



ELSEVIER
MASSON

Disponible en ligne sur www.sciencedirect.com

 ScienceDirect

Annales de réadaptation et de médecine physique 50 (2007) 209–217

ANNALES
de RÉADAPTATION
et de MÉDECINE PHYSIQUE

<http://france.elsevier.com/direct/ANNRMP/>

Article original

Évaluation d'un procédé de cryothérapie gazeuse hyperbare : effets thermiques et modulation vasomotrice neurovégétative

Physiological assessment of a gaseous cryotherapy device: thermal effects and changes in cardiovascular autonomic control

L. Mourot^{a,*}, C. Cluzeau^a, J. Regnard^{a,b}

^a Laboratoire de physiologie, faculté de médecine et de pharmacie, université de Franche-Comté, EA 3920 et IFR133, 25030 Besançon cedex, France

^b Service d'explorations fonctionnelles – physiologie, centre hospitalier universitaire, Besançon, France

Reçu le 2 octobre 2006 ; accepté le 3 janvier 2007

Résumé

Objectifs. – Cette étude avait pour but : 1) de comparer les refroidissements provoqués par projection (deux minutes) de microcristaux de CO₂ à haute pression (75 bars) et basse température (–78 °C) et par application (15 minutes) d'une poche à glace en latex et 2) de vérifier s'ils provoquaient des modifications d'activité neurovégétative cardiovasculaire. Les effets de ces stimulations ont été comparés à ceux d'une épreuve de « la main dans l'eau froide » (deux minutes).

Matériels et méthodes. – Les températures cutanées des deux mains, refroidie et non stimulée, la fréquence cardiaque (Fc), les pressions artérielles (PA) et leur contrôle neurovégétatif (analyse de variabilité de Fc et de PA) ont été évalués en continu chez huit sujets sains avant, pendant et après refroidissement du dos de la main gauche.

Résultats. – La projection de CO₂ provoque un abaissement brutal (–26 °C) et une remontée rapide des températures de la main gauche accompagnée d'une vasoconstriction de l'autre main, d'une augmentation significative des PA systémiques et d'un indicateur d'activité parasympathique cardiaque. La poche à glace diminue moins (–19 °C) et plus lentement les températures sans modifier significativement les PA ni les indices d'analyse des variabilités de Fc et de PA.

Conclusion. – Comme l'épreuve de la main dans l'eau froide, la projection de CO₂ provoque un « choc thermique » et déclenche une réponse vasoconstrictrice étendue avec modulation des activités ortho- et parasympathique. Les réponses vasculaires lors du refroidissement par poche à glace semblent localisées uniquement à la zone refroidie sans modulation généralisée d'activité neurovégétative cardiovasculaire.

© 2007 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Purpose. – The aim of the study was to assess thermal effects and cardiovascular autonomic control with application of a gaseous cryotherapy device to the hand.

Material and methods. – Before, during and after cooling of the left hand, we continuously evaluated cutaneous temperature of the right and left hands, as well as heart rate (HR) and arterial blood pressure (BP) and their neurovegetatif control (HR and BP variability) in 8 healthy subjects.

Comparison of cooling caused by projection of CO₂ microcrystals (2 min) under high pressure (75 bar) and low temperature (–78 °C) to that with application of a latex ice pack (15 min). Assessment of whether cooling triggered any changes in cardiovascular autonomic control, especially as compared with responses by the hand cold-pressure test (2 min).

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : mourotlaurent@hotmail.com (L. Mourot).

Results. – CO₂ projection in the left hand induced a steep decrease (–26 °C) in temperature followed by a rapid increase and a cutaneous vasoconstriction of the right hand, with significant increases in BP and cardiac parasympathetic activity. Cardiovascular responses were similar to those with application of the hand cold-pressure test. Application of an ice pack decreased cutaneous temperature to a lesser extent (–19 °C) and more slowly, without changing BP or indices of HR and BP variability.

Conclusion. – CO₂ projection caused “thermal shock” and triggered a systemic cutaneous vasoconstriction response, with activation of indices of both ortho- and parasympathetic activity, as with the hand cold-pressure test. Vascular responses during ice pack cooling appeared solely localised to the cooled area, without any significant change in autonomic cardiovascular control.

© 2007 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Système nerveux autonome ; Froid ; Analyse spectrale ; Diagramme de Poincaré ; Cardiovasculaire

Keywords: Autonomic nervous system; Cold; Spectral analysis; Poincaré plot analysis; Cardiovascular

L'utilisation d'agents physiques lors de la réadaptation ou pour la prise en charge thérapeutique après traumatisme est largement répandue [18,23]. Parmi les différentes méthodes disponibles, le refroidissement local (cryothérapie) est utilisé pour réduire l'inflammation [23]. Le refroidissement tissulaire réduit le métabolisme et limite le développement de réactions secondaires au traumatisme, qui peuvent avoir des effets indésirables (réaction inflammatoire, extravasation, stimulations nociceptives...) [4]. Il n'y a pas actuellement de consensus relatif aux modalités optimales d'application de la cryothérapie. Il est généralement accepté que le bénéfice est plus grand lorsque le refroidissement est effectué très précocement, sans délai après la survenue du traumatisme. Pour expliquer cette efficacité thérapeutique, on avance l'hypothèse que plus le métabolisme est diminué tôt après le traumatisme, plus les dommages secondaires seront faibles. Pour la même raison, les techniques de cryothérapie capables d'abaisser rapidement la température des tissus seraient plus efficaces que celles qui refroidissent plus lentement. Il est aussi admis que les plus grands degrés de refroidissements réduisent davantage le métabolisme, et par conséquent, seraient plus efficaces que ceux qui refroidissent à un moindre degré [4,13].

L'efficacité de la cryothérapie dépend entre autres, du site de refroidissement, de la durée de l'application du froid et du mode de refroidissement utilisé. Peu d'études ont comparé directement plusieurs procédés de cryothérapie, bien que les propriétés thermodynamiques diffèrent selon les procédés mis en œuvre. Par exemple, lors de l'utilisation de glace dans une poche en latex (procédé le plus fréquemment utilisé), l'abaissement de la température est provoqué par conduction. Un procédé développé en 1993¹ refroidit les tissus en utilisant la sublimation sur la peau de microcristaux de CO₂ projetés à –78 °C sous une pression de 50 bars.

