la peau (Fig. 3C). De nombreuses équipes sécurisent le câble par une fixation temporaire à la peau et un système fortement adhésif de type Hollister®.

Là encore, des variantes existent et certaines équipes réalisent cette tunnellation avant de se porter sur l'implantation apicale.

Voie d'éjection aortique

Une protection en Gore-Tex® rigide s'enfile sur la voie d'éjection en Dacron® afin d'éviter toute coudure ou plicature sur l'angle antéro-inférieur du cœur. Pour certains auteurs, cette protection en polytétrafluoroéthylène est préalablement multiperforée pour éviter la formation d'un caillot interne pouvant ultérieurement obstruer le tube en Dacron® par compression externe.

Son trajet suit classiquement l'angle antéro-inférieur du cœur, puis son bord droit, contre l'oreillette droite, en dehors de la canule veineuse. On peut s'aider de la ligne noire sur le tube pour s'assurer de l'absence de torsion. La mesure de la longueur adéquate se fait à mailles « tendues », par une traction douce. Après la recoupe du conduit d'éjection, l'anastomose se fait sur le bord droit de l'aorte ascendante, sous clampage partiel lorsque la procédure est réalisée sous CEC d'assistance et à cœur battant (Fig. 4). Après la vérification de l'absence de plaque athéromateuse sur la zone d'intérêt, on utilise un clamp de Satinsky pour exclure la portion d'aorte voulue. Après avoir ouvert l'aorte ascendante de manière longitudinale sur environ 2 cm, l'anastomose est réalisée par un surjet de fil de Corolene® 4/0 et possiblement sécurisée par de la colle chirurgicale.

L'angulation et la taille de cette anastomose sur l'aorte (45°, 60°, 90°), ainsi que son positionnement (plus ou moins haut sur l'aorte ascendante), pourraient avoir un impact sur le devenir clinique, notamment en termes de fuite aortique [26], de thrombose du culot [26], voire de turbulences du flux et d'accident vasculaire cérébral [27]. Il est aussi possible de tunneller le tube en Dacron® dans le sinus de Theile afin de libérer l'espace rétro-sternal pour une éventuelle greffe [23]. Cette technique expose au risque de compression/torsion du tube dans le sinus. Ce trajet du conduit d'éjection par la gauche du massif cardiaque pourrait être plus court, limiter la perte de charge et diminuer de possibles complications de pompe dans le suivi (thromboses). Aucune donnée scientifique robuste à ce jour n'autorise à privilégier un trajet d'éjection plutôt qu'un autre. On veille cependant à bien laisser dégager de toute compression la cavité ventriculaire droite, indispensable au bon fonctionnement de l'assistance gauche.

À cette étape, la purge du dispositif doit être réalisée avant le déclampage aortique. Les façons de la réaliser sont variables selon les opérateurs et les habitudes, mais les principes comportent une reprise de la ventilation pulmonaire, un remplissage du massif cardiaque, une aspiration placée sur l'aorte ascendante ou la prothèse vasculaire, un démarrage sur clamp du dispositif.

Des alternatives d'anastomose distale sont possibles en cas d'aorte ascendante calcifiée : tronc artériel brachio-céphalique, aorte thoracique descendante (via la cavité pleurale gauche), voire aorte abdominale.

Démarrage de la pompe

Le ventricule gauche est progressivement rempli avant le démarrage de la pompe en diminuant le débit de la CEC (jusqu'à environ 2 l/min). Cela permet de donner un volume confortable au ventricule et d'éviter les phénomènes de succion et de cavitation au démarrage de la pompe. L'aspiration via la veine pulmonaire est temporairement suspendue. La ventilation est reprise avec des paramètres normaux, voire en réalisant des manœuvres de Valsalva.

Le démarrage se fait à 3000 tours par minute, sur clamp, avec une purge (aiguille ou aspiration) placée en amont de celui-ci. Un massage doux des cavités cardiaques est possible. Le déclampage est réalisé après un contrôle échocardiographique de l'efficacité des purges.

Le débit de la pompe est progressivement augmenté, alors que celui de la CEC est diminué. L'échographie transœsophagienne peropératoire est essentielle pour guider le sevrage de la CEC, les posologies d'amines, le remplissage vasculaire. Les modalités de sevrage de la CEC sont variables selon les centres, les opérateurs et les habitudes, mais les principes comportent dans tous les cas une reprise de la ventilation, une normothermie, une absence d'hémorragie majeure, une surveillance visuelle et échographique de l'aspect du ventricule droit (remplissage cinétique, distension),

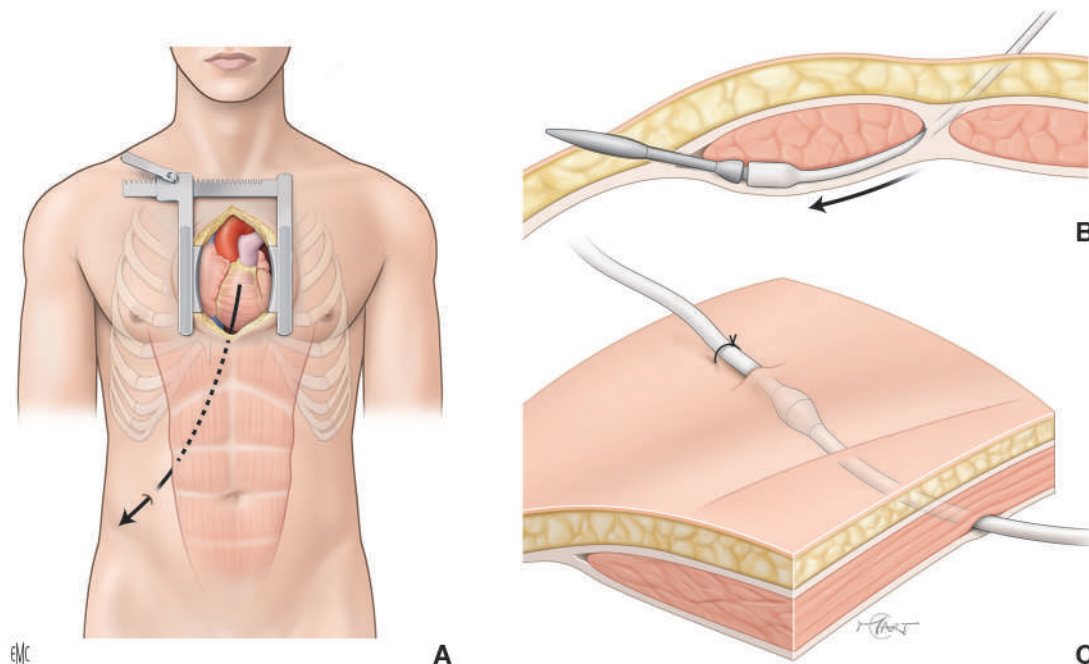


Figure 3. Tunnellisation du câble d'alimentation. La tunnellisation commence à la partie inférieure de la sternotomie (A), elle continue dans l'aponévrose du muscle grand droit (sous ce dernier) (B), pour finir au flanc droit (la bague reste sous-cutanée et ne doit pas être visible) (C). Le câble est fixé en intradermique par un fil résorbable.

