

Circulation Extra Corporelle et cardiopathies congénitales

Quelques chiffres

- Malformations cardiaques : 1 % des naissances
- 3 500 CEC pédiatriques en France / an
- 10 centres de chirurgie cardiaque congénitale



Particularités des enfants

- Volémie et Poids réduits
- Immaturité des organes
- Besoins métaboliques élevés
- Cœur néonatal peu compliant
- Cardiopathies complexes avec réparations intracardiaques

Les pompes



Centrifuge – circuit clos



Occlusive – circuit ouvert

Les pompes

Revue de la littérature (2019)

Type de pompe	Avantages	Limites
Pompe occlusive	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle précis du débit • Réutilisable • Pas de flux rétrograde 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque de surpression • Mauvaise occlusion (sur ou sous-occlusion) • Hémolyse
Pompe centrifuge	<ul style="list-style-type: none"> • Moins d'activation des facteurs de coagulation et de la fibrinolyse • Moins d'hémolyse 	<ul style="list-style-type: none"> • Priming plus important • Plus cher • Flux rétrograde possible • Peut augmenter la durée d'hospitalisation

Medikonda R et al. J Cardiothorac Vasc Anesth. 2019

Le tubing

Le PVC :

- Problème des additifs : DEHP (Di Ethyl Hexyl Phtalate)
- PVC sans phtalate **obligatoire** depuis 2015 en pédiatrie et néonatalogie

Le silicone :

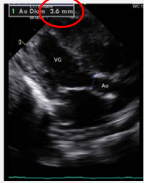
- Diminue l'agrégation plaquettaire et l'activation leucocytaire
- Rejet de particules (de l'ordre de 5µm)
- Risque de plicature



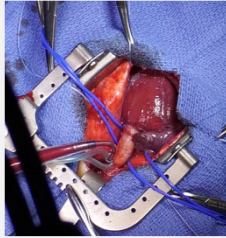
Les canules

Canule aortique : débit élevé autour de $3l \cdot min^{-1} \cdot m^{-2}$

- Pour un nouveau né de $0,20m^2$: $600 ml \cdot min^{-1}$

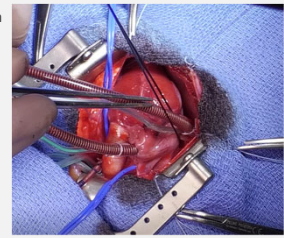
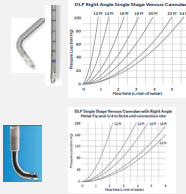


- 6 Fr → 2.0 mm ❌
- 8 Fr → 2.5 mm ✅
- 10 Fr → 3.3 mm ❌



Les canules

Canules veineuses : double canulation



L'hémodilution

Conséquences

- Diminue la pression oncotique
- Diminue l'hématocrite
- Augmente l'œdème tissulaire
- Baisse les résistances artérielles périphériques
- Diminue la concentration des plaquettes et des facteurs de coagulation

Nécessaire à basse température pour limiter la viscosité mais pas < 30%

Priming

Cristalloïde

Complicé en dessous de 15 kg

Volémie de la naissance à 1 an = $85ml \cdot kg^{-1}$

$$Ht_{cec} = \frac{Ht_{patient} \times volémie}{volémie + volume\ priming}$$

Sang

- Hb : quantité de CGR en fonction de l'Hb du patient et de la pathologie
- pH : correction bicar 8,4%
- K⁺ : CGR déplasmatisés pour la néo-nat (+/- dialyse du priming)
- Attention au Ca²⁺ (citrate)
- Héparine

Pourquoi réduire le priming sanguin ?

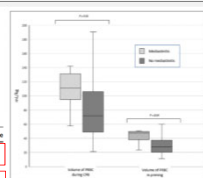
étude rétrospective 2024

208 patients inclus (de 3,8 à 10 kg)

- Groupe priming inf volume médian
- Groupe priming sup volume médian

Table 3. Postoperative data.