Cette technique de cryothérapie gazeuse hyperbare parfois désignée comme « Neurocryostimulation » [15,24] provoque un abaissement brutal de la température par convection. Les premières études semblent mettre en évidence une intéressante efficacité thérapeutique [7,16].

En dehors d'un abaissement rapide et conséquent de la température tissulaire, cette efficacité pourrait aussi être en rapport avec une mise en jeu particulière du système nerveux végétatif.

Le refroidissement localisé de la peau stimule le système neurovégétatif orthosympathique par l'intermédiaire des thermorécepteurs cutanés sensibles au froid et du sang refroidi qui, en rejoignant la circulation générale, peut aussi stimuler les centres thermorégulateurs [25]. Cette mise en jeu provoque une vasoconstriction avec augmentation de pression artérielle [1, 12,14]. Pour certaines intensités de stimulation froide et selon la dimension de la zone refroidie, une contre régulation à l'augmentation des pressions artérielles avec mise en jeu parasympathique peut être visible [9]. Le système neurovégétatif module certains mécanismes de l'inflammation [20]. La noradrénaline et l'adrénaline, libérées par les fibres nerveuses sympathiques et sécrétées par la glande médullosurrénale modulent la libération de cytokines et différentes facettes des phénomènes inflammatoires, notamment en se fixant sur les récepteurs alpha- et bêta- adrénergiques des cellules immunitaires. Par ailleurs, l'activité efférente vagale (parasympathique) inhibe la libération de cytokines pro-inflammatoires et donc le développement de l'inflammation dont celles-ci sont responsables [5, 11].

L'étude dont nous décrivons ici les résultats avait deux objectifs. D'une part, comparer les caractéristiques du refroidissement provoqué par la projection de CO₂ à basse température et celui que cause l'application d'une poche à glace, et d'autre part vérifier si des modifications d'activité neurovégétative cardiovasculaire sont décelables lorsque ces techniques de refroidissement sont utilisées. Afin de mieux caractériser les effets des deux types de refroidissement, ils ont été comparés à ceux d'une épreuve standardisée d'exposition localisée au froid, et dont les réponses cardiovasculaires et neurovégétatives font référence : l'immersion de la main dans l'eau froide (souvent désignée comme « hand cold pressor test » en langue anglaise) [14].

1. Sujets et Méthodes

1.1. Sujets

Huit sujets masculins (moyenne ± écart-type de la moyenne (SEM) : 23,0 ± 1,2 ans ; 179,0 ± 2,2 cm ; 71,5 ± 2,2 kg), volontaires sans affection cardiovasculaire, métabolique ou allergique connue et non fumeurs ont participé à l'étude. Ils ont été informés du déroulement de l'étude et ont donné expli-

¹ Procédé développé par la société Cryonic®.

citement leur accord pour le protocole proposé, conformément aux recommandations d'Helsinki.

1.2. Organisation de l'étude

Le statut hémodynamique (fréquence et débit cardiaque, pression artérielle), et son contrôle neurovégétatif (analyse de la variabilité de la fréquence cardiaque et de la pression artérielle) ont été évalués en continu à trois reprises (épreuves effectuées en ordre randomisé). Chaque épreuve se déroulait en décubitus dorsal, dans une pièce calme, en ambiance thermiquement neutre (24,5–25,5 °C). Il a été demandé aux sujets d'éviter toute activité physique intense et toute consommation d'alcool et de café dans les 24 heures qui précédaient chaque test. Les mesures physiologiques étaient effectuées dans les conditions suivantes :

- avant (20 minutes), pendant (deux minutes) et après (30 minutes) un refroidissement du dos de la main gauche par le procédé Cryonic® [24]. Comme la technique permettant ce refroidissement est sonore (jet et détente gazeuse) et exerce une certaine pression sur les tissus, une brève stimulation cryogénique au niveau de la cheville gauche a été effectuée auparavant afin de minimiser l'effet de surprise d'une situation nouvelle.
- avant (20 minutes), pendant (15 minutes) et après (30 minutes) un refroidissement du dos de la main gauche par contact avec une poche à glace traditionnelle en latex.
- avant (20 minutes), pendant (deux minutes) et après (30 minutes) une stimulation froide référencée et connue, le test de la main dans l'eau froide [14]. La main gauche était immergée (jusqu'au poignet) dans de la glace pilée.

Pendant chaque épreuve et à son décours, les températures cutanées de la main gauche (dos et paume) et de la main droite (dos uniquement) ont été mesurées. Le statut hémodynamique (fréquence et débit cardiaque, pression artérielle), et des indicateurs de l'activité neurovégétative qui le régule (analyse de la variabilité de la fréquence cardiaque et de la pression artérielle) ont été mesurés en continu lors de chaque épreuve.

1.3. Matériels et méthodes utilisés

Le refroidissement par le procédé Cryonic® a été effectué avec un appareil Cryo+ (Cryonic Medical SA, Le-Martinet-du-Haut, Salins -les-Bains, France). Il permet de créer une stimulation froide à basse température (–78 °C à la sortie de l'appareil) et à haute pression (50 bars à la sortie de l'appareil, deux bars sur la peau).

La poche à glace était une vessie à glace traditionnelle en latex d'un diamètre de 25 cm (Laboratoires Clement-Terkan – Produits Burnet, Montrouge, France).

La température cutanée était mesurée avec des thermistances (type 409B, Yellow Springs Instruments Co. Inc., Ohio, États-Unis).

L'enregistrement continu de la fréquence cardiaque (Fc) et des pressions artérielles systolique (PAS) et diastolique (PAD) digitales a été effectué avec un photopléthysmographe digital Finometer® (Finapres Medical System, Amsterdam, Pays-Bas). L'utilisation du logiciel BeatScope® (ModelFlow®) permet, chez des sujets jeunes en bonne santé et en position couchée, l'estimation des variations du débit cardiaque (Qc) à partir de l'analyse de la forme de l'onde de pouls digitale [2,27], même si dans certaines conditions (vieillesse, orthostatisme), cette estimation s'est révélée moins valide [22,27].