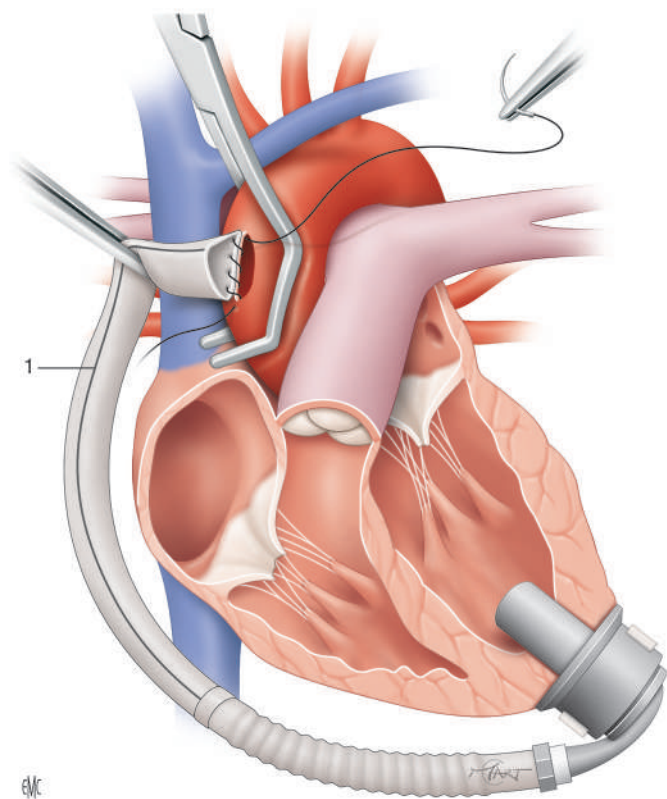


Figure 4. Canule d'éjection aortique. Suture distale de la canule d'éjection par deux hémisurjets. L'aorte est exclue par un clamp de Satinsky. Il faut vérifier l'absence de twist sur l'ensemble de la canule (repère : ligne noire).

une bonne décharge du ventricule gauche, une position médiane du septum interventriculaire. En cas de succion sur les parois ventriculaires gauches ou sur le septum, il faut diminuer le débit de CEC ou remplir le patient pour améliorer le drainage. À l'arrêt de la CEC et si l'hémodynamique est stable, on peut enlever la purge.

La persistance d'air dans le tube ou dans la cavité ventriculaire doit faire évoquer une fuite au niveau de la communication apicale. Le sevrage de la CEC peut, selon le contexte, justifier d'amines vasopressives, d'une stimulation épicaudique, voire de monoxyde d'azote (NO). Le bon remplissage de la pompe d'assistance en conservant une bonne fonction ventriculaire droite est l'objectif de cette réanimation peropératoire.

Fin de la procédure

À l'arrêt de la CEC, l'héparine est antagonisée. On veille tout particulièrement à l'hémostase, qui peut être longue et difficile à obtenir chez ces patients les plus graves, parfois en réanimation ou sous ECMO en préopératoire. Un drainage adapté est privilégié, en vérifiant l'absence de torsion ou de coudure du conduit d'éjection à la fermeture. La mise en place d'électrodes de stimulation épicaudique est recommandée, le maintien d'un rythme cardiaque suffisamment rapide peut aider à la fonction ventriculaire droite en postopératoire. Pour de nombreuses équipes, notamment lorsqu'un projet de greffe ultérieure est considéré, la mise en plaque de plaques de Gore-Tex® est recommandée, le plus souvent autour du corps de pompe (plaque fine) et en rétrosternal (plaque épaisse) pour faciliter la réouverture du thorax et sa dissection future [28].

Le sternum est fermé en prenant garde de pousser la voie d'éjection sur le côté droit pour éviter toute compression, tout conflit avec le ventricule droit ou tout rapport direct avec une prochaine sternotomie.

Des pansements spéciaux de fixation sont mis en place sur les câbles pour les immobiliser.

Défaillance droite peropératoire

Lorsqu'elle survient en peropératoire, rendant impossible le sevrage de la CEC malgré le traitement médical optimal (optimisation volémie, amines, NO inhalé...), la mise en place d'une assistance droite temporaire de type ECMO droite-droite est possible [18, 29, 30] (Fig. 5). Une canule veineuse longue et multiperforée est introduite jusque dans l'oreillette droite via une ponction veineuse percutanée fémorale ; une réinjection en canulant directement le tronc de l'artère pulmonaire, ou via un tube prothétique de 10 mm anastomosé au même endroit, permet de soulager le

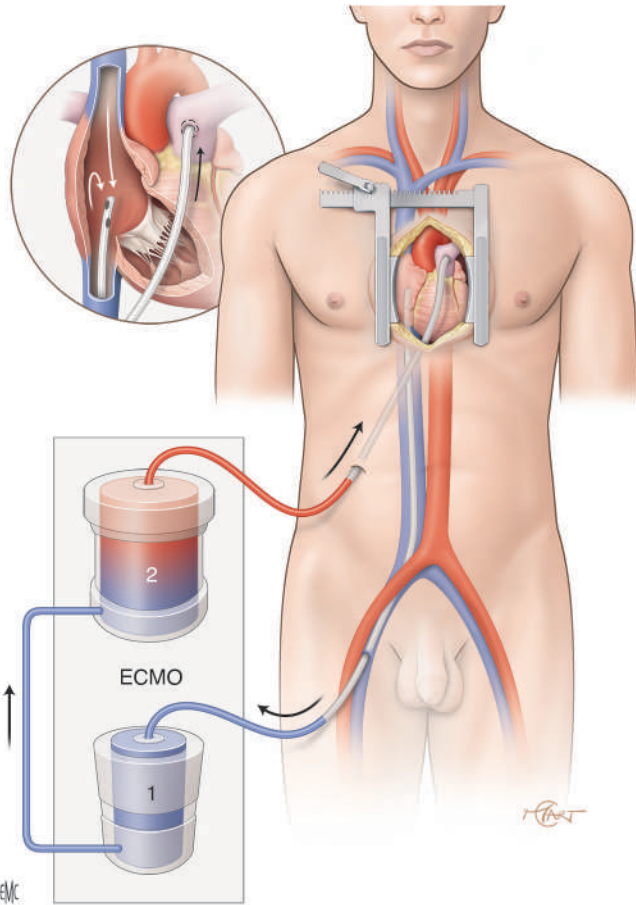


Figure 5. Assistance temporaire droite-droite. Oxygénation par membrane extracorporelle centrale entre la veine fémorale (cavités droites) et l'artère pulmonaire. Tunnellisation de la canule artérielle.

cœur droit et de remplir correctement le lit pulmonaire et la pompe ventriculaire gauche. Le sternum est alors refermé et le suivi en réanimation détermine des possibilités de récupération de sevrage de l'assistance temporaire droite. Certaines équipes réalisent dans ce cas de figure une assistance droite-droite exclusivement intrathoracique (ECMO centrale), d'autres réalisent cette assistance de manière complètement percutanée, en canulant la veine jugulaire droite avec une canule souple et longue placée jusque dans l'artère pulmonaire. Cette dernière implantation justifie d'une imagerie adaptée, à savoir une chirurgie faite en salle hybride ou une implantation secondaire après la chirurgie chez un patient restant transportable.

■ Technique chirurgicale d'implantation d'une assistance droite de longue durée

Ce type d'assistance est bien plus rare que l'assistance ventriculaire gauche. Il n'existe pas de pompe d'assistance circulatoire mécanique de longue durée spécifique du cœur droit. On utilise pour ce faire une pompe d'assistance gauche placée en position droite. La mise en place justifie d'une CEC avec une canulation bicave et l'administration d'une cardioplogie.

