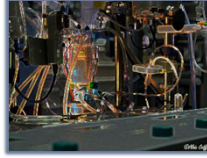


CONSEQUENCES PHYSIOPATHOLOGIQUES DE L'HYPOTHERMIE

Prof. Alexandre QUATTARA

Département d'Anesthésie-réanimation cardio-vasculaire,
INSERM, UMR 1034 Biologie des maladies cardiovasculaires
Hôpital Haut-Lévêque, CHU Bordeaux, 33600 Pessac, FRANCE



University of Minnesota
Hospital operating room on
September 2, 1952 near the
end of the **first successful
open heart operation** in
medical history.

Dr. F. John Lewis closed an
atrial septal defect under
direct visualization using
inflow stasis and moderate
total body hypothermia
(26°C).

In a 5-year-old girl who
remains alive and well today.
Postoperative heart
catheterization confirmed a
complete closure.



Lewis FJ et al. Surgery 1953;33:52-9

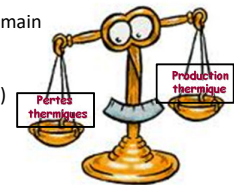
INTRODUCTION

- Homéothermes (humain et mammifères)
- Système thermorégulateur
- Maintien température centrale $37 \pm 0,2^\circ \text{C}$
- Zone de neutralité thermique
- Système régulateur : récepteurs (chaud et froid), voies afférentes, centre thermorégulateur, voies efférentes
- ≠ Poikilotherme : T° corporelle dépend du milieu ambiant



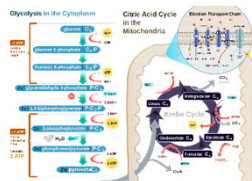
TEMPERATURE CENTRALE

- Etat physique
- Reflet contenu de chaleur du corps humain
- Bilan thermique (pertes vs production)
- Equilibre « finement régulé »



PRODUCTION DE CHALEUR

- Métabolisme oxydatif nutriments
- Consommatrice d'oxygène



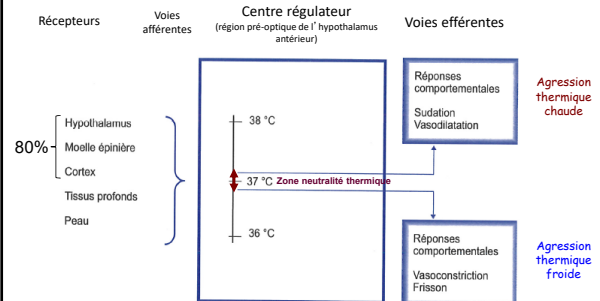
PERTES DE CHALEUR

- Radiation:
 - Sous forme rayonnement thermique (longueur d'onde dépend de la température)
- Convection
 - Refroidissement de la peau par le vent (ventilateur) ou par l'eau
- Conduction
 - Transfert de chaleur entre 2 objets en contact direct l'un avec l'autre (sur le sol, sur la table...)
- Evaporation:
 - Sudation +++
 - Pertes insensibles (respiration) 600 mL/24h = 390 Kcal/24h

PERTES DE CHALEUR

- 90% se font au travers de la peau
 - Par rayonnement (50%)
 - Par évaporation (22%)
 - Par convection (15%)
 - Par conduction (3%)
- 10% par évaporation lors de la respiration

THERMORÉGULATION CHEZ ADULTE



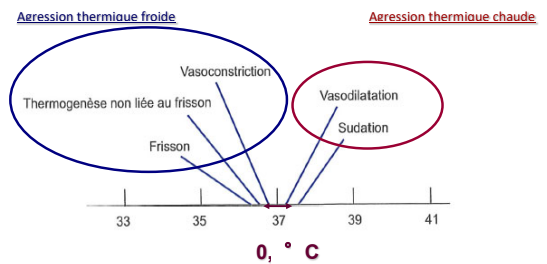
CENTRES THERMOREGULATEURS

- Région pré-optique-hypothalamus antérieur
- Intégration sous forme température corporelle moyenne
- Comparaison à zone de neutralité thermique étroite
- Seuil de réponse au chaud séparée par le seuil de réponse au froid de $0,2^{\circ}\text{C}$