Les puissances spectrales de la variabilité de Fc (VFC) et des pressions artérielles (VPA) ont été calculées durant les états stables (cinq minutes) avant et après chaque refroidissement, selon la méthode « Coarse graining spectral analysis » décrite par Yamamoto et Hughson [28] et utilisée à plusieurs reprises dans notre laboratoire [6,17]. Cette méthode permet de quantifier la puissance harmonique totale du spectre (Ptot). La puissance spectrale de VFC dans les hautes fréquences (HF_{VFC}) est médiée par la réponse du nœud sinusal à l'activité parasympathique associée à l'activité respiratoire [21]. La puissance du spectre dans les basses fréquences (LF_{VFC}) reflète une activité mixte d'origine para- et orthosympathique [3]. Ces modulations para- et orthosympathique ont été caractérisées en normalisant la distribution relative de la puissance du spectre dans les hautes et basses fréquences [19]. L'activité parasympathique a été évaluée par la puissance du spectre dans les HF_{VFC} et par le rapport HF_{VFC}/Ptot_{VFC} (= HF_{nVFC}) alors que l'activité orthosympathique a été évaluée à partir des rapports LF_{VFC}/Ptot_{VFC} (= LF_{nVFC}) et LF_{VFC}/HF_{VFC} [28]. Dérivés de l'analyse de la variabilité de pression artérielle diastolique, les indicateurs de l'activité orthosympathique vasculaire habituellement utilisés sont Ptot_{VPA} et LF_{nVPA} [6]. L'analyse de la variabilité de la fréquence cardiaque a aussi été effectuée en utilisant le diagramme de Poincaré pour des périodes de deux minutes avant et lors de la stimulation (comme décrit ailleurs [17]). Brièvement, cette méthode repose sur un diagramme de dispersion dans lequel chaque intervalle RR est exprimé en fonction du précédent. Une analyse quantitative de ce diagramme permet de calculer plusieurs paramètres : l'écart-type de la « variabilité instantanée cycle par cycle » (SD1), et l'écart-type de la variabilité cycle par cycle « continue à long terme » (SD2). SD1 et SD2 sont exprimés en valeurs absolues et/ou en valeurs normalisées (SD1_{nu} et SD2_{nu}, respectivement), obtenues en divisant les valeurs absolues par l'intervalle RR moyen, et en multipliant ensuite par 1000. SD1 et SD1_{nu} sont des paramètres de la réponse du nœud sinusal à l'activité parasympathique. SD2 et SD2_{nu} sont sous l'influence à la fois de l'activité parasympathique et orthosympathique. Enfin le rapport SD1/SD2 peut être considéré comme un indice de l'activité sympathique, mais il reste un indicateur relativement peu sensible.

1.4. Statistiques

Les variables hémodynamiques et les indices d'activité neurovégétative dérivés des analyses spectrales ont été moyennés

avant (une période de cinq minutes), pendant (variables hémodynamiques et diagramme de Poincaré ; moyenne sur l'ensemble de la durée de la stimulation) et après (sept périodes de cinq minutes) la stimulation cryogénique.

Une analyse de variance à deux facteurs (temps, type de refroidissement) a été effectuée en utilisant le logiciel SigmaStat® (SPSS Inc, Chicago, États-Unis).

2. Résultats

Les températures cutanées sont modifiées différemment selon les techniques de refroidissement utilisées (Fig. 1). L'application de la poche à glace et la projection de CO₂ pro-

voquent un abaissement de la température du dos de la main refroidie qui se poursuit tant que dure la stimulation. Cependant, la rapidité de décroissance de la température cutanée est très différente d'une technique à l'autre. Avec la poche à glace, la température diminue à 26,9 ± 0,8 °C dans les 30 premières secondes puis plus progressivement pour atteindre 22,1 ± 0,8 °C à deux minutes et enfin 14 ± 0,8 °C à la fin des 15 minutes de refroidissement. Avec la projection de CO₂, la température diminue brutalement à 11,8 ± 1,6 °C en 30 secondes, puis plus progressivement pour atteindre 6,9 ± 1,0 °C à la fin des deux minutes de stimulation.

À l'issue du refroidissement, la remontée en température est progressive, mais plus rapide après la projection de CO₂, particulièrement en début de récupération. En effet, 30 secondes