Implantation atriale droite

L'implantation de l'assistance est classiquement réalisée dans l'oreillette droite et dans l'axe de la valve tricuspide [9, 23, 31]. L'oreillette droite étant particulièrement souple, et pour limiter les phénomènes de succion à la mise en marche de la pompe (aspiration), il est recommandé d'interposer plusieurs anneaux de feutre

entre le dispositif d'arrimage de la pompe et l'épicarde atrial. Le résultat est une diminution de la protrusion de la pompe dans l'oreillette droite. Un refend du péricarde en regard de l'oreillette droite et en ouvrant largement la plèvre droite pour y positionner ensuite le corps de pompe est nécessaire, en veillant à ne pas léser le nerf phrénique. Il est préférable de réaliser d'abord l'orifice atrial droit et de placer les points d'arrimage ensuite dans la collerette de fixation pour descendre en « parachute » la pompe d'assistance pour limiter l'encombrement et faciliter sa suture à l'oreillette. Enfin, une plaque de Gore-Tex® est positionnée autour de la pompe afin de la protéger du poumon. L'orifice de sortie de la pompe est dirigé vers le bas, en direction du diaphragme du patient.

Certaines équipes ont décrit une implantation ventriculaire droite de la pompe, sur la face diaphragmatique. Cette alternative semble rare, mais pourrait représenter une solution en cas de symphyse pleurale et de difficulté d'accès à l'oreillette.

Voie d'éjection pulmonaire

Son trajet suit le sillon atrioventriculaire pour rejoindre l'axe de l'artère pulmonaire. Comme pour le côté gauche, une protection du tube est interposée pour limiter les risques de plicature et de compression sternale.

Les pompes monoventriculaires sont manufacturées pour une utilisation gauche exclusive. Afin de mimer les résistances périphériques, certains auteurs recommandent donc de diminuer le calibre du tube d'éjection en Dacron® sur au moins 3 cm pour obtenir un diamètre d'environ 6 à 7 mm, notamment en cas de pression artérielle pulmonaire élevée [9, 23, 31]. Il n'existe pas de données scientifiques robustes à ce jour dans la littérature pour recommander ou non cet artifice chirurgical. La tunnellation du câble au travers de la paroi abdominale n'a pas de particularité et les recommandations sus-citées pour une implantation à gauche restent valides.

■ Technique chirurgicale d'implantation d'une assistance biventriculaire de longue durée

En mode BiVAD HeartMate 6™

Il s'agit de l'implantation combinée d'un HeartMate 3™ en position gauche et d'un HeartMate 3™ en position droite [31-33] (Fig. 6A, 6B). En général, la voie d'éjection du dispositif d'assistance ventriculaire droit est mise en dedans (sous) de la voie d'éjection du dispositif d'assistance ventriculaire gauche. Cette configuration impose le port par le patient de deux systèmes embarqués indépendants l'un de l'autre.

La procédure est donc simplement l'addition des deux précédemment citées dans ce chapitre. Une CEC avec canulation bicave est indispensable. La mise en place commence par l'implantation de la pompe gauche (éventuellement à cœur battant), suivie de l'implantation de la pompe droite. Le sevrage de la CEC est souvent plus facile, car il n'y a plus de risque de défaillance droite. On veille à garder une vitesse de pompe à gauche légèrement supérieure à celle de droite pour éviter la surcharge et l'œdème pulmonaire.

Certaines équipes ont décrit l'implantation de deux HeartMate 3™ directement suturés sur les anneaux mitraux et tricuspides après une cardiectomie (cf. « Cœur artificiel home-made ») [34].

En mode BiVAD avec le dispositif Berlin Heart Excor®

Il s'agit ici d'un dispositif d'assistance mono- ou biventriculaire, pneumatique, avec des ventricules externes, paracorporels, posés sur l'abdomen du patient. Il existe plusieurs tailles de ventricule, permettant d'adapter le dispositif à l'âge et au gabarit du patient. Il s'agit du seul dispositif actuellement capable d'assister au long cours de très jeunes enfants. Des canules passées au travers de la

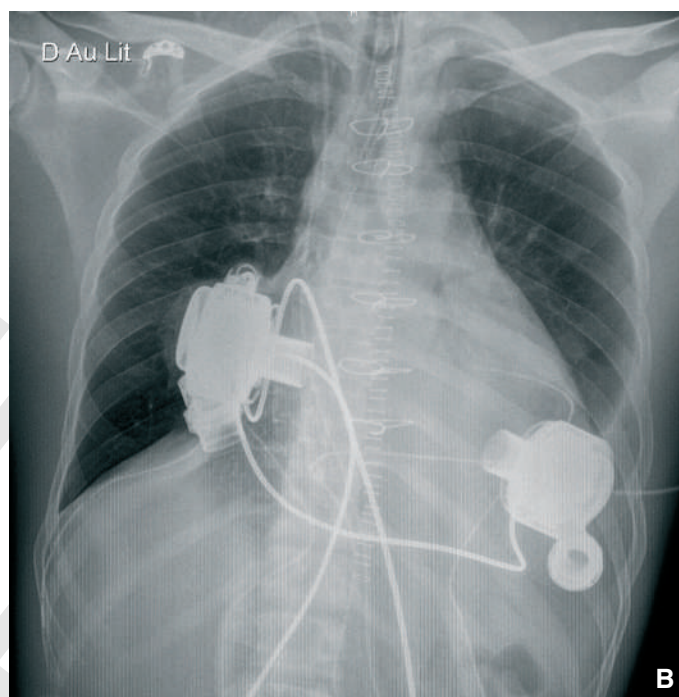
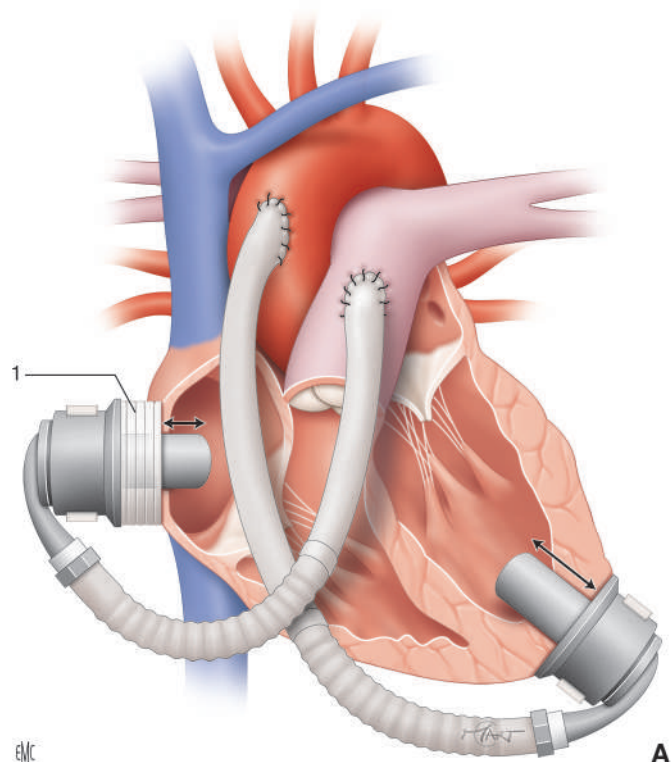


Figure 6. HeartMate 6™.