	High priming volume (n = 104)	Low priming volume (n = 104)	p-value
C-creatinine peak, mg/dL	511 ± 278	499 ± 263	0.87
CRP peak, mg/L	134 ± 67	110 ± 68	0.81
Procalcitonin peak, ng/mL	194 ± 75.7	137 ± 48.8	0.07
Respiratory conditions, n	68 (20-110)	5 (2-26)	0.01
ECMOVA, n	8 (7.7%)	5 (4.8%)	0.39
Extracorporeal membrane oxygenation, n	8 (7.7%)	7 (6.7%)	0.79
Reintubation, n	4 (3.8%)	3 (2.9%)	0.50
ICU stay, days	8 [4-9]	6 [2-8]	<0.01

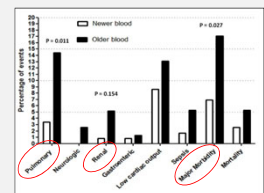
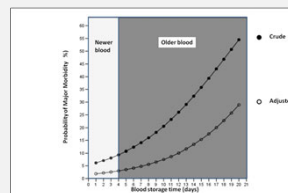


CRP, C-reactive protein; ECMOVA, extracorporeal membrane oxygenation veno-arterial; ICU, intensive care unit. Data are expressed as the mean ± SD, median [1st - 3rd quartile], or n (%). The values in bold are associated with p-values less than 0.05 and are statistically significant.

Mehrez et al. Perfusion 2024

Transfusion

Complications associées à l'augmentation du temps de stockage des CGR



Marco Ranucci et al. Crit Care 2009

Comment réduire le priming ?

- Taille tubing
- Taille oxygénateur
- Positionnement de la pompe
- Pompes déportées
- VAVD (Pas sans conséquence)



Les limites du VAVD



Une dépression trop importante entraîne une hémolyse



Passage possible d'air des fibres de l'oxygénateur vers la ligne artérielle

Les limites du VAVD



Augmente les micro embolies artériels gazeux



Les micro embolies sont responsables de troubles neurocognitifs

VAVD recommandations

Recommandations de l'Association Européenne de Chirurgie Cardio-Thoracique :

- Réservoir veineux rigide
- Monitoring de la dépression sur la ligne veineuse
- Pression négative excessive -> hémolyse

2024 EACTS/EACTA/EBCC Guidelines on cardiopulmonary bypass in adult cardiac surgery

Authors/Talk Topic Members: Alexander Vahlke (Germany), Jo-Chapman (Netherlands), Gabor Kuzsi (Hungary), Jo-Chapman (United Kingdom), Filip De Somer (Belgium), Jo-Chapman (Belgium), Henrik Agner-Wilde (Denmark), Benjamin Kibler (United Kingdom), Gerd Gellerauer (Germany), Adrian Bauer (Germany), Ingriden Sørensen (Denmark), Hanser Berg Ren (Denmark), Gerd Gellerauer (Belgium), Gerd Gellerauer (Denmark).

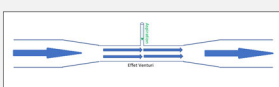
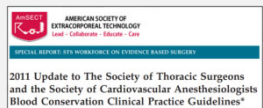
Relevant Guidelines: 2024 EACTS/EACTA/EBCC Guidelines on cardiopulmonary bypass in adult cardiac surgery.

Recommendations	Class ^a	Level ^b	Ref ^c
It is recommended that an approved venous reservoir be used for assisted venous drainage.	I	C	
It is recommended that the venous line pressure be monitored when using assisted venous drainage.	I	C	
Excessive negative venous pressures are not recommended due to the deleterious hemolytic effects.	III	B	[238]

VAVD recommandations

Recommandations société américaine de CEC :

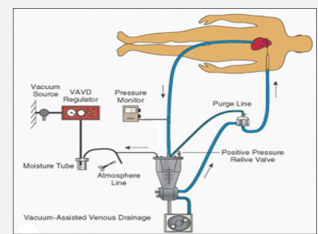
- Pression négative nette maximale d'environ -80 à -90 mmHg



(Pression négative nette = VAVD + effet Venturi)

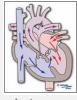
VAVD recommandations

- Pression négative minimale pour obtenir un retour veineux optimal
- Système d'ouverture rapide à la pression atm.
- Monitoring de la dépression veineuse
- Arrêt du vide avant l'arrêt de la pompe artérielle



Départ de la CEC

• Canal artériel perméable (atrésie pulmonaire, bialock...)
Laisser le cœur éjecter déséquilibre RAS / RAP
-> Inondation pulmonaire - vol systémique