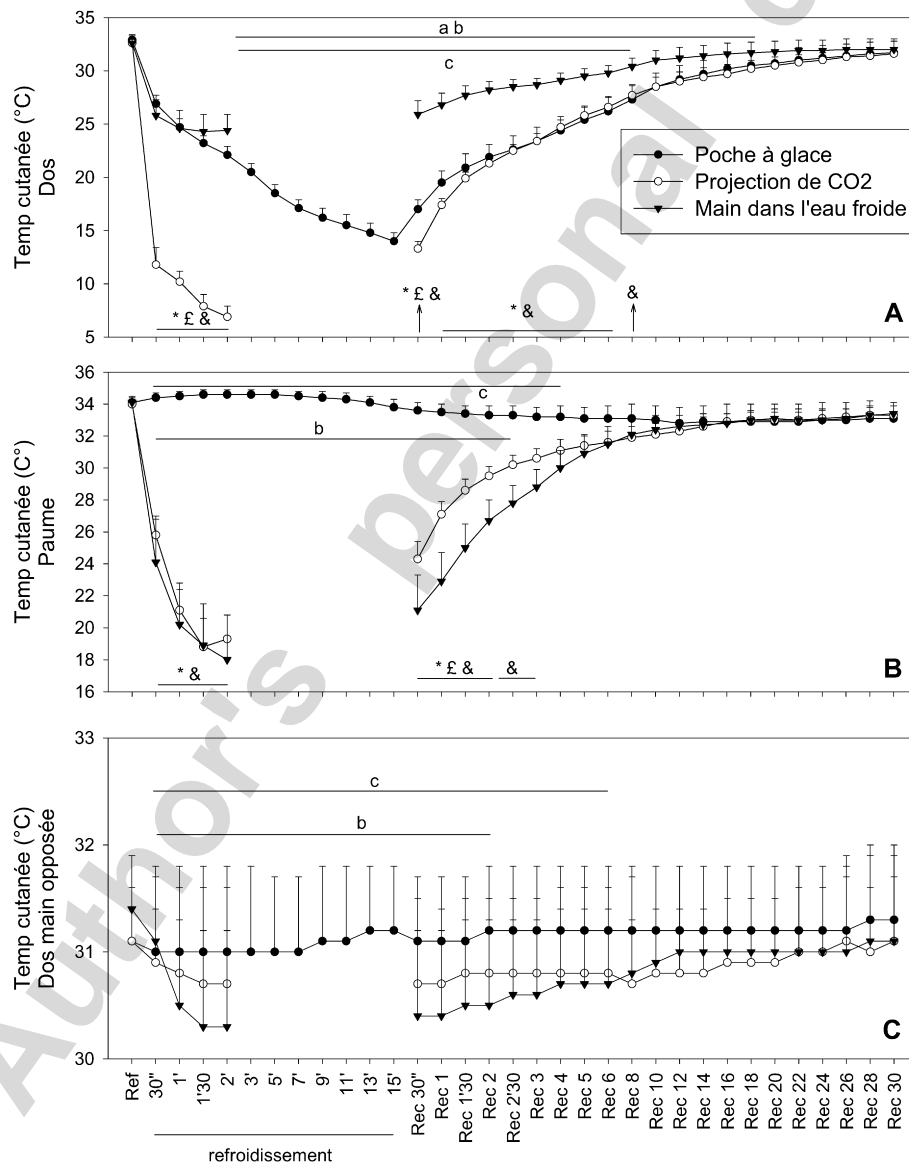


Fig. 1. Modification de la température cutanée du dos (A) et de la paume (B) de la main refroidie et du dos de la main opposée (C) en fonction du refroidissement provoqué par l'application d'une poche à glace (cercle noir), de la projection du CO₂ (cercle blanc) et du test de la main dans l'eau froide (triangle noir). * : projection de CO₂ significativement différent de Poche à glace ; £ : projection de CO₂ significativement différent du test de la main dans l'eau froide ; & : test de la main dans l'eau froide significativement différent de poche à glace. a : significativement différent de la référence pour Poche à glace ; b : significativement différent de la référence pour Projection de CO₂, c : significativement différent de la référence pour le test de la main dans l'eau froide. *p* < 0,05.

après le retrait de la poche à glace, la température est de $17,0 \pm 0,9$ °C (+3 °C) alors qu'elle est de $13,3 \pm 0,7$ °C (+6 °C) pour la projection de CO₂.

Comme pour le dos de la main, le profil de température cutanée de la paume est très différent suivant la technique utilisée. La température a tendance à augmenter dans les premières minutes qui suivent l'application de la poche à glace (pendant environ six minutes, jusqu'à $34,6 \pm 0,3$ °C) avant de redescendre doucement pour atteindre $33,8 \pm 0,5$ °C en fin de refroidissement. À ce moment, il n'y a aucune différence significative avec la valeur de référence. Au contraire, la température de la paume diminue ($p < 0,05$) avec la projection de CO₂ : à la fin des deux minutes, elle est de $19,3 \pm 1,5$ °C.

Alors qu'aucune variation particulière de température cutanée n'est observable sur la main non refroidie lors de l'application de la poche à glace, une baisse significative survient avec la projection de CO₂. La température minimale atteinte est de $30,3 \pm 1,3$ °C. Cette baisse significative persiste durant deux minutes après l'arrêt de la stimulation.

Le profil de température cutanée lors de l'immersion de la main dans l'eau froide est comparable à celui que provoque la projection de CO₂, alors que la surface cutanée directement refroidie est deux fois plus grande pendant l'immersion. Les températures cutanées de la paume de la main refroidie et du dos de l'autre main ne sont pas significativement différentes au cours des deux épreuves. La température du dos de la main refroidie reste toutefois significativement plus élevée lors du test de la main dans l'eau froide ($24,4 \pm 1,5$ °C en fin de stimulation) que lors de la projection de CO₂, et donc plus proche de celle relevée lors du refroidissement par poche à glace au même moment.

3. Fréquence cardiaque, volume d'éjection systolique et débit cardiaque

Aucune variation significative de fréquence cardiaque, de volume d'éjection systolique ni de débit cardiaque n'a été observée au cours des différents refroidissements ou à leur décours (Fig. 2).

3.1. Pressions artérielles

Une élévation significative des pressions artérielles systolique et diastolique est mesurée durant les deux minutes de refroidissement du dos de la main par la projection de CO₂, comme pendant l'immersion de la main dans l'eau froide (Fig. 3). Au contraire, aucune variation significative des pressions artérielles ne survient lors du refroidissement avec la poche à glace.

3.2. Analyse de variabilité de fréquence cardiaque et de la pression artérielle

Aucune modification significative des indices dérivés de l'analyse spectrale de la variabilité de la fréquence cardiaque et

Tableau 1

Puissance totale (Ptot), dans les basses (LF) et dans les hautes (HF) fréquences de l'analyse spectrale de la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) et puissance totale dans les basses fréquences normalisées (LFn) de la pression artérielle diastolique (VPAD), avant et après les différents modes de refroidissement

	Temps	Poche à glace	Projection de CO ₂	Main dans l'eau froide
Ptot _{VFC}	Avant	1484,4 ± 1058,8	1871,2 ± 1263,9	3419,1 ± 5861,2
	Après 5	2736,5 ± 1325,6	2593,1 ± 1695,5	3339,0 ± 3644,1
	Après 10	2830,0 ± 1885,4	2210,6 ± 1345,8	1492,3 ± 1452,7
	Après 15	3358,6 ± 2247,1	2143,1 ± 1655,1	2644,9 ± 2532,5
	Après 20	3075,0 ± 1845,6	3215,8 ± 3420,2	2466,1 ± 1288,8
	Après 25	4859,5 ± 4561,1	4201,4 ± 5664,3	2072,0 ± 1223,0
LF _{VFC}	Avant	155,5 ± 171,9	256,7 ± 259,9	336,9 ± 494,0
	Après 5	291,8 ± 295,0	302,6 ± 294,6	219,7 ± 193,7
	Après 10	248,5 ± 213,1	223,4 ± 182,3	151,5 ± 137,1
	Après 15	496,6 ± 393,5	287,1 ± 365,1	257,9 ± 166,6
	Après 20	252,4 ± 186,0	246,0 ± 121,8	320,6 ± 353,5
	Après 25	519,9 ± 491,7	543,7 ± 843,2	335,0 ± 353,8
HF _{VFC}	Avant	166,6 ± 269,7	173,7 ± 152,7	936,4 ± 2045,8
	Après 5	215,8 ± 242,8	325,7 ± 263,1	399,2 ± 757,0
	Après 10	254,9 ± 380,2	247,1 ± 335,4	153,1 ± 204,8
	Après 15	159,1 ± 163,3	182,3 ± 213,9	264,8 ± 469,1
	Après 20	268,1 ± 238,4	215,6 ± 150,0	211,6 ± 312,5
	Après 25	199,7 ± 202,6	214,8 ± 129,8	128,8 ± 126,8
Ptot _{VPAD}	Avant	6,2 ± 3,4	8,2 ± 9,2	6,3 ± 4,7
	Après 5	6,9 ± 3,0	7,5 ± 5,8	7,7 ± 5,6
	Après 10	7,5 ± 3,4	6,2 ± 6,4	6,4 ± 5,3
	Après 15	8,0 ± 2,9	6,4 ± 3,6	11,0 ± 7,5
	Après 20	8,2 ± 4,1	6,6 ± 3,3	7,9 ± 3,2
	Après 25	10,8 ± 8,8	8,7 ± 5,9	8,2 ± 4,2
LFn _{VPAD}	Avant	7,8 ± 3,2	7,8 ± 6,0	8,2 ± 6,5
	Après 5	0,14 ± 0,08	0,18 ± 0,07	0,16 ± 0,07
	Après 10	0,22 ± 0,09	0,18 ± 0,09	0,16 ± 0,08
	Après 15	0,21 ± 0,10	0,12 ± 0,04	0,17 ± 0,07
	Après 20	0,19 ± 0,08	0,21 ± 0,13	0,14 ± 0,07
	Après 25	0,22 ± 0,10	0,21 ± 0,05	0,22 ± 0,12
	Après 25	0,23 ± 0,06	0,23 ± 0,05	0,24 ± 0,10
	Après 30	0,17 ± 0,06	0,23 ± 0,11	0,16 ± 0,06