A. Assistance biventriculaire par deux HeartMate 3™. L'ajout d'anneaux de téflons permet de diminuer la profondeur de la canule d'aspiration atriale droite.
B. Radiographie thoracique postopératoire.

paroi abdominale relient les ventricules artificiels aux cavités cardiaques et gros vaisseaux concernés. Cette assistance dispose d'un remboursement, mais autorise difficilement le retour à domicile. L'énergie pneumatique impose un bruit constant pour le patient et son entourage. La console d'alimentation mobile, montée sur un petit caddie à roulettes, reste encombrante et lourde, pesant plus de 20 kg. La qualité de vie et la mobilité sont réduites.

■ Technique chirurgicale d'implantation d'un cœur artificiel total

La mise en place d'un cœur artificiel total répond à certaines exigences ; il convient d'emporter les deux massifs ventriculaires en gardant les anneaux auriculoventriculaires pour y arrimer le dispositif d'assistance. Une imagerie thoracique préopératoire (scanner) doit dans tous les cas évaluer l'encombrement du dispositif dans le thorax du patient. Enfin, les enjeux de fonctionnement et d'éducation thérapeutique aux conduites à tenir sont ici décuplés, la survie du patient étant totalement dépendante du cœur artificiel total. À ce jour, seule une implantation en attente de greffe est possible en France pour le cœur artificiel. Certaines pathologies cardiaques sont propices à ce choix d'assistance : larges communications interventriculaires, tumeurs du cœur, volumineux thrombi intracardiaques, cardiomyopathies très hypertrophiques...



Carmat®

Ce dispositif a été implanté pour la première fois en France en 2012 [35]. Le marquage « CE » a été obtenu en 2020. En France, il n'a pas encore obtenu le remboursement et fait l'objet d'une étude contrôlée non randomisée (Carmat® versus non-Carmat®) chez des patients biventriculaires en attente de greffe. Les patients non éligibles au Carmat®, essentiellement sur des critères morphologiques, sont inclus dans le bras non-Carmat® et suivis, quelle que soit leur prise en charge.

Outre le caractère intracorporel et orthotopique de cette assistance biventriculaire, l'originalité du Carmat® réside dans sa supposée capacité d'autorégulation et de biocompatibilité. Un temps incompressible de préparation de la prothèse (bains pour les valves et le péricarde) est à considérer, avec un personnel formé à son montage. Un soin particulier à la manipulation de la prothèse en peropératoire est également à considérer compte tenu d'une enveloppe souple (sac) contenant une huile siliconée (éviter toute ponction/brèche avec les aiguilles).

Préparation du patient

Pour pouvoir implanter ce dispositif, une évaluation morphologique préopératoire est indispensable [22]. On simule l'implantation du dispositif dans la cage thoracique sur un scanner injecté. La valeur la plus critique est la distance sternum/vertèbres qui passent par le centre de la valve mitrale (en hauteur). Grossièrement, si cette distance est inférieure à 12 cm, le patient sera probablement non éligible au Carmat®. D'autres mesures sont prises en compte : volumes ventriculaires, distance entre le diaphragme et l'artère pulmonaire, longueur de cette dernière avant sa bifurcation... Ce planning préopératoire est essentiel à considérer et se fait en collaboration avec le fabricant.

L'implantation se fait par une sternotomie médiane, sous CEC et canulation bicave. La canule aortique est positionnée le plus haut possible vers la crosse aortique ; la canule cave inférieure est mise de manière à faciliter la fermeture du sinus coronaire.

La procédure comporte la cardiectomie, le système de fixation du cœur sur les anneaux auriculoventriculaires, l'anastomose des gros vaisseaux, le démarrage de la pompe concomitant au sevrage de la CEC. Pour certaines équipes, au moment des sutures vasculaires et au démarrage du cœur artificiel, une insufflation du champ opératoire au dioxyde de carbone est commencée (optimisation des purges).

Cardiactomie

La cardiectomie commence par l'incision de l'artère pulmonaire et de l'aorte sur leur jonction sinotubulaire [22]. La paroi antérieure du ventricule droit est ouverte de manière parallèle au sillon

atrioventriculaire, à 2 cm de celui-ci. Cette dissection se poursuit en suivant l'axe de l'infundibulum pulmonaire et se finit par la section antérieure du sinus pulmonaire. La valve tricuspide ainsi que son appareil sous-valvulaire sont réséqués. On laisse 2 à 3 mm de feuillet valvulaire pour ne pas endommager l'anneau tricuspide. On incise ensuite le septum interventriculaire, au-dessus de l'anneau tricuspide, pour atteindre le ventricule gauche. On poursuit la section vers le haut dans l'axe de la chambre de chasse du ventricule gauche vers le sinus non coronaire aortique. Pour guider ce geste, on peut glisser un doigt dans le ventricule via l'aorte. De la même façon qu'à droite, on résèque l'ensemble de l'appareil mitral en préservant 2 à 3 mm de feuillet sur l'anneau mitral. La cardiectomie est complétée en suivant le bord inférieur de l'anneau mitral.

Trois gestes sont alors ajoutés : la fermeture ou résection/suture de l'auricule gauche (pour limiter le risque embolique et d'accident vasculaire cérébral ultérieur), la fermeture du sinus coronaire dans l'oreillette droite par plusieurs points de Prolene™ et la mise en place d'une sonde de pression à travers le septum interatrial (pour le monitoring gauche à la pose de la CEC). En cas de foramen ovale perméable, ce dernier est fermé.

Mise en place du connecteur

L'exposition se fait par trois à quatre sutures aux points cardinaux des deux anneaux atrioventriculaires [22]. Il est nécessaire d'exciser le myocarde en excès, particulièrement en région septale. En effet, le connecteur atrioventriculaire est rigide et maintient une distance fixe entre les deux orifices. Le septum doit avoir une épaisseur d'environ 5 mm. Les deux « anneaux connecteurs » mitral et tricuspide (ou communément appelés « lunettes ») sont mis en place (3 tailles disponibles, préférer la taille inférieure en cas de doute). On découpe de façon arrondie les raccords prothétiques recouverts de péricarde bovin, sauf sur leur bord septal. Une première suture est faite par un surjet de Prolene™ 3/0 et doit marquer une continuité entre la surface des anneaux et l'endocarde (en excluant le myocarde thrombogène). Un second surjet à visée hémostatique (aiguille de 36 mm) complète le premier surjet sur ces deux connecteurs atriaux souples. Le connecteur métallique rigide (lunettes) peut alors être clipsé sur les deux anneaux ainsi appareillés.

Suture des gros vaisseaux

Avant la mise en place de la pompe, une bandelette de renfort de feutre ou de péricarde est suturée à la circonférence du bord libre de l'artère pulmonaire [22]. La pompe est ensuite clipsée au connecteur. Une goupille de sécurité est mise en place pour assurer le maintien de cette fixation.

Après la recoupe à la longueur adéquate, en veillant à garder une courbure harmonieuse, la suture pulmonaire est réalisée entre le tube en Dacron® correspondant et l'artère pulmonaire. Il s'agit le plus souvent d'une anastomose délicate à réaliser compte tenu de l'encombrement et de la rigidité du dispositif. Le nœud sera serré après les purges. La suture aortique est ensuite réalisée, après la recoupe à la longueur adéquate, par deux hémisurjets de Prolene™ 4/0. L'ajout de colle sur ces sutures vasculaires est recommandé par de nombreuses équipes dans ce contexte.