Seesler D. N Engl J Med 1997;336:1730-7

- Voies efférentes:
 - Réponses comportementales (sautiller, courir, se couvrir...) seules à exister chez le poikilotherme
 - Réponses du système nerveux autonome
 - Mis en jeu si réactions comportementales inadéquates
 - Seuil de déclenchement +++

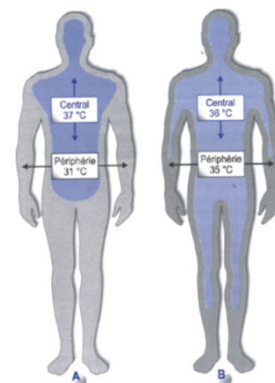
RÉPONSES DU SYSTÈME NERVEUX AUTONOME



A L'AGRESSION THERMIQUE CHAUDE

- Vasodilatation
 - Accroît le flux sanguin dans les capillaires cutanés (jusque 7,5 l/min)
 - Transfert de chaleur du compartiment central vers le compartiment périphérique
 - Élimination par sudation (synchronisation avec 2^{ème} mécanisme)
- Sudation
 - Changement de l'état de l'eau consommateur d'énergie (4,5 kJ/ml de sueur)
 - Perte d'autant importante que l'air au contact de la peau sera sec et renouvelé
 - Mécanisme limité par le débit maximal de sueur

Deux phénomènes couplés et donc synchrones +++



Phénomène de redistribution par vasodilatation (compartiment central vers périphérique)

A L'AGRESSION THERMIQUE FROIDE

- **Vasoconstriction**
 - Extrémités (doigts, orteils,...)
 - Réduction surface d'échange de chaleur entre peau et environnement mais aussi entre la compartiment central et périphérique
- **Frisson**
 - Seuil de déclenchement $< 1^{\circ}\text{C}$
 - Activité musculaire oscillatoire involontaire
 - Augmentation production chaleur (jusqu'à X6)
 - Consommation en oxygène (chute de la SvO_2)
 - Libération hormones de stress et catécholamines (morbidity cardiovasculaire potentielle)

Deux phénomènes découplés et asynchrones +++

Thermogénèse non liée au frisson

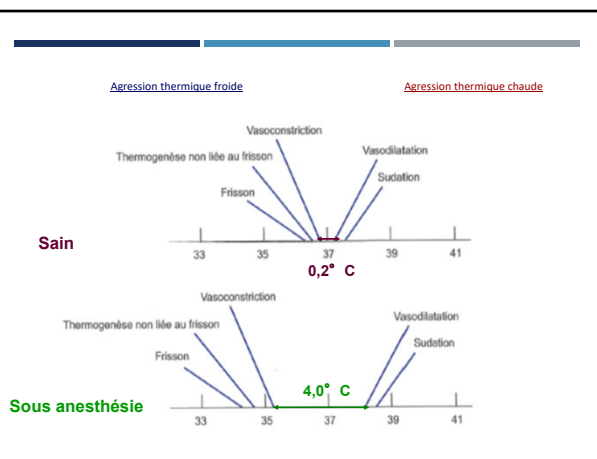
- Efficace surtout chez l'enfant
- Production métabolique de chaleur
- Muscles squelettiques et graisse brune
- Augmentation de la VO_2 sans production de travail mécanique
- Stimulée par libération adrénérquique

MODULATION RÉPONSES SYSTÈME NERVEUX AUTONOME (I)

- Variation seuil de déclenchement
 - Elargissement de la zone neutralité thermique
 - Diminution seuil de réponse à l'agression thermique froide
 - Augmentation seuil de réponse à l'agression thermique chaude
- Moindre adaptation aux conditions thermiques environnementales
- Tendance à l'hypothermie