de la pression artérielle (Tableau 1) n'a été observée au décours immédiat des différentes manœuvres de refroidissement.

La variabilité de l'intervalle RR analysée par le diagramme de Poincaré est sensiblement modifiée pendant la projection de CO₂ et lors du test de la main dans l'eau froide (Fig. 4). Les valeurs de SD1nu et SD2nu sont significativement augmentées. Au contraire, aucune modification significative ne survient lors du refroidissement par poche à glace. Aucune modification significative du rapport SD1/SD2 n'est observée avec aucune des trois techniques de refroidissement.

4. Discussion

Le premier objectif de cette étude était de comparer le refroidissement provoqué par la projection de cristaux de CO₂ à basse température (procédé Cryonic[®]) et par l'application d'une poche à glace en latex. Sur le dessus de la main gauche (zone refroidie), une diminution très importante de la température cutanée survient dès le début de la stimulation par le procédé Cryonic[®] (température de surface divisée par trois en

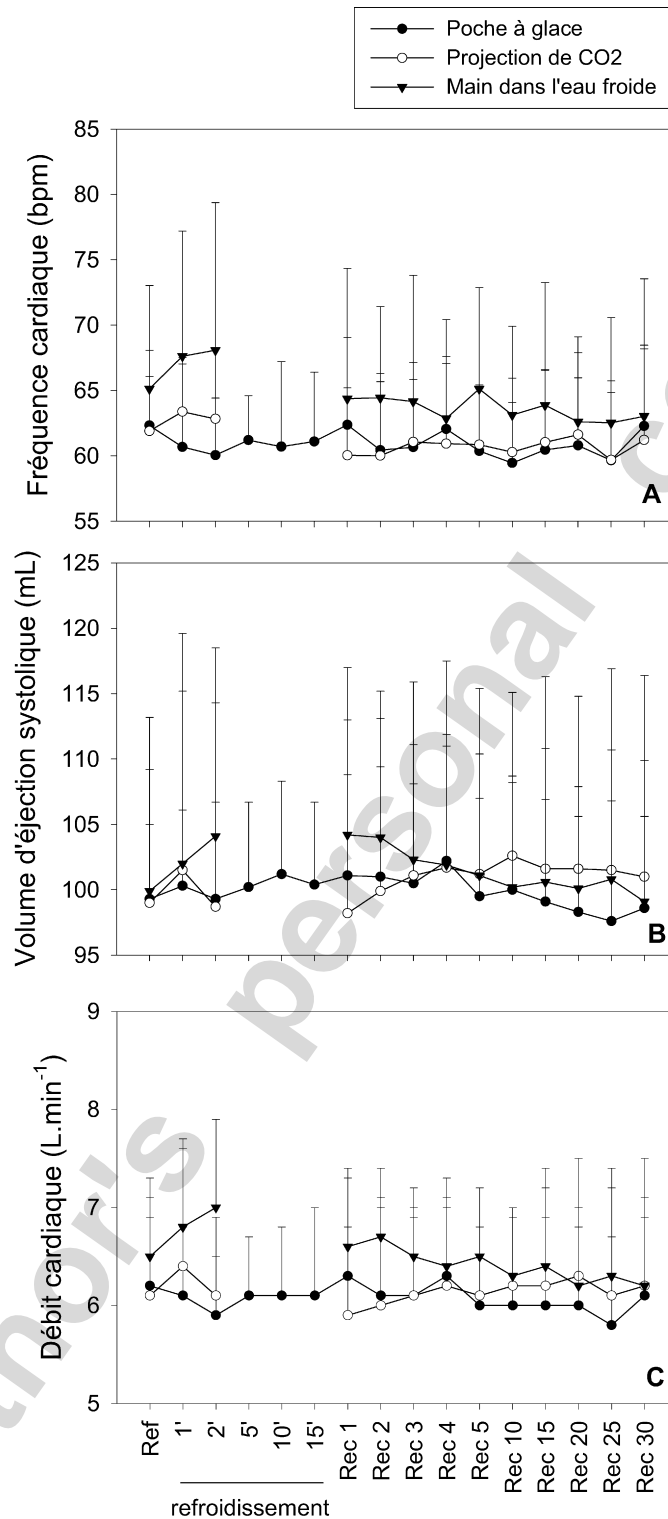


Fig. 2. Modification de la fréquence cardiaque (A), du volume d'éjection systolique (B) et du débit cardiaque (C) en fonction du refroidissement provoqué par l'application d'une poche à glace (cercle noir), de la projection du CO₂ (cercle blanc) et du test de la main dans l'eau froide (triangle noir).

moins de 30 secondes, soit $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ par rapport à la valeur de référence), puis plus progressivement pour atteindre environ $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-26\text{ }^{\circ}\text{C}$) au bout de deux minutes. Lors de la stimulation par poche à glace, la température cutanée n'est abaissée que de $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ au bout de 30 secondes, $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ au bout de deux minutes. À la fin des 15 minutes d'application de la poche à

glace, qui reproduit les conditions fréquentes d'utilisation thérapeutique, la température de surface de la peau est de $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ (soit une diminution de $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ par rapport à l'état de référence). Deux minutes après l'arrêt des refroidissements, les températures sont proches (vers $21\text{ }^{\circ}\text{C}$), ce qui signifie que la remontée en température est deux fois plus rapide après la