Avant de finir, une fine plaque de Gore-Tex® est interposée autour de l'oreillette droite et de l'origine de la veine cave supérieure et inférieure (zone d'intérêt pour une future transplantation). Une plaque épaisse de Gore-Tex® est également laissée en place en rétrosternal en prévention de la greffe future.

Démarrage de la pompe

La purge de ce volumineux dispositif est essentielle. Plusieurs principes sont à considérer : purger la voie droite et la voie gauche, manœuvres de ventilation pulmonaire concomitantes, sur un patient placé en position de Trendelenburg, sous couvert d'administration de dioxyde de carbone pour de nombreuses équipes. La pompe est démarrée à petits volumes/petite fréquence, sous clampage aortique. Les purges sont guidées par l'échocardiographie transœsophagienne. Pour faciliter le remplissage à gauche, il peut être utile de tracter doucement le cœur

artificiel pour amorcer le remplissage de l'oreillette gauche (maintenir une pression atriale gauche < 15 mmHg) [22].

Du fait de l'assistance d'emblée biventriculaire, le sevrage de la CEC est souvent rapide une fois les purges réalisées. Le débit est régulièrement d'au moins 5 l/min, la fréquence est progressivement montée à 45 battements par minute avec un volume d'éjection maximal à 60 ml. Une fois que l'hémodynamique est stable et que la CEC est sevrée, la pompe est mise en mode automatique.

La fermeture n'a pas de particularités en dehors de la mise en place de plaques de Gore-Tex® pour faciliter la greffe ultérieure.

Syncardia®

Le Syncardia-Cardiowest® est un cœur artificiel américain ancien, dérivé du Jarvik 7 de 1982, à énergie pneumatique, équipé de quatre valves mécaniques de type Medtronic Hall®. Ce dispositif est légèrement moins encombrant que le Carmat®, plus récent. Il existe en deux versions, avec des ventricules artificiels de 70 ou 50 ml. Jusqu'à récemment, le modèle adulte de 70 ml bénéficiait encore d'un remboursement, mais plus du marquage CE. À notre connaissance, sa distribution est actuellement interrompue dans notre pays. Il a été le cœur artificiel le plus implanté dans le monde (> 1500 implantations en 2023).

Brièvement, la technique chirurgicale était comparable à celle du Carmat® : suture de raccords prothétiques sur les deux anneaux auriculoventriculaires débarrassés de leurs valves natives et mise en place de deux ventricules artificiels activés avec de l'air comprimé via deux *drivelines* (1 pour chaque ventricule) au niveau de l'abdomen. En diastole, le ventricule se remplit par aspiration et en systole il se vide par éjection et poussée d'un diaphragme avec de l'air comprimé. La durée de vie des batteries est relativement faible, le dispositif est franchement bruyant et la console portable pèse 6 kg, limitant grandement les déplacements et la qualité de vie sous ce type de dispositif.

Son implantation a largement été détaillée dans un article de l'*Encyclopédie médico-chirurgicale*, de 2019, intitulé « Assistance circulatoire : définition, techniques, indications » [20].

Cœur artificiel total à flux continu

Récemment a été implanté chez l'homme le premier cœur artificiel total à flux continu [36]. Ce dispositif ne disposant pas de sacs à sang à remplir et à vider, il est de bien plus petite dimension, autorisant potentiellement son implantation chez des patients de plus petit gabarit. Il ne s'agit actuellement que d'un cas clinique, et de futures études éclaireront éventuellement son développement.

Cœur artificiel homemade

Certaines équipes ont décrit l'implantation de deux HeartMate 3™ directement suturés sur les anneaux mitraux et tricuspides après une cardiectomie. Cette alternative peut être une solution chez les patients souffrant d'une cardiomyopathie hypertrophique terminale dont la morphologie ne permet pas l'implantation d'un cœur artificiel total. Cette procédure a été rapportée sous forme de cas cliniques uniquement, mais pourrait avoir un avantage certain en termes d'encombrement intrathoracique. De plus, la pompe utilisée (HeartMate 3™) dispose d'un certain recul et d'une fiabilité reconnue, même si son usage dans cette configuration n'est pas validé [34].

■ Résultats cliniques

Dispositif d'assistance ventriculaire gauche

L'évolution des résultats de l'assistance monoventriculaire a été constante et significative au cours des 30 dernières années. Actuellement, la survie globale à 1 an après la pose d'une assistance monoventriculaire gauche de dernière génération est de l'ordre de 85 % [16, 37-39].

Tableau 1.
Survie globale des assistances monoventriculaires gauches.

	EUROMACS	FRANCEMACS	INTERMACS
Survie :			
1 an (%)	70,0	64,7	82,3
3 ans (%)	65,5	55,8	63,5
5 ans (%)	44,5	51,6	46,8
Profil INTERMACS 1 (%)	14	36	18
Profil INTERMACS 2 (%)	26	19	30
ECMO préopératoire (%)	5,9	31,7	11,5

ECMO : oxygénation par membrane extracorporelle ; EUROMACS : European Registry for Patients with Mechanical Circulatory Support ; INTERMACS : Interagency Registry for Mechanically Assisted Circulatory Support.

Les patients en attente de greffe, plus jeunes et très sélectionnés, ont une survie qui dépasse 90 % à 1 an. La survie sous dispositif d'assistance ventriculaire gauche est désormais comparable à celle de la transplantation cardiaque, à courte échéance (3 à 5 ans après l'implantation), et sans tenir compte de la qualité de vie (meilleure pour la greffe). Les patients implantés en alternative à la greffe sont en général plus fragiles et plus âgés, avec une survie à 1 an de l'ordre de 80 % [40-42].

Les survies à 5 ans en attente de greffe et en implantation permanente sont respectivement de l'ordre de 85 et 50 % [42]. En comparaison, la mortalité à 1 an après une première hospitalisation pour décompensation cardiaque est de 30 %, et de 65 à 70 % à 5 ans [43].

Les résultats européens et surtout français sont moins bons, avec une survie globale à 1 an de 65 %. Cette différence de résultats s'explique par le choix des patients implantés et la sélection des candidats. Nous implantons en France les patients les plus lourds, avec une grande proportion de patients INTERMACS 1 et sous ECMO [18, 44] (Tableau 1).

À propos des complications [16, 37-39, 44, 45] : le taux d'accident vasculaire cérébral est de 6 % à 3 mois et de l'ordre de 8 % à 1 an [45], le taux de saignement majeur est de 20 % à 3 mois et de 18 % à 1 an (dont une grosse moitié de saignements digestifs). À l'avenir, la diminution de l'*international normalized ratio* cible et l'éventuel arrêt des antiagrégants plaquettaires devraient diminuer ces complications. Les dysfonctions/thrombi de pompes sont rares, autour de 1 % à 3 mois et de 5 % à 1 an [39].

La miniaturisation des dispositifs n'a pas réussi à enrayer l'apparition d'infections majeures. Ce risque est de l'ordre de 30 à 60 % à 2 ans pour les pompes de troisième génération [18, 39, 44, 46-48]. La principale porte d'entrée est le câble d'alimentation électrique. Elle s'étend vers la loge de la pompe. La localisation du câble ne semble pas être associée aux risques infectieux. La recherche se fait donc vers la recharge sans câbles et la transduction de données sans fils.