MODULATION RÉPONSES SYSTÈME NERVEUX AUTONOME

- Age
- Substances : catécholamines, sérotonine, acétylcholine, peptides,
- Hormones sexuelles (décalage thermique du cycle menstruel)
- Paramètres physiques: pression artérielle, douleur
- Niveau d'éveil (cycle circadien, baisse température durant le sommeil)
- Alcool (sensible au froid de l'environnement)
- Hyperglycémie
- Médicaments (agents anesthésiques +++)

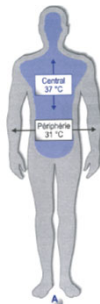


THERMORÉGULATION ET ANESTHÉSIE

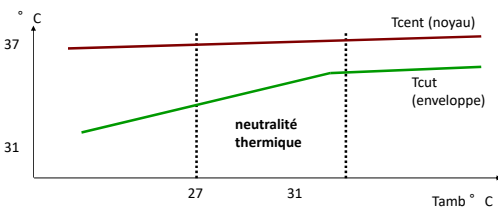
- Inhibition de la thermogénèse sans frisson
- Vasodilatation périphérique
- Réduction de la production de chaleur de 20%
- Hypothermie centrale importante: redistribution de la chaleur dans l'organisme du noyau vers la périphérie

MODÈLE CORPOREL À DEUX COMPARTIMENTS CALORIQUES

- **Compartiment central (axe cerveau, médiastin, organes digestifs)**
 - Température régulée autour de 37° C
 - Valeur optimale fonctionnement systèmes enzymatiques et mécanismes cellulaires
- **Compartiment périphérique (muscles=45% de masse corporelle)**
 - Température est peu régulée
 - < 2 à 4° C du compartiment central
 - Température dépend de la température centrale et environnementale
 - Zone d'échanges par conduction entre les deux compartiments
 - Zone tampon
 - Stockage et perte de chaleur
 - Préserve la mise en jeu du système thermorégulateur lors de modification du contenu de chaleur



SYSTÈME MIXTE (HOMÉOTHERME ET POÏKILOTHERME)



- Homéothermie ne concerne que le compartiment central (80 % de la masse corporelle)
- « Ecorce » ou compartiment périphérique est poïkilotherme

« AFTERDROP » EN CHIRURGIE CARDIAQUE

Modification température centrale par CEC

Ecorce de cinétique plus lente et donc plus froide (température environnement +++)

Gradient de température noyau/ecorce

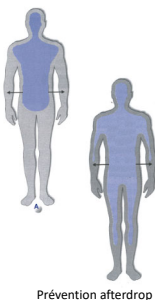
A l'arrêt du réchauffement, redistribution par conduction du noyau vers l'écorce

Chute de la température centrale en réanimation

AFTERDROP

Moyens de lutte contre l'afterdrop

1. Réchauffement péricorporel par air pulsé de l'écorce pour diminuer le gradient noyau
2. Vasodilatateurs permettant d'augmenter la part du noyau
3. Réchauffement progressif et lent