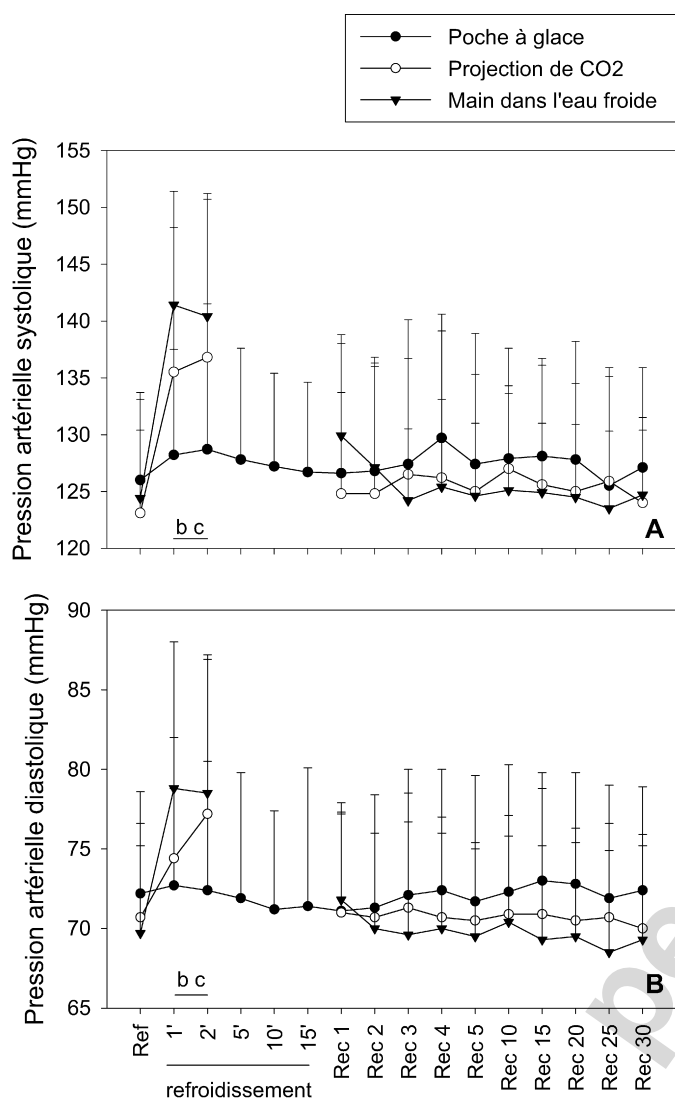


Fig. 3. Modification de la pression artérielle systolique (A) et diastolique (B) en fonction du refroidissement provoqué par l'application d'une poche à glace (cercle noir), de la projection du CO₂ (cercle blanc) et du test de la main dans l'eau froide (triangle noir).

a : significativement différent de la référence pour Poche à glace ; b : significativement différent de la référence pour Projection de CO₂, c : significativement différent de la référence pour le test de la main dans l'eau froide. $p < 0,05$.

projection de CO₂ (+14 °C) qu'après refroidissement par la poche à glace (+7 °C). La projection de microcristaux de CO₂ sous haute pression provoque donc un abaissement brutal de la température, suivi d'une remontée tout aussi rapide. Ces profils de températures cutanées sur le lieu de la stimulation valident la notion de « choc thermique » important lié à la projection de CO₂ [24]. En accord avec l'hypothèse fonctionnelle que les techniques de cryothérapie qui permettent d'atteindre les températures les plus basses seraient thérapeutiquement plus efficaces [4,13], ce « choc thermique » pourrait expliquer les résultats intéressants décrits avec le procédé Cryonic® [7,16].

Sous la main stimulée (paume), les profils de températures sont aussi très différents en fonction du procédé de refroidis-

sement utilisé. On observe une diminution de la température après refroidissement par le procédé Cryonic® dès le début de la stimulation alors qu'elle a tendance à légèrement augmenter lors du refroidissement par poche à glace. La baisse de la température est comparable à celle que produit le refroidissement palmaire direct lors de l'immersion de la main dans l'eau froide, alors même que seul le dos de la main a été refroidi par le jet de CO₂. Ce refroidissement qui témoigne d'une vasoconstriction étendue à l'ensemble de la main est un élément supplémentaire en faveur de la notion de « choc thermique ». Au contraire, le refroidissement par la poche de glace provoque une vasoconstriction limitée à la zone directement stimulée, avec un déplacement sanguin dans les vaisseaux de la face palmaire que reflète la légère augmentation de la température cutanée (non significative). Avec la poche à glace, la vasoconstriction ne concerne donc qu'une partie de la main, même après 15 minutes d'application. Ces profils de températures différents traduisent des mises en jeu bien différentes d'activité vasomotrice locale (sur la main stimulée).

Enfin, la diminution significative de la température cutanée de la main non directement refroidie reflète une réponse vasoconstrictrice cutanée à distance lors du refroidissement par le procédé Cryonic®. Cette réponse éloignée n'est pas apparente lors de l'application de la poche à glace.

Le deuxième objectif de notre étude était de vérifier que le refroidissement local déclenche une mise en jeu de l'activité neurovégétative ortho- ou parasympathique à destinée cardiovasculaire.

La projection de cristaux de CO₂ selon le procédé Cryonic® provoque une augmentation significative des pressions artérielles systolique et diastolique, qui témoigne aussi de la vasoconstriction étendue, affectant au moins dans le territoire cutané, déclenchée par ce type de refroidissement localisé. En revanche, l'application de la poche à glace ne cause pas d'augmentation significative des pressions artérielles, ni après deux minutes ni après 15 minutes de stimulation. Par conséquent, soit cette stimulation ne cause pas de vasoconstriction à distance, soit celle-ci n'est pas décelable avec les indicateurs que nous avons utilisés. Si elle existe, cette réponse à distance reste très faible comparée à celle que déclenche le refroidissement par le procédé Cryonic®, bien que l'application de la poche à glace soit poursuivie plus longtemps que la projection de CO₂. L'augmentation des pressions artérielles a été bien décrite lors de l'immersion de la main dans l'eau froide [1,12]. Au cours de cette épreuve, c'est toute la surface de la main qui est refroidie. Cette épreuve appartient à la batterie des tests standardisés régulièrement utilisés pour étudier la réactivité neurovégétative, particulièrement l'activité orthosympathique à destinée vasculaire [14].

