

L'hyperréflexie autonome induite par la stimulation des racines sacrées est détectée par l'analyse spectrale de l'ECG

[Autonomic hyperreflexia induced by sacral root stimulation is detected by spectral analysis of the EEG]

Musa Sesay MD,* Jean-Rodolphe Vignes MD,† Dominique Liguoro MD PhD,† Philippe Crozat MD,* Géry Boulard MD,* Jean Guerin MD,† Michel Barat MD,‡ Pierre Maurette MD*

Objectif : Comparer la technique d'analyse spectrale de l'électrocardiogramme (ECG) au monitoring de la tension artérielle moyenne (TAM) et la fréquence cardiaque (FC) dans la détection de l'hyperréflexie autonome (HRA) induite par la stimulation des racines sacrées.

Méthode : Dix blessés médullaires candidats à l'implantation d'un stimulateur des racines sacrées pour rétention urinaire ont été inclus. Sous anesthésie iv à objectif de concentration (4 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ de propofol, 4 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ de rémifentanil), les patients étaient installés en génu-pectoral. Les racines sacrées étaient exposées par une laminectomie (L2 à S1) et leur fonction évaluée par électrostimulation sous contrôle urodynamique et cardiovasculaire. L'analyse spectrale était obtenue en temps réel grâce au logiciel (MemCalc™) d'un ordinateur connecté au moniteur d'anesthésie. L'intervalle R-R de l'ECG était décomposé, par la méthode d'entropie maximum, en spectres de fréquences sympathiques (LF : 0,04–0,15 Hz) et parasympathiques (HF : 0,15–0,4 Hz). La valeur la plus extrême de chaque paramètre était notée avant et à chaque stimulation. Une différence (Δ) supérieure à 10 % était considérée comme l'expression d'HRA. La comparaison (ΔLF vs ΔTAM et ΔHF vs ΔFC) était faite par un test de concordance basé sur un coefficient kappa (k) : -1 = discordance totale à 1 = concordance totale.

Résultats : L'HRA était détectée chez six patients sous forme : d'augmentation de LF et TAM ($n = 4$) ; d'augmentation de LF, HF, TAM et diminution de la FC ($n = 2$). Le délai de détection était de $5,3 \pm 1$ sec pour l'ECG spectral et $10 \pm 1,2$ sec pour la TAM et la FC. La concordance observée était de 85 % entre LF et TAM ($k = 0,7$) et 90 % entre HF et FC ($k = 0,8$).

Conclusion : L'HRA induite par la stimulation des racines sacrées

est détectée par l'ECG spectral de manière plus précoce que la TAM et la FC. Ces résultats demandent une confirmation par d'autres études.

Purpose: To compare spectral analysis of the electrocardiogram (ECG) with mean arterial pressure (MAP) and heart rate (HR) monitoring in the detection of autonomic hyperreflexia (AHR) induced by sacral root stimulation.

Methods: Ten spinal cord injured patients scheduled for implantation of a sacral root stimulator for bladder retention were included. Under target controlled anesthesia with propofol 4 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ and remifentanil 4 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$, the patients were placed in the knee chest position. The sacral roots were exposed by laminectomy (L2–S1) and their function assessed by electrostimulation under urodynamic and cardiovascular monitoring. Online power spectrum densities were calculated from the ECG R-R interval by the MemCalc™ software using the maximum entropy method. Low frequency (LF: 0.04–0.15 Hz) and high frequency (HF: 0.15–0.4 Hz) spectra were associated with sympathetic and parasympathetic activities respectively. The most extreme value of each variable was noted before and during each stimulation. A difference (Δ) of more than 10% signified AHR. The comparison (ΔLF vs ΔMAP and ΔHF vs ΔHR) was done by a concordance test with a kappa coefficient (k): -1 = total discordance to 1 = total concordance.

Results: AHR was detected in six patients as an increase in LF and MAP ($n = 4$); an increase in LF, HF, MAP with a decrease in HR ($n = 2$). The detection delay was 5.3 ± 1 sec (LF, HF) and 10.4 ± 1.2 sec (MAP and HR). Concordance was 85% (LF vs MAP: $k = 0.7$) and 90% (HF vs HR: $k = 0.8$).