• Naissance anormale du tronc coronaire gauche



• Veine cave supérieure gauche



• Cardiopathies cyanogènes
Démarrage en douceur
FIO2 ↓ Balayage faible



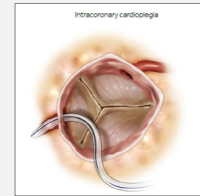
• MAPCA (Major Aorto Pulmonary Collateral Artery) et collatérales aorto-pulmonaires



Protection myocardique

Différents types de cardioprotégies

- Froide aux cristalloïdes
- Sanguine froide
- Sanguine chaude
- Antérograde / rétrograde

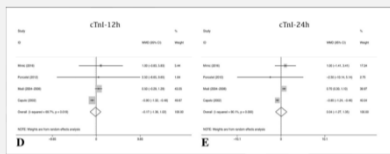


Protection myocardique

Méta-analyse (2017)

- 10 études : sanguine (n = 416) VS cristalloïde (n = 281)

[Troponine](#)

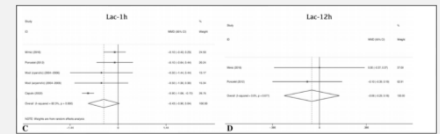


En faveur cpg sang ← → En faveur cpg cristalloïde

Mylonas KS et al. Pediatr Cardiol. 2017

Protection myocardique

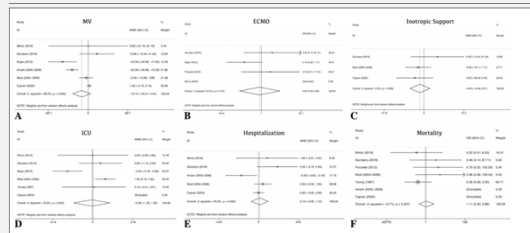
[Lactatémie](#)



En faveur cpg sang ← → En faveur cpg cristalloïde

Mylonas KS et al. Pediatr Cardiol. 2017

Protection myocardique



Mylonas KS et al. Pediatr Cardiol. 2017

Protection myocardique

Mesure des pressions d'injection obligatoire



Protection myocardique

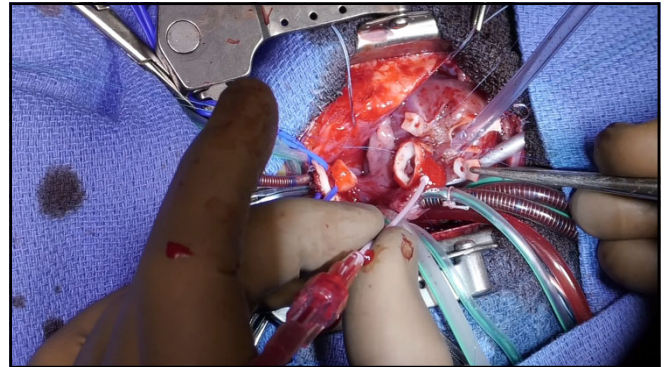
Pression d'injection max = perte de charge + ≈ 50 mmHg



Perte de charge : 23 mmHg



Perfusion cardioplégie
23 + 50 = 73 mmHg max.



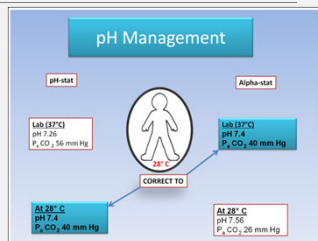
Hypothermie et gaz du sang

Alpha-stat :

- Interprétation des gaz du sang à 37°C
- Pas de correction à la température corporelle du patient

pH-stat :

- Interprétation des gaz du sang à la température du patient
- Apports en CO₂ dans les gaz de CEC

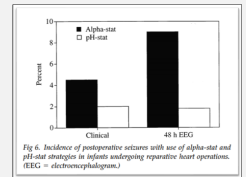


Hypothermie

40 patients (âge > 1 an) CEC pour cardiopathies cyanogènes (1998)

La stratégie pH-stat :

- Améliore l'oxygénation cérébrale
- Taux de lactate plus bas
- Moins de troubles neurologiques



Hickey PR et al. Ann Thorac Surg. 1998

Hypothermie

Étude prospective randomisée (2004) n = 40

Groupe 1 : alpha-stat vs groupe 2 : pH-stat

La stratégie pH-stat chez les patients cyanosés

- ↑ l'oxygénation cérébrale
- ↓ le taux de lactate
- ↓ la circulation collatérale pulmonaire systémique

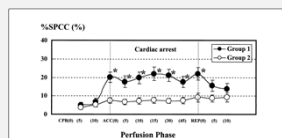


Figure 2. Change in %SPCC. The %SPCC was calculated according to the following equation using the pump flow rate, and recorded every 5 minutes. Abbrev: P_i CO₂ = P_i CO₂; P_e CO₂ = perfusate flow × average bicarbonate flow × 100.