Quel que soit le procédé de refroidissement utilisé, aucune modification significative de la fréquence cardiaque n'a été observée. Ces résultats concordent avec ceux d'autres études, en particulier avec le test de la « main dans l'eau froide » [9, 10]. Cependant, l'augmentation significative de l'indice SD1nu du diagramme de Poincaré au cours de la projection

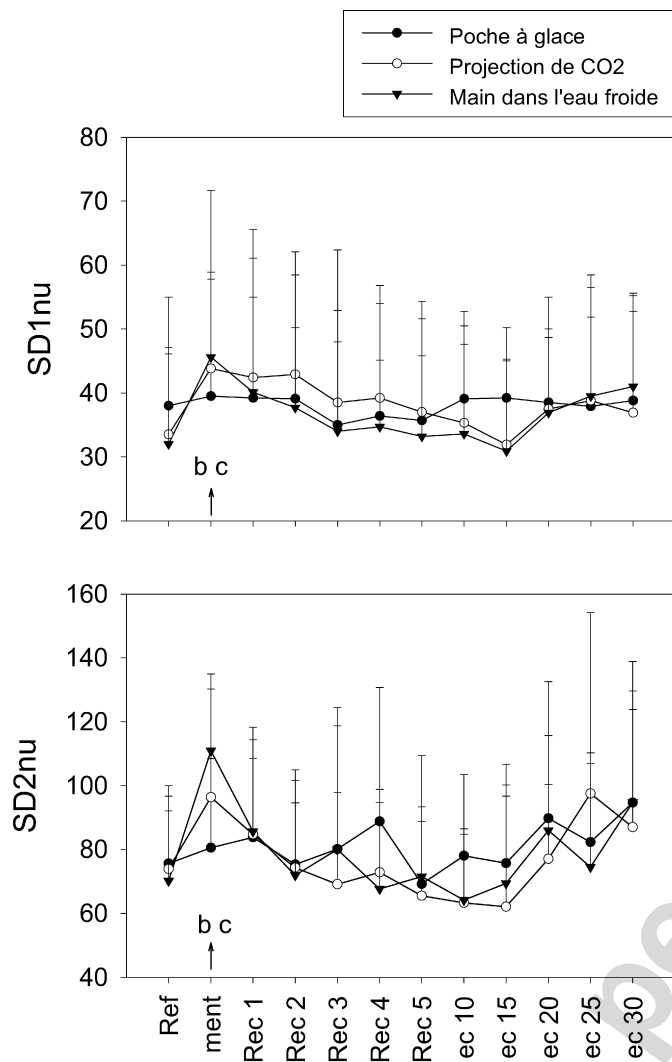


Fig. 4. Modification des indices SD1nu (A) et SD2nu (B) de l'analyse de la variabilité de la fréquence cardiaque par le diagramme de Poincaré en fonction du refroidissement provoqué par l'application d'une poche à glace (cercle noir), de la projection du CO₂ (cercle blanc) et du test de la main dans l'eau froide (triangle noir).

b : significativement différent de la référence pour Projection de CO₂, c : significativement différent de la référence pour le test de la main dans l'eau froide. $p < 0,05$.

de CO₂ et du test de la main dans l'eau froide met en évidence une modulation de l'activité parasympathique à destinée cardiaque, alors qu'aucune modification significative des mêmes indices n'est observée lors du refroidissement par la poche à glace. Cette modulation est vraisemblablement d'origine baroréflexe, et répond à l'augmentation des pressions artérielles. Selon ce schéma, il est logique de ne pas l'observer lors du refroidissement par la poche à glace. Ces résultats sont concordants avec ceux d'autres études reposant sur des techniques vulnérantes [9].

Nous n'avons pas observé de modification des indices dérivés de l'analyse spectrale de la variabilité de la fréquence cardiaque au décours des stimulations. La durée du test (deux minutes) a sans doute été trop brève pour observer des modifications durables [8]. L'analyse spectrale de la variabilité de

pression artérielle est couramment utilisée pour obtenir des indicateurs d'activité orthosympathique à destinée vasculaire [6]. Toutefois, ils ne sont pas universellement reconnus et acceptés comme tels [26]. Dans de nombreuses situations, l'augmentation de la pression artérielle est un reflet direct de la mise en jeu de l'activité orthosympathique vasculaire. Dans notre étude, les modifications significatives de plusieurs indices d'activation orthosympathique et parasympathique convergent pour indiquer que l'action rapide et conséquente du procédé Cryonic[®] semble avoir des effets modulateurs de l'activité neurovégétative, notamment à destinée vasculaire et (au moins indirectement) cardiaque. S'ils sont confirmés par d'autres travaux, ces effets pourraient donc justifier l'appellation « Neurocryostimulation » qui a été proposée [24].

La similarité des réponses (température cutanée, pression artérielle, changement de l'indice SD1n) avec les deux refroidissements par le procédé Cryonic[®] et par l'immersion de la main dans l'eau froide pourrait être en rapport avec l'importance et la rapidité du refroidissement. La mise en jeu de fibres sensitives véhiculant des informations non thermiques peut aussi être envisagée, puisque des mécanorécepteurs cutanés pourraient être stimulés par la pression du jet de CO₂ et par la vibration induite dans le cône d'éjection [24].

5. Conclusion

Ainsi, le procédé Cryonic[®] produit véritablement un « choc thermique » qui déclenche une réponse vasomotrice cutanée locale (zone refroidie), « locale étendue » (paume de la même main) et à distance (autre main). L'augmentation de pression artérielle systémique et la diminution de la température cutanée de la main non stimulée reflètent une réponse vasculaire largement disséminée, sous-tendue par une mise en jeu d'activité orthosympathique et capable d'activer en retour l'activité parasympathique cardiaque. Ces réponses sont comparables à celles que déclenche l'immersion de la main dans l'eau froide, épreuve reconnue dans l'exploration de la réactivité neurovégétative. Au contraire, les réponses vasculaires observées lors du refroidissement du dos de la main par une poche à glace semblent rester localisées à la seule zone directement refroidie, sans modulation décelable d'activité neurovégétative à destinée cardiovasculaire. L'efficacité de la cryothérapie par projection de CO₂ à basse température et haute pression pourrait ainsi être liée à l'association « choc thermique et mise en jeu neurovégétative ». Cette hypothèse devra cependant être confirmée par d'autres études.