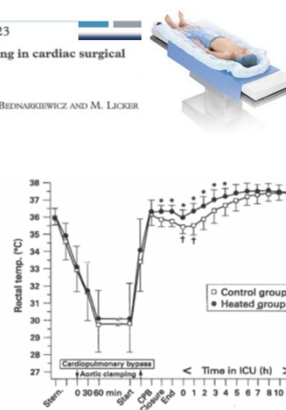
Prévention afterdrop

British Journal of Anaesthesia 1998; 80: 318-323

Benefits of intraoperative skin surface warming in cardiac surgical patients

L. HORN, A. SCHWEIZER, A. KALANOS, D. R. MOREL, M. BEHNARKEWICZ AND M. LICKER

	Heated group (n=43)	Control group (n=43)
Patient characteristics		
Age (yr)	60 (42-76)	66 (50-85)
Sex (M/F)	34/9	35/8
Body surface (m ²)	1.9 (1.6-2.1)	1.9 (1.6-2.2)
Left ventricular ejection fraction (%)	61 (31-88)	63 (33-84)
Preoperative antiaggregant and anticoagulant treatment		
Salicylates (n)	23	18
Heparin (n)	5	1
Dissected (n)	1	1
Surgical procedures		
CABG (n)	30	29
Valvular surgery (n)	9	8
Combined (n)	4	6
Aortic clamping (min)	99 (18-181)	101 (29-250)
CPB duration (min)	138 (49-217)	142 (48-297)
Anaesthesia, analgesia and sedation		
Fentanyl (µg kg ⁻¹)	58 (39-92)	61 (31-96)
Midazolam (mg kg ⁻¹)	0.7 (0.4-1.1)	0.8 (0.5-1.2)
Morphine (mg kg ⁻¹)	0.12 (0.04-0.19)	0.10 (0.03-0.17)

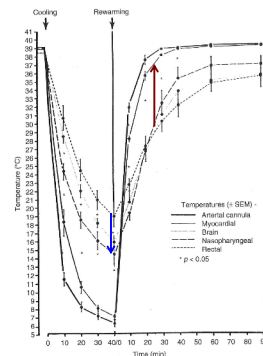


MESURE DE LA TEMPÉRATURE

- **Température périphérique**
 - Cutanée
- **Température centrale**
 - Naso-pharyngée
 - Œsophagienne (attention ré-injection artérielle)
 - Tympanique
 - Vésicale
 - Rectale

Cinétiques différentes ++++

Cinétiques différentes...



LES HYPOTHERMIES...

■ Hypothermie légère $34-36^{\circ}\text{C}$

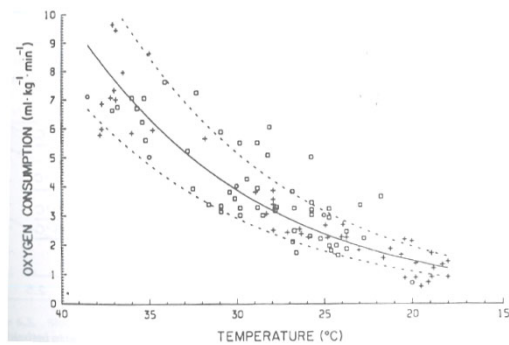
■ Hypothermie modérée $32-34^{\circ}\text{C}$

■ Hypothermie profonde $\leq 30^{\circ}\text{C}$

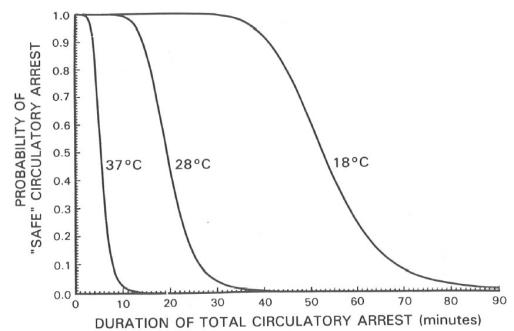
- Arrêt circulatoire + cérébro-plégie $24-26^{\circ}$ (Kazui et al. Ann Thorac Surg 1994)
- Arrêt circulatoire $18-20^{\circ}\text{C}$ (Crepps et al. Ann Thorac Surg 1987)

POURQUOI HYPOTHERMIE AU COURS DE LA CEC?

- Réduction métabolisme cellulaire et donc VO_2
 - Réduction vitesse processus biochimiques et réactions enzymatiques
- Meilleure protection d'organes (cœur, cerveau, rein)
 - Préservation des stocks ATP (stock énergétique cellulaire)
 - Moindre libération de neuro-transmetteurs excitateurs (glutamate)
 - Moindre perméabilité cellulaire
- Réduction du débit de perfusion d'assistance
 - Moindre traumatisme cellulaire
 - Moindre risque embolique
 - Champ opératoire parfaitement exsangue (retour bronchique, coronaire...)