Sakamoto T et al. J Thorac Cardiovasc Surg. 2004

Hypothermie

Revue de la littérature 2010

16 articles analysés :

- 1 article non concluant
- 4 en faveur de pH-stat (3 pédiatriques)
- 7 en faveur de alpha-stat
- 4 aucune différence

pH-stat : pédiatrique
Alpha-stat : adulte

Comparing the 16 studies based on the age of the patients studied, three out of the four papers which demonstrated that the pH-stat method is a better strategy to improve intraoperative and postoperative outcome were based on a sample of paediatric patients. Conversely, all seven papers that suggested alpha-stat method is associated with better intraoperative and postoperative outcome were based on studies done on adult patients. The remaining four papers suggested no significant difference between the pH-stat group and alpha-stat group.

In conclusion, there is evidence to suggest that the best technique to follow in the management of acid-base in patients undergoing deep hypothermic circulatory arrest during cardiac surgery is dependent upon the age of the patient with better results using pH-stat in the paediatric patient and alpha-stat in the adult patient.

Abdul Aziz MA et al. Interact Cardiovasc Thorac Surg. 2010

Anticoagulation

Nouveau né : tendance à l'hypercoagulabilité

- Système de la coagulation immature
- Augmentation de l'hématocrite
- Sensibilité plus faible à l'héparine : taux AT III variable, hémodilution

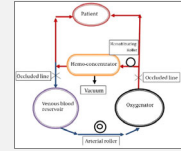
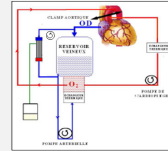
Héparine bolus
300 UI.kg⁻¹
Héparine en continu
100 UI.kg⁻¹.h⁻¹



ACT toutes les 30 min si > 400 s

Ultrafiltration

Ultrafiltration conventionnelle (CUF)	Ultrafiltration modifiée (MUF)
Pendant la CEC surtout après déclampage Veine → hémofiltre → réservoir	A la fin de la CEC, avant l'ablation des canules, pendant 15-20 min
Volémie constante, compensation du volume filtré par transfusion (PFC et/ou CGR)	Canule aortique → hémofiltre → canule veineuse compensation par le sang du réservoir



Ultrafiltration conventionnelle (CUF)

Recherche bibliographique de 1990 à 2018 : 90 études cliniques ou publications
L'hémofiltration en chirurgie cardiaque pédiatrique :

- Améliore la fonction myocardique
- Réduit la surcharge liquidienne et les saignements
- Réduit les cytokines pro-inflammatoires
- Améliore la fonction pulmonaire et la compliance



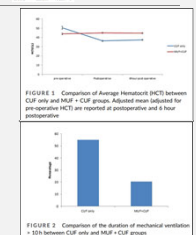
Juul Steyer et al. J Pediatr Congenit Heart Surg 2020

Ultrafiltration modifiée (MUF)

Étude randomisée (2021) 79 patients opérés de T4F
CUF (n = 40) VS CUF + MUF (n = 39)

CUF + MUF

- ↑ Hématocrite postopératoire
- ↓ Durée ventilation mécanique
- ↓ Inotropes
- ↓ taux d'interleukine-6 et de troponine-T



Talwar S et al. J Card Surg. 2021

Ultrafiltration

8 essais - 405 patients (2020)
CUF VS CUF + MUF

- volume d'ultrafiltrat

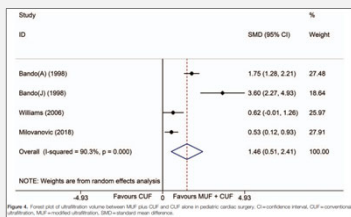


Figure 4. Forest plot of ultrafiltration volume between MUF and CUF only in pediatric cardiac surgery. CI=confidence interval, CUF=conventional ultrafiltration, MUF=modified ultrafiltration, SMD=standardized mean difference.