Remerciements

Nous remercions les sujets pour leur participation enthousiaste.

Cette étude a été financée par le ministère de l'Éducation Nationale, de la Recherche et de la Technologie (UPRES EA3920) et par la société Cryonic[®].

Références

- [1] Arjamaa O, Mäkinen T, Turunen L, Huttunen P, Leppaluoto J, Vuolteenaho O, et al. Blood pressure and endocrine responses of healthy subjects in cold pressor test after acutely increased dietary sodium intake. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci* 2001;20:207–12.
- [2] Azabji Kenfack M, Lador F, Licker M, Moia C, Tam E, Capelli C, et al. Cardiac output by Modelflow method from intra-arterial and fingertip pulse pressure profiles. *Clin Sci (Lond)* 2004;106:365–9.
- [3] Bernardi L, Leuzzi S, Radaelli A, Passino C, Johnston JA, Sleight P. Low-frequency spontaneous fluctuations of R-R interval and blood pressure in conscious humans: a baroreceptor or central phenomenon? *Clin Sci (Lond)* 1994;87:649–54.
- [4] Bleakley C, McDonough S, MacAuley D. The use of ice in the treatment of acute soft-tissue injury: a systematic review of randomized controlled trials. *Am J Sports Med* 2004;32:251–61.
- [5] Borovikova LV, Ivanova S, Zhang M, Yang H, Botchkina GI, Watkins LR, et al. Vagus nerve stimulation attenuates the systemic inflammatory response to endotoxin. *Nature* 2000;405:458–62.
- [6] Bouhaddi M, Delbosc B, Fortrat JO, Henriët MT, Cappelle S, Ducloux D, et al. Six-month cardiovascular changes in cyclosporine-treated recipients of corneal grafts: serial baroreflex responses. *Transplant Int* 2004;17:325–33.
- [7] Brunet-Guedj E, Brunet B, Girardier J, Renaud E, Daubard M, Manigand R. Evaluation de la cryothérapie gazeuse dans le traitement des tendinopathies. *Sport Med* 2001;137:22–4.
- [8] Cankar K, Finderle Z. Gender differences in cutaneous vascular and autonomic nervous response to local cooling. *Clin Auton Res* 2003;13:214–20.
- [9] Cui J, Wilson TE, Crandall CG. Baroreflex modulation of muscle sympathetic nerve activity during cold pressor test in humans. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2002;282:H1717–H1723.
- [10] Fu Q, Levine BD, Pawelczyk JA, Ertl AC, Diedrich A, Cox JF, et al. Cardiovascular and sympathetic neural responses to handgrip and cold pressor stimuli in humans before, during and after spaceflight. *J Physiol* 2002;544:653–64.
- [11] Hasko G, Szabo C. Regulation of cytokine and chemokine production by transmitters and co-transmitters of the autonomic nervous system. *Biochem Pharmacol* 1998;56:1079–87.
- [12] Jacob G, Costa F, Shannon J, Robertson D, Biaggioni I. Dissociation between neural and vascular responses to sympathetic stimulation: contribution of local adrenergic receptor function. *Hypertension* 2000;35:76–81.
- [13] Knight KL, Brucker JB, Stoneman PD. Muscle injury management with cryotherapy. *Athletic Therapy Today* 2000;5:26–30.
- [14] Lovallo W. The cold pressor test and autonomic function: a review and integration. *Psychophysiology* 1975;12:268–82.
- [15] Mathelin D. Cryothérapie et médecine du sport : la cryothérapie gazeuse hyperbare. *Le spécialiste de Médecine du Sport au service des praticiens* 2002;41:18–9.
- [16] Meeusen R, Handelberg F, Framhout L, Daems S. Influence de la cryothérapie (Cryotront(r)) sur la douleur et l'inflammation après arthroscopie de l'épaule. *Kinésithérapie scientifique* 2004;450:11–7.
- [17] Mourot L, Bouhaddi M, Perrey S, Cappelle S, Henriët MT, Wolf JP, et al. Decrease in heart rate variability with overtraining: assessment by the Poincaré plot analysis. *Clin Physiol Funct Imaging* 2004;24:10–8.
- [18] Nyland J, Nolan MF. Therapeutic modality: rehabilitation of the injured athlete. *Clin Sports Med* 2004;23:299–313 (vii).
- [19] Pagani M, Malliani A. Interpreting oscillations of muscle sympathetic nerve activity and heart rate variability. *J Hypertens* 2000;18:1709–19.
- [20] Pavlov VA, Tracey KJ. The cholinergic anti-inflammatory pathway. *Brain Behav Immun* 2005;19:493–9.
- [21] Pomeranz B, Macaulay RJ, Caudill MA, Kutz I, Adam D, Gordon D, et al. Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis. *Am J Physiol* 1985;248:H151–H153.
- [22] Remmen JJ, Aengevaeren WR, Verheugt FW, van der Werf T, Lijntzen HE, Bos A, Jansen RW. Finapres arterial pulse wave analysis with Modelflow is not a reliable non-invasive method for assessment of cardiac output. *Clin Sci (Lond)* 2002;103:143–9.
- [23] Roques CF. [Analgesic physical therapy. Present clinical data]. *Ann Readapt Med Phys* 2003;46:565–77.
- [24] Rozenblat M, Cluzeau C. Place de la neurocryostimulation en traumatologie du sport. *J Traumatol Sport* 2006;23:52–5.
- [25] Sawasaki N, Iwase S, Mano T. Effect of skin sympathetic response to local or systemic cold exposure on thermoregulatory functions in humans. *Auton Neurosci* 2001;87:274–81.
- [26] Stauss HM, Mrowka R, Nafz B, Patzak A, Unger T, Persson PB. Does low frequency power of arterial blood pressure reflect sympathetic tone? *J Auton Nerv Syst* 1995;54:145–54.
- [27] van Lieshout JJ, Toska K, Van Lieshout EJ, Eriksen M, Walloe L, Wesseling KH. Beat-to-beat noninvasive stroke volume from arterial pressure and Doppler ultrasound. *Eur J Appl Physiol* 2003;90:131–7.
- [28] Yamamoto Y, Hughson RL. Coarse-graining spectral analysis: new method for studying heart rate variability. *J Appl Physiol* 1991;71:1143–50.