Du Département d'Anesthésie-réanimation 3,* Service de Neurochirurgie A,† et Service de Rééducation neurologique,‡ Centre Hospitalier Universitaire Pellegrin, Bordeaux, France.

Adresser la correspondance à : Dr Musa Sesay, Unité de Neuroanesthésie réanimation, Département d'anesthésie- réanimation 3, Centre Hospitalier Universitaire Pellegrin, 33076 Bordeaux cedex, France. Téléphone: 05 56 79 55 43; Télécopieur: 05 56 79 61 55; Courriel: musa.sesay@chu-bordeaux.fr

Sources de financement: ce travail a été financé par des contrats de recherche 1999 de la Société française d'anesthésie-réanimation et du Centre hospitalier universitaire de Bordeaux. Présenté aux congrès 2002 de la SFAR à Paris et de l'ASA à Orlando.

Accepted for publication April 18, 2002.

Revision accepted July 22, 2002.

Conclusion: *AHR induced by sacral root stimulation is detected by spectral analysis of the ECG earlier than MAP and HR. Other studies are needed to confirm these results.*

L'HYPERRÉFLEXIE autonome (HRA) est une complication grave touchant 30 à 85 % des blessés de la moelle épinière au-dessus de l'émergence des fibres sympathiques: D6.^{1,2} Ce centre sympathique étant libéré de l'action inhibitrice supraspinale, tout stimulus sous lésionnel, tel qu'une distension vésicale ou rectale, peut entraîner une HRA sous forme de réponse sympathique exagérée (sueurs, céphalées pulsatiles, frissons, piloérection, hypertension artérielle) et de bradycardie compensatrice.³ La gravité de l'HRA est marquée par le risque d'hémorragie intracérébrale,⁴ de crise convulsive⁵ et d'œdème pulmonaire⁶. Les blessés médullaires présentent également des troubles du contrôle neurologique de la continence et la miction avec un risque constant d'infections urinaires, et à long terme une dégradation de la fonction rénale.⁷ Dans les lésions épargnant la moelle sacrée, l'implantation d'un stimulateur des racines sacrées antérieures, programmable par commande externe, permet de déclencher la miction.⁸ Cependant, cette chirurgie fonctionnelle impliquant un geste sur les afférences sensibles sacrées est susceptible de déclencher une HRA. L'exclusion chirurgicale des racines sacrées en cause permet de réduire les réactions neurovégétatives indésirables.⁹ Un monitoring peropératoire adéquat s'impose donc afin d'identifier ces réactions indésirables. L'analyse spectrale de l'électrocardiogramme (ECG spectral) est un marqueur connu du système nerveux autonome par la décomposition du tracé de l'intervalle R-R de l'ECG en spectres de fréquences sympathique et parasympathique.¹⁰ Elle a l'avantage par rapport au monitoring conventionnel de la pression artérielle (PA) invasive et de la fréquence cardiaque (FC), d'être non invasive et de permettre l'identification plus précoce des réactions neurovégétatives.¹¹ Cependant l'utilité de l'ECG spectral au cours de l'implantation d'un neurostimulateur sacré reste à prouver. Le but de cette étude était de démontrer la supériorité de l'ECG spectral, par rapport au monitoring de la PA et la FC dans la détection de l'HRA induite par la neurostimulation sacrée des blessés médullaires.

Patients

Après accord du Comité d'éthique de l'université de Bordeaux et consentement écrit, dix blessés médullaires, ASA I-III, candidats à l'implantation de stimula-

teurs sacrés, pour rétention urinaire associée à une incontinence par fuite, ont été inclus dans cette étude prospective. Les patients étaient victimes d'accidents de la route ($n = 8$), de sport (rugby, $n = 1$) et de plongeur en piscine ($n = 1$). Trois d'entre eux avaient des manifestations d'HRA modérées (sueurs) lors des contractions vésicales. Le principe et les complications de la technique étaient clairement expliqués et seuls les patients capables d'utiliser correctement le stimulateur et de pratiquer (ou faire pratiquer) des sondages vésicaux, en cas de panne du dispositif, étaient sélectionnés. L'intervention était réalisée à distance du traumatisme médullaire (délai minimum : un an) lorsque la rééducation et le traitement médical (α -bloquants, anti-cholinergiques et injection de toxine botulinique au niveau du sphincter strié)¹² s'avéraient inefficaces.