Hu J et al. 2021

Ultrafiltration

8 essais - 405 patients (2020)
CUF VS CUF + MUF

- Hématocrite post opératoire

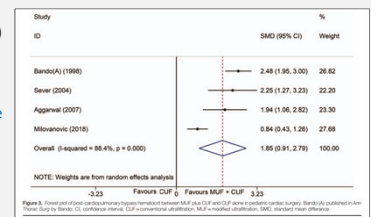


Figure 5. Forest plot of postoperative hematocrit between MUF and CUF only in pediatric cardiac surgery. Bando(A) published in J Thorac Surg by Bando, CI=confidence interval, CUF=conventional ultrafiltration, MUF=modified ultrafiltration, SMD=standardized mean difference.

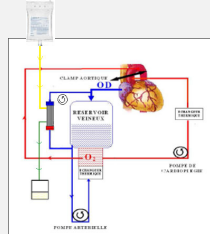
Hu J et al. 2021

Hémodiafiltration

Hémodialyse + hémofiltration
diffusif et convectif

Correction de l'hyperkaliémie
(priming et per CEC)

Hémofiltrat 80 Poche 5000 ml Gambro	
Na ⁺	140 mmol.l ⁻¹
Ca ²⁺	1.25 mmol.l ⁻¹
Mg ²⁺	0.5 mmol.l ⁻¹
Cl ⁻	109.5 mmol.l ⁻¹
Lactate	3 mmol.l ⁻¹
HCO ₃ ⁻	32 mmol.l ⁻¹
Pauvre en lactate	
Pas de K ⁺	
Pas de glucose	



Conduite de la CEC pédiatrique

DO_2 (AKI)

Adulte > 280 ml.min⁻¹.m⁻²

Pédiatrie > 353 ml.min⁻¹.m⁻²

Patients cyanogènes ?

VCO_2 (Hyperlactatémie)

Adulte < 60 ml.min⁻¹.m⁻²

Pédiatrie : ?

QR (DO_2 / VCO_2) < 5.0 : ?



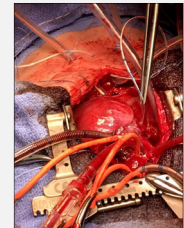
Sevrage de la CEC

L'hématocrite

- Respect de l'hématocrite physiologique du nouveau-né : 42 – 45%
- Ventricules peu compliants, difficultés pour réaliser une transfusion importante après arrêt de la CEC
- Anticiper une hémodilution obligatoire au moment de la transfusion plaquettaire (50 ml ...)

Sevrage de la CEC

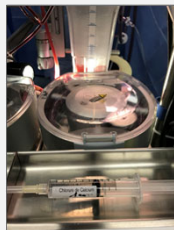
Pression de remplissage (POG)



Sevrage de la CEC

Homéostasie ionique

- Corriger l'hypocalcémie
Faible capacité de stockage
(contractilité sous la dépendance du Ca²⁺ extra cellulaire)
- Corriger l'hyperkaliémie
(Hémodiafiltration, bicar)



Sevrage de la CEC

Homéostasie thermique

- Eviter l'effet de l'hypothermie sur l'hémostase
- Eviter l'effet de l'hypothermie sur les résistances vasculaires périphériques
- Le frisson postopératoire augmente la VO₂

L'hyperthermie postopératoire augmente aussi la VO₂
(11% pour chaque °C)

A retenir...

Les enfants ont des besoins métaboliques élevés : débit de CEC autour de $3l \cdot min^{-1} \cdot m^{-2}$

Cœur peu compliant : Le monitoring des pressions de remplissage est une aide précieuse

Le VAVD permet de réduire le priming et la taille des canules mais sans dépasser -90 mmHg

Transfusion de CGR récents ou déplasmatisés / ultra-filtration $100 ml \cdot kg^{-1}$

Hypothermie en pédiatrie = Stratégie pH-stat

Corriger l'hypocalcémie au fur et à mesure mais attention dans le priming au sang

Monitorer les pressions de perfusion de la cardioplégie (efficacité / innocuité)

NIRS et gaz du sang en continu indispensables

Merci de votre attention