Le second défi auquel fait face l'assistance monoventriculaire gauche est l'insuffisance cardiaque droite, qui touche plus de 30 % des patients à 5 ans [39, 49]. Celle-ci peut être due à l'évolution de la maladie initiale, à l'augmentation de la précharge droite (effet de succion de la pompe sur le septum interventriculaire, perte du raccourcissement septal par traction de la pompe à l'apex), à la perfusion coronaire, etc. Cette complication reste un enjeu de la prise en charge au long cours de ces patients.

La survenue de troubles du rythme ventriculaire concerne 30 % des patients dans les 5 premières années [50-53]. Elle représente un risque important de mortalité à 30 jours (risque relatif : 7). Sa prise en charge est complexe, médicale, interventionnelle et hémodynamique. Elle nécessite la disponibilité d'un plateau technique et expert important.

Dispositifs d'assistance biventriculaire et ventriculaire droit

Il est plus difficile de rendre un tableau net des résultats de l'assistance monoventriculaire droite et biventriculaire, car les données sont bien moins importantes.

En biventriculaire, les registres EUROMACS et INTERMACS montrent une survie autour de 50 % à 1 an [30, 54], possiblement plus faible chez les patients porteurs d'un cœur total artificiel (type Syncardia®) ou d'une pompe biventriculaire pulsatile, mais sans atteindre la significativité.

Les principales complications (saignements, infections, événement neurologique et panne de dispositif/thrombose) ne sont pas significativement différentes entre les pompes, avec une survie libre de dysfonction de la pompe autour de 85 %, libre de saignement majeur autour de 80 %, libre d'infection autour de 70 % et d'événements neurologiques autour de 80 % à 1 an. Il faut noter que les thromboses de pompe semblent plus fréquentes du côté droit que du côté gauche [29].

Certaines études récentes viennent cependant contrebalancer ces résultats. La principale critique qui doit être faite est l'utilisation du dispositif HeartWare™ (plus commercialisé actuellement) dans les séries EUROMACS et INTERMACS. Ainsi, une série australienne rapporte une survie de 90 % avec un support biventriculaire type double HeartMate 3™ à 1 an [29]. En comparaison, dans le même centre, la survie d'un patient implanté d'une assistance monoventriculaire gauche isolée était de 85 %. La correction d'une fuite tricuspide pendant une chirurgie d'implantation d'assistance monoventriculaire gauche reste controversée, même si une revue récente ne la recommande pas systématiquement [55].

De façon générale, les résultats rapportés sont surtout la conséquence de la sélection des patients implantés : plus les malades sont implantés tardivement avec un INTERMACS bas, moins bons sont les résultats cliniques. D'autre part, cette activité est étroitement liée à l'accès à la transplantation cardiaque, qui est variable selon les pays et la législation en vigueur.

Carmat®

En 2012, le premier cœur artificiel total pulsatile, biocompatible et à adaptation automatique du flux, « Carmat® », a été implanté [35]. Le 10 février 2025, la société annonçait avoir implanté le 100^e patient. La plus longue implantation a dépassé les 20 mois.

L'étude pilote publiée en janvier 2018 rapportait l'expérience de quatre patients (3 implantations définitives et 1 en attente de greffe, âgés de 58 à 76 ans) [56]. La durée d'implantation pour ces patients était de 74, 270, 254 et 20 jours. Les causes de décès étaient deux dysfonctions de machine, une défaillance multiviscérale et une insuffisance respiratoire. L'étude pivot incluant 15 patients en 2020 a permis l'obtention du marquage CE. Dans cette courte étude, la survie à 6 mois était de 70 % en attente de greffe, avec l'obtention ou non d'un greffon cardiaque. Le fabricant ne rapportait pas d'hémolyse, ni d'accident vasculaire cérébral, de saignement gastro-intestinal, d'infection de câble. En 2021, le dispositif reçoit l'autorisation de la Food and Drug Administration [57].

L'étude contrôlée multicentrique (10 centres français) EFICAS a été lancée en octobre 2022. Elle compare le dispositif Carmat® aux autres prises en charge (médicale ou chirurgicale) chez les patients candidats à l'assistance circulatoire biventriculaire en attente de greffe. En mai 2024, elle comptait 26 patients, avec des résultats

intermédiaires rapportant une survie à 6 mois (patient transplanté ou non) à 75 % (communiqué du fabricant). L'étude était complète en mai 2025 et ses résultats définitifs sont en attente.

BiVACOR®, ReinHeart®, SmartHeart®

Le dispositif australien BiVACOR® est un cœur artificiel total qui a été implanté chez l'homme pour la première fois en 2024. Le patient a été transplanté 8 jours plus tard avec succès [36]. Il s'agit d'une pompe centrifuge par lévitation, pulsatile (variation de la vitesse), à énergie magnétique et hydrodynamique. Il répond à la problématique de la taille (chez la femme et l'enfant).

Le dispositif allemand ReinHeart® est un cœur artificiel total pulsatile à membranes qui adapte son volume d'éjection automatiquement. Il n'a pas encore été implanté chez l'homme.

Le dispositif américain SmartHeart® est l'association de 2 pompes rotatives. Il s'agit d'un cœur artificiel total à flux continu, développé par la Cleveland Clinic aux États-Unis. Des expérimentations in vitro et chez l'animal ont été rapportées mais il n'a pas encore été implanté chez l'homme.

■ Conclusion

L'assistance circulatoire mécanique de longue durée a fait des progrès considérables ces dernières années. Son développement au sein de centres transplantateurs experts est à encourager.

Le défi reste de choisir la bonne pompe, au bon moment, pour le bon patient, en respectant les limites de la nature humaine.

Déclaration de liens d'intérêts : les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts en relation avec cet article.

■ Références

- [1] McDonagh TA, Metra M, Adamo M, Gardner RS, Baumbach A, Böhm M, et al. 2021 ESC guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure. *Eur Heart J* 2021;**42**(36):3599–726.
- [2] Crespo-Leiro MG, Metra M, Lund LH, Milicic D, Costanzo MR, Filipatos G, et al. Advanced heart failure: a position statement of the Heart Failure Association of the European Society of Cardiology. *Eur J Heart Fail* 2018;**20**(11):1505–35.
- [3] Stevenson LW, Pagani FD, Young JB, Jessup M, Miller L, Kormos RL, et al. INTERMACS profiles of advanced heart failure: the current picture. *J Heart Lung Transplant* 2009;**28**(6):535–41.
- [4] Goldstein DJ, Meyns B, Xie R, Cowger J, Pettit S, Nakatani T, et al. Third annual report from the ISHLT mechanically assisted circulatory support registry: a comparison of centrifugal and axial continuous-flow left ventricular assist devices. *J Heart Lung Transplant* 2019;**38**(4):352–63.
- [5] Barge-Caballero E, Segovia-Cubero J, Almenar-Bonet L, Gonzalez-Vilchez F, Villa-Arranz A, Delgado-Jimenez J, et al. Preoperative INTERMACS profiles determine postoperative outcomes in critically ill patients undergoing emergency heart transplantation: analysis of the Spanish National Heart Transplant Registry. *Circ Heart Fail* 2013;**6**(4):763–72.
- [6] Kittleson MM, Shah P, Lala A, McLean RC, Pamboukian S, Horstmannshof DA, et al. INTERMACS profiles and outcomes of ambulatory advanced heart failure patients: a report from the REVIVAL registry. *J Heart Lung Transplant* 2020;**39**(1):16–26.
- [7] Gustafsson F, Rogers JG. Left ventricular assist device therapy in advanced heart failure: patient selection and outcomes. *Eur J Heart Fail* 2017;**19**(5):595–602.
- [8] Rose EA, Gelijns AC, Moskowitz AJ, Heitjan DF, Stevenson LW, Dembitsky W, et al. Long-term use of a left ventricular assist device for end-stage heart failure. *N Engl J Med* 2001;**345**(20):1435–43.
- [9] Potapov EV, Antonides C, Crespo-Leiro MG, Combes A, Färber G, Hannan MM, et al. 2019 EACTS expert consensus on long-term mechanical circulatory support. *Eur J Cardio-Thorac Surg* 2019;**56**(2):230–70.
- [10] Rogers JG, Butler J, Lansman SL, Gass A, Portner PM, Pasque MK, et al. Chronic mechanical circulatory support for inotrope-dependent heart failure patients who are not transplant candidates: results of the INTRIP trial. *J Am Coll Cardiol* 2007;**50**(8):741–7.