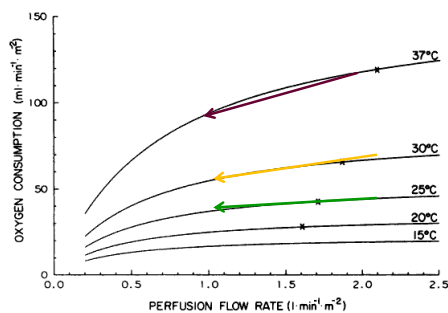
From Kirkin JW. Hypothermia, circulatory arrest and cardiopulmonary bypass. In Kirkin JW, Barratt-Boyes BG, eds. Cardiac surgery. New York: Churchill Livingstone, 1993:61-127



Nomogram of an estimate (not rigorously derived) of the probability of « safe » total circulatory arrest (absence of structural or functional damage) according to the arrest time, at nasopharyngeal temperatures of 37°C , 28°C and 18°C .

From Kirkin JW. Hypothermia, circulatory arrest and cardiopulmonary bypass. In Kirkin JW, Barratt-Boyes BG, eds. Cardiac surgery. New York: Churchill Livingstone, 1993:61-127

RÉDUCTION DU DÉBIT DE PERFUSION



■ $2,4 \text{ L.min}^{-1}.\text{m}^{-2}$ si T° entre 35 et 37°C

■ $1,8 \text{ L.min}^{-1}.\text{m}^{-2}$ si T° entre 28 et 33°C

HYPOTHERMIE ET SYSTÈME NERVEUX

- Hypothermie diminue le métabolisme cérébral et DSC
- Diminution de la libération des neurotransmetteurs (rôle neuroprotecteur)
- Perte de conscience à partir de 28° C
- Perte de la constriction pupillaire à 25° C
- Vitesse de conduction nerveuse diminuée
- Tonus musculaire augmenté

HYPOTHERMIE ET EEG

- EEG isoélectrique pour une $T^{\circ}C < 25^{\circ}C$ (BIS < 20+++)
- 21-24° C: pertes des composantes corticales précoces PES
- 13-18° C: perte des composantes sous corticales

HYPOTHERMIE ET SYSTÈME CARDIOVASCULAIRE

- Hypothermie légère (jusqu'à 34° C)
 - Mise en jeu des mécanismes thermorégulateurs (tachycardie, vasoconstriction, augmentation du débit cardiaque, HTA modérée)
- Hypothermie modérée (30-34° C)
 - Mécanismes thermorégulateurs sont dépassés
 - Bradycardie (répondant mal à l'atropine)
 - Effet inotrope négatif
 - Diminution débit cardiaque et pression artérielle
 - Augmentation des RVS (activité sympathique, catécholamines, viscosité sanguine)
 - Vasodilatation splanchnique
 - Diminution du seuil arythmogène

HYPOTHERMIE ET SYSTÈME CARDIOVASCULAIRE

- A partir de 28° C:
 - Trouble de conduction sino-atriale et auriculo-ventriculaire (anomalies des courants sodiques, potassiques et calciques)
 - Irritabilité ventriculaire
 - Fibrillation ventriculaire

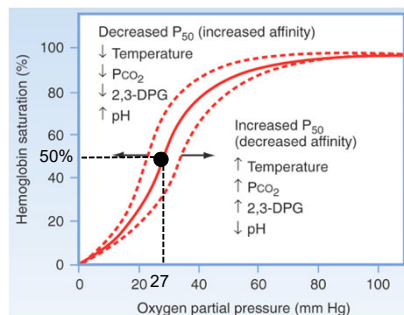
SYSTÈME RESPIRATOIRE

- Diminution ventilation minute proportionnelle à diminution de la VO_2
- Diminution réponse au CO_2 et à l'hypoxémie
- Diminution réflexe de toux et de la clairance mucociliaire

EQUILIBRE ACIDO-BASIQUE ET OXYGÉNATION

- Augmentation du coefficient de solubilité du CO_2
- Baisse de la production de CO_2 (diminution du métabolisme cellulaire)
- Baisse de la $PaCO_2$ et augmentation pH (alcalose)
- Déplacement de la courbe dissociation Hb vers la gauche (augmentation affinité de l' O_2 pour l'Hb)

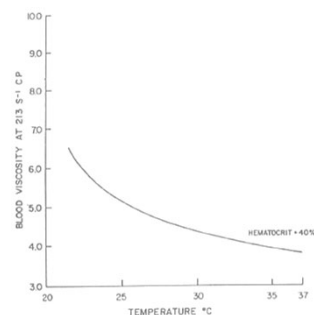
EVOLUTION DE LA COURBE DE DISSOCIATION DE L' HB EN FONCTION DE LA T° C



- Hypothermie augmente l' affinité de l' Hb pour O₂ de 5,7%/° C
- Moindre diffusion oxygène au tissu
- Mais diminution des besoins en O₂ de 7 à 8%/° C

MODIFICATIONS HYDRO-ÉLECTROLYTIQUES

- Séquestration liquidienne
- Rétention aiguë d'urine
- Iléus paralytique et stase des sécrétions digestives
- Augmentation viscosité sanguine
- Hyperglycémie par insulino-pénie relative



From Rand PW, Lacombe E, Hunt HE, Austin WH. Viscosity of normal human blood under normothermic and hypothermic conditions. J Appl Physiol 1964;19:117-122, as modified by Gordon RJ, Ravin MB, Dacrouff GR. Blood rheology. In Cardiovascular physiology for anaesthesiologists. Springfield, Illinois: Charles C Thomas, 1979:27-71

Nécessité d'une hémodilution ++++

SYSTÈME DE LA COAGULATION

Troubles de la coagulation

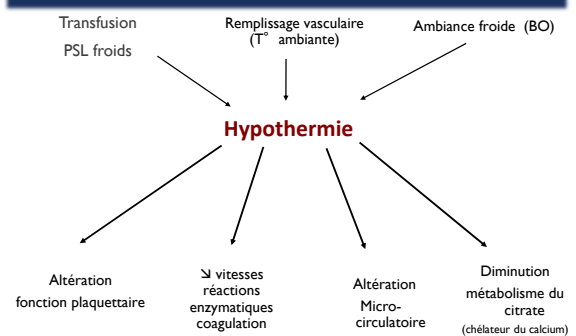
- par inhibition de la cascade de la coagulation (allongement du TP)

Dysfonction plaquettaire

- Activation plaquettaire par le thromboxane A2 est T° C dépendante
- Thrombopénie par sidération médullaire et séquestration hépatosplénique

Risque néanmoins d' accident thromboembolique

HYPOTHERMIE ET COMPÉTENCE HÉMOSTATIQUE

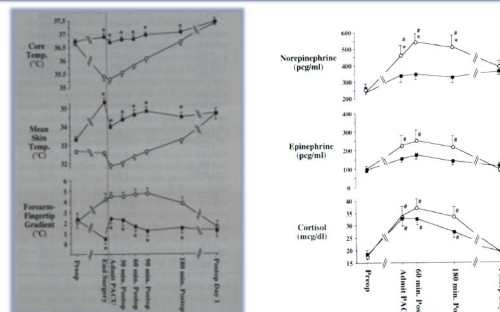


SYSTÈME IMMUNITAIRE

- Diminution chimiotactisme des polynucléaires
- Diminution phagocytose des bactéries

Frank SM et al. Anesthesiology 1995; 82:83-93

THE CATECHOLAMINES, CORTISOL AND HEMODYNAMIC RESPONSE TO MILD PERIOPERATIVE HYPOTHERMIA



MODIFICATIONS PHARMACOLOGIQUES DE L' HYPOTHERMIE

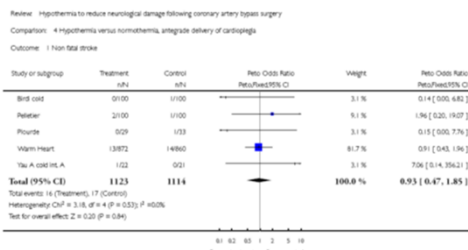
- Complexe car modifications multiples
- Diminution du volume de distribution des médicaments par réduction de la circulation musculaire et cutanée: augmentation de leur concentration sanguine
- Diminution filtration glomérulaire
- Diminution filtration hépatique: prodrogues non métabolisées