- [11] Slaughter MS, Rogers JG, Milano CA, Russell SD, Conte JV, Feldman D, et al. Advanced heart failure treated with continuous-flow left ventricular assist device. *N Engl J Med* 2009;**361**(23):2241–51.
- [12] Starling RC, Naka Y, Boyle AJ, Gonzalez-Stawinski G, John R, Jorde U, et al. Results of the post-U.S. Food and Drug Administration-approval study with a continuous flow left ventricular assist device as a bridge to heart transplantation: a prospective study using the INTERMACS (Interagency Registry for Mechanically Assisted Circulatory Support). *J Am Coll Cardiol* 2011;**57**(19):1890–8.
- [13] Rogers JG, Pagani FD, Tatroles AJ, Bhat G, Slaughter MS, Birks EJ, et al. Intrapericardial left ventricular assist device for advanced heart failure. *N Engl J Med* 2017;**376**(5):451–60.
- [14] Truby LK, Farr MA, Garan AR, Givens R, Restaino SW, Latif F, et al. Impact of bridge to transplantation with continuous-flow left ventricular assist devices on posttransplantation mortality. *Circulation* 2019;**140**(6):459–69.
- [15] Goldstein DJ, Naka Y, Horstmannshof D, Ravichandran AK, Schroder J, Ransom J, et al. Association of clinical outcomes with left ventricular assist device use by bridge to transplant or destination therapy intent: the multicenter study of MagLev technology in patients undergoing mechanical circulatory support therapy with HeartMate 3 (MOMENTUM 3) randomized clinical trial. *JAMA Cardiol* 2020;**5**(4):411–9.
- [16] Mehra MR, Uriel N, Naka Y, Cleveland JC, Yuzefpolskaya M, Salerno CT, et al. A fully magnetically levitated left ventricular assist device. Final report. *N Engl J Med* 2019;**380**(17):1618–27.
- [17] Heidenreich PA, Bozkurt B, Aguilar D, Allen LA, Byun JJ, Colvin MM, et al. 2022 AHA/ACC/HFSA guideline for the management of heart failure: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on Clinical Practice Guidelines. *Circulation* 2022;**145**(18):e895–1032.
- [18] Loisanche D, Vohé P. Rapport 23-06. Assistance et remplacement cardiaque mécaniques. *Bull Acad Natl Med* 2023;**207**(6):685–94.
- [19] Baumwol J. I Need Help”: a mnemonic to aid timely referral in advanced heart failure. *J Heart Lung Transplant* 2017;**36**(5):593–4.
- [20] Jouan J, Latrémouille C, Baron O, Fabiani JN, Duveau D. Assistance circulatoire : définition, techniques, indications. *EMC Techniques chirurgicales – Thorax* 2019;**14**(3):1–10 [Article 42-515-A].
- [21] Bozkurt B, Coats AJS, Tsutsui H, Abdelhamid CM, Adamopoulos S, Albert N, et al. Universal definition and classification of heart failure: a report of the Heart Failure Society of America, Heart Failure Association of the European Society of Cardiology, Japanese Heart Failure Society and Writing Committee of the Universal Definition of Heart Failure: endorsed by the Canadian Heart Failure Society, Heart Failure Association of India, Cardiac Society of Australia and New Zealand, and Chinese Heart Failure Association. *Eur J Heart Fail* 2021;**23**(3):352–80.
- [22] Vincentelli A, Pya Y, Netuka I, Haneya A, Schmitt J, Kindo M, et al. Implantation technique for the Aeson total artificial heart. *Oper Tech Thorac Cardiovasc Surg* 2024;**29**(2):149–67.
- [23] Loforte A, Bottio T, Attisani M, Suarez SM, Tarzia V, Pocar M, et al. Conventional and alternative sites for left ventricular assist device inflow and outflow cannula placement. *Ann Cardiothorac Surg* 2021;**10**(2):281–8.
- [24] Agence de la biomédecine de la biomédecine. Guide du « score cœur ». 2025. <https://www.agence-biomedecine.fr/fr/don-et-greffe-d-organes/guide-du-score-coeur-v7-avril-2024>.
- [25] Kirklin JK, Pagani FD, Goldstein DJ, John R, Rogers JG, Atluri P, et al. American Association for Thoracic Surgery/International Society for Heart and Lung Transplantation guidelines on selected topics in mechanical circulatory support. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2020;**159**(3):865–96.
- [26] Bouabdallaoui N, El-Hamamsy I, Pham M, Giraldeau G, Parent MC, Carrier M, et al. Aortic regurgitation in patients with a left ventricular assist device: a contemporary review. *J Heart Lung Transplant* 2018;**37**(11):1289–97.
- [27] Bhat S, Mathew J, Balakrishnan KR, Krishna Kumar R. Effect of outflow graft size on flow in the aortic arch and cerebral blood flow in continuous flow pumps: possible relevance to strokes. *ASAIO J* 2017;**63**(2):14–9.
- [28] Garbade J, Meyer AL. Cardiac transplantation after HeartMate 3 implantation inclusive implantation tips: step by step. *Oper Tech Thorac Cardiovasc Surg* 2019;**24**(3):187–203.
- [29] Marasco SF, McLean J, Kure CE, Rix J, Lake T, Linton A, et al. HeartMate 3 implantation with an emphasis on the biventricular configuration. *Artif Organs* 2024;**48**(6):655–64.
- [30] Vierecke J, Gahl B, de By TMMH, Antretter H, Beyersdorf F, Caliskan K, et al. Results of primary biventricular support: an analysis of data from the EUROMACS registry. *Eur J Cardio-Thorac Surg* 2019;**56**(6):1037–45.