Hypothermia to reduce neurological damage following coronary artery bypass surgery (Review)

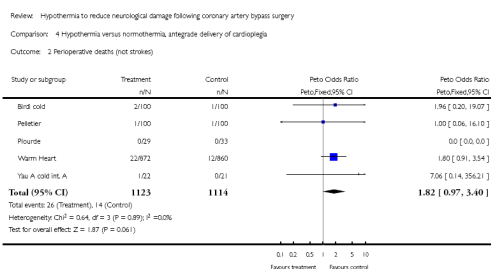
Rees K, Beranek-Stanley M, Burke M, Ebrahim S



Analysis 4.1. Comparison 4 Hypothermia versus normothermia, at-grade delivery of cardioplegia, Outcome 1 Non fatal stroke.



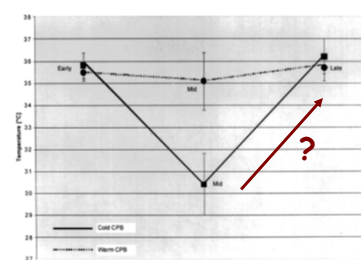
Analysis 4.2. Comparison 4 Hypothermia versus normothermia, at-grade delivery of cardioplegia, Outcome 2 Perioperative deaths (not strokes).



Prospective Randomized Trial of Normothermic versus Hypothermic Cardiopulmonary Bypass on Cognitive Function after Coronary Artery Bypass Graft Surgery

Alina M. Grogan, M.D., Joseph Mathew, M.D., Hilary P. Grocott, M.D., F.R.C.P.C., Joseph G. Reeves, M.D., James A. Blumenthal, Ph.D., William D. White, M.P.H., Peter K. Smith, M.D., Robert H. Jones, M.D., Jerry L. Kirchner, B.S., Daniel B. Mark, M.D., Mark F. Newman, M.D., Neurological Outcome Research Group, CARE Investigators of the Duke Heart Center

Anesthesiology 2001; 95:1110-9



RÈGLES DE BONNE PRATIQUE DU REFROIDISSEMENT ET DU RÉCHAUFFEMENT

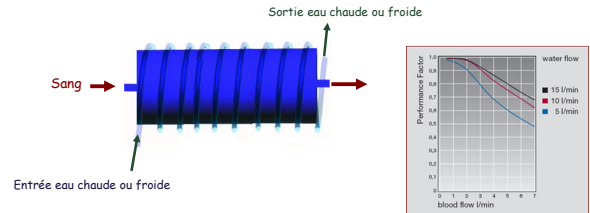
- Deux sites de mesures si hypothermie profonde ($<28^{\circ}\text{C}$)
- Gradient entre température sang veineux et eau échangeur thermique $<10^{\circ}\text{C}$
- Gradient de température veineuse et artériel $<2-3^{\circ}\text{C}$
- Gradient de température rectale et naso-pharyngée $<10^{\circ}\text{C}$
- Pas de ré-injection artérielle $>37,5^{\circ}\text{C}$
- Refroidissement $1^{\circ}\text{C}/3\text{min}$ (risque de lésions cérébrales si $>1^{\circ}\text{C}/2\text{min}$)
- Réchauffement ne doit pas être supérieur à $1^{\circ}\text{C}/5\text{min}$ (risque hyperthermie cérébrale, solubilité des gaz diminue avec l'augmentation de la température)

PRINCIPE DE L'ÉCHANGEUR THERMIQUE

Transfert énergie thermique d'un fluide à un autre (conduction)

A travers une membrane d'échange (aucun mélange +++)

Acier inoxydable ou fibre creuse en polyéthylène ou de polyuréthane



GÉNÉRATEUR THERMIQUE (« BLOC CHAUD-FROID »)

- Réchauffer ou refroidir le sang du circuit de CEC
- Echangeur thermique
- Plusieurs compartiments indépendants
- Refroidissement : eau froide ou bloc de glace (alimentation électrique constante+++)
- Procédure de maintenance (+++)