- [31] Eulert-Grehn JJ, Lanmüller P, Schönraht F, Solowjowa N, Müller M, Mulzer J, et al. Two implantable continuous-flow ventricular assist devices in a biventricular configuration: technique and results. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2018;**27**(6):938–42.
- [32] Stein ML, Yeh J, Reinhartz O, Rosenthal DN, Kaufman BD, Almond CS, et al. HeartWare HVAD for biventricular support in children and adolescents: the Stanford experience. *ASAIO J* 2016;**62**(5):e46–51.
- [33] Lebreton G, Mastroianni C, Amour J, Leprince P. Implantation of two HVADs used as a total artificial heart: a new approach. *Ann Thorac Surg* 2019;**107**(3):e165–7.
- [34] Hanke JS, Dogan G, Haverich A, Schmitt JD. Implantation of two HeartMate 3s in the setting of a total artificial heart. *Oper Tech Thorac Cardiovasc Surg* 2021;**26**(1):67–80.
- [35] Carpentier A, Latrémouille C, Cholley B, Smadja DM, Roussel JC, Boissier E, et al. First clinical use of a bioprosthetic total artificial heart: report of two cases. *Lancet Lond Engl* 2015;**386**(10003):1556–63.
- [36] Shah AM. First successful implant of BiVACOR's total artificial heart. *Artif Organs* 2024;**48**(10):1075–6.
- [37] Mehra MR, Naka Y, Uriel N, Goldstein DJ, Cleveland JC, Colombo PC, et al. A fully magnetically levitated circulatory pump for advanced heart failure. *N Engl J Med* 2017;**376**(5):440–50.
- [38] Schaeffer T, Pfister O, Mork C, Mohacsi P, Rueter F, Scheifele S, et al. 5-year results of a newly implemented mechanical circulatory support program for terminal heart failure patients in a Swiss non-cardiac transplant university hospital. *J Cardiothorac Surg* 2021;**16**(1):64.
- [39] Yuzefpolskaya M, Schroeder SE, Houston BA, Robinson MR, Gosev I, Reyentovich A, et al. The Society of Thoracic Surgeons Intermacs 2022 annual report: focus on the 2018 heart transplant allocation system. *Ann Thorac Surg* 2023;**115**(2):311–27.
- [40] Schmitt JD, Pya Y, Zimpfer D, Krabatsch T, Garbade J, Rao V, et al. Long-term evaluation of a fully magnetically levitated circulatory support device for advanced heart failure-two-year results from the HeartMate 3 CE mark study. *Eur J Heart Fail* 2019;**21**(1):90–7.
- [41] Zimpfer D, Gustafsson F, Potapov E, Pya Y, Schmitt JD, Berchtold-Herz M, et al. Two-year outcome after implantation of a full magnetically levitated left ventricular assist device: results from the ELEVATE registry. *Eur Heart J* 2020;**41**(39):3801–9.
- [42] Kikoïne J, Nowacka A, Schukraft S, Abdurashidova T, Yerly P, Tozzi P, et al. Clinical outcomes of HeartMate 3 left ventricular assist device support with a bridge to transplant vs a destination therapy strategy: a single-centre retrospective cohort. *Swiss Med Wkly* 2024;**154**:3529.
- [43] Barker WH, Mullooly JP, Getchell W. Changing incidence and survival for heart failure in a well-defined older population, 1970-1974 and 1990-1994. *Circulation* 2006;**113**(6):799–805.
- [44] Anselmi A, Galand V, Vincentelli A, Boule S, Dambrin C, Delmas C, et al. Current results of left ventricular assist device therapy in France: the ASSIST-ICD registry. *Eur J Cardio-Thorac Surg* 2020;**58**(1):112–20.
- [45] Colombo PC, Mehra MR, Goldstein DJ, Estep JD, Salerno C, Jorde UP, et al. Comprehensive analysis of stroke in the long-term cohort of the MOMENTUM 3 study. *Circulation* 2019;**139**(2):155–68.
- [46] Zijderhand CF, Antonides CFJ, Veen KM, Verkaik NJ, Schoenrath F, Gummert J, et al. Left ventricular assist device-related infections and the risk of cerebrovascular accidents: a EUROMACS study. *Eur J Cardio-Thorac Surg* 2022;**62**(5):ezac421.
- [47] Jorde UP, Saeed O, Koehl D, Morris AA, Wood KL, Meyer DM, et al. The Society of Thoracic Surgeons Intermacs 2023 annual report: focus on magnetically levitated devices. *Ann Thorac Surg* 2024;**117**(1):33–44.
- [48] Tattevin P, Flécher E, Auffret V, Leclercq C, Boulé S, Vincentelli A, et al. Risk factors and prognostic impact of left ventricular assist device-associated infections. *Am Heart J* 2019;**214**:69–76.
- [49] Rivas-Lasarte M, Kumar S, Derbala MH, Ferrall J, Cefalu M, Rashid SMI, et al. Prediction of right heart failure after left ventricular assist implantation: external validation of the EUROMACS right-sided heart failure risk score. *Eur Heart J Acute Cardiovasc Care* 2021;**10**(7):723–32.
- [50] Clerkin KJ, Topkara VK, Demmer RT, Dizon JM, Yuzefpolskaya M, Fried JA, et al. Implantable cardioverter-defibrillators in patients with a continuous-flow left ventricular assist device: an analysis of the INTERMACS registry. *JACC Heart Fail* 2017;**5**(12):916–26.
- [51] Santangeli P, Rame JE, Birati EY, Marchlinski FE. Management of ventricular arrhythmias in patients with advanced heart failure. *J Am Coll Cardiol* 2017;**69**(14):1842–60.
- [52] Galand V, Flécher E, Auffret V, Pichard C, Boulé S, Vincentelli A, et al. Early ventricular arrhythmias after LVAD implantation is the strongest predictor of 30-day post-operative mortality. *JACC Clin Electrophysiol* 2019;**5**(8):944–54.
- [53] Galand V, Flécher E, Auffret V, Boulé S, Vincentelli A, Dambrin C, et al. Predictors and clinical impact of late ventricular arrhythmias in patients with continuous-flow left ventricular assist devices. *JACC Clin Electrophysiol* 2018;**4**(9):1166–75.
- [54] Ahmed MM, Jacobs JP, Meece LE, Jeng EI, Bleiweis MS, Cantor RS, et al. Timing and outcomes of concurrent and sequential biventricular assist device implantation: a Society of Thoracic Surgeons Intermacs analysis. *Ann Thorac Surg* 2023;**116**(2):383–90.
- [55] Hwang B, Doyle M, Williams ML, Joshi Y, Iyer A, Watson A, et al. Concomitant tricuspid valve surgery in patients with significant tricuspid regurgitation undergoing left ventricular assist device implantation: a systematic review and meta-analysis. *Artif Organs* 2024;**48**(12):1392–403.
- [56] Latrémouille C, Carpentier A, Leprince P, Roussel JC, Cholley B, Boissier E, et al. A bioprosthetic total artificial heart for end-stage heart failure: results from a pilot study. *J Heart Lung Transplant* 2018;**37**(1):33–7.
- [57] Han JJ. Aeson, the Carmat total artificial heart is approved for enrollment in the United States. *Artif Organs* 2021;**45**(5):445–6.

C. de La Bourdonnaye, MD.

Département de chirurgie cardiaque, thoracique et vasculaire, CHU de Rennes, 2, rue Henri-Le-Guilloux, 35000 Rennes, France.

N. Dib, MD.

Département de chirurgie cardiaque, thoracique et vasculaire, Pôle cardiothoracique du CHU de Bordeaux, Hôpital Haut-Lévêque, Groupe hospitalier Sud, avenue de Magellan, 33604 Pessac cedex, France.

A. Buschiazio, MD.

M. Aymami, MD, PhD.

M. Charton, MD.

E. Flécher, MD, PhD (erwan.flecher@chu-rennes.fr).

J. Tomasi, MD, PhD.

Département de chirurgie cardiaque, thoracique et vasculaire, CHU de Rennes, 2, rue Henri-Le-Guilloux, 35000 Rennes, France.

Toute référence à cet article doit porter la mention : de La Bourdonnaye C, Dib N, Buschiazio A, Aymami M, Charton M, Flécher E, et al. Assistance circulatoire mécanique de longue durée. *EMC - Techniques chirurgicales - Thorax* 2025;0(0):1-12 [Article 42-512].