Méthodes

Protocole d'anesthésie

Tous les patients ont reçu 1 mg de funitrazépan en prémédication et une anesthésie *iv* à objectif de concentration associant 4 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ de propofol et 4 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ de remifentanil sans curarisation. L'intubation et la ventilation mécanique étaient systématiques. Les patients étaient réchauffés à une température centrale (mesurée par voie œsophagienne) entre 36 et 37°C. Les médicaments adrénergiques et anti-cholinergiques ont été proscrits pendant la phase de stimulation.

Technique de stimulation

Après l'induction anesthésique, les patients étaient installés en position genupectorale. Une laminectomie médiane de L2 à S1 et une ouverture de la dure-mère sur plus de 10 cm permettait la visualisation des cinq paires des racines sacrées. La fonction de chaque racine était évaluée par électrostimulation intermittente (trois secondes suivie d'une pause de sept secondes) et observation des réponses musculaires squelettiques et vésicales. L'amplitude, la fréquence, et la durée de chaque stimulus étaient réglées à 1V, 3 Hz et 350 $\mu\text{-sec}^{-1}$, respectivement, pour avoir une réponse des muscles squelettiques : S1 (talon, plante du pied et cinquième orteil) ; S2 (fessiers et solaires) ; S3 (plancher pelvien et fléchisseurs des orteils) ; S4 (sphincter anal et périnée) et S5 pour la zone coccygienne rétroanale. Pour la réponse vésicale, un stimulus de 10V, 30 Hz et 350 $\mu\text{-sec}^{-1}$ était nécessaire. L'efficacité était jugée par une pression vésicale atteignant 50 à 100 cm H₂O. Les racines provoquant des réactions musculaires ou neurovégétatives inadaptées étaient sectionnées. Les électrodes étaient ensuite placées sur les racines motrices efficaces de façon à permettre plusieurs combinaisons

TABLEAU I Caractéristiques cliniques des patients indiquant des racines sacrées évaluées

Patient	Age (ans)	Poids (kg)	Taille (cm)	Niveau lésionnel: présentation cliniques*	Racine antérieures†		Racines postérieures‡	
					Droite	Gauche	Droite	Gauche
1 : M	26	80	175	T12 : paraplégique complète	2, 3, 4	2, 3, 4	3-5	3-5
2 : F	35	62	165	T10 : paraplégique complète	2, 3, 4, 5	2, 3, 4, 5	1-5	1-5
3 : F	38	76	170	T11 : paraplégique incomplète	2, 3, 4	2, 3, 4	3	3
4 : M	26	65	185	C5 : tétraplégique complète	2, 3, 4	2, 3, 4	1-5	1-5
5 : M	31	60	172	T9 : paraplégique complète	2, 3, 4	2, 3, 4	1-5	1-4
6 : F	54	70	162	C7 : tétraplégique incomplète	2, 3, 4	2, 3, 4	3, 4	3, 4
7 : M	44	100	174	C6 : tétraplégique incomplète	2, 3, 4	2, 3, 4	1-5	1-5
8 : M	27	75	170	C5 : tétraplégique complète	2, 3, 4	2, 3, 4	1-5	1-5
9 : M	22	65	172	C5 : tétraplégique incomplète	2, 3, 4, 5	2, 3, 4, 5	2, 3	1, 2, 3, 5
10 : M	18	60	168	C4 : tétraplégique complète	2, 3, 4	2, 3, 4	1-5	1-5

M = masculin; F = féminin; niveau lésionnel: C = cervical; T = thoracique. *Selon les critères de l'American Spinal Injury Association (ASIA): Paraplegia 1991; 29: 573-81. †Racines motrices sélectionnées; ‡Racines sensibles exclues.

TABLEAU II Manifestations d'HRA induites par la stimulation (Stim) des racines sacrées

Patient No	Racines en cause				Réaction sympathique				Réaction parasympathique			
	Ant		Post		PAM (mmHg)		LF (msec ² /Hz)		FC (bpm)		HF (msec ² /Hz)	
	D	G	D	G	(Avant)	(Stim)	(Avant)	(Stim)	(Avant)	(Stim)	(Avant)	(Stim)
4§¶	—	5	3	3	92 ± 13	126 ± 5	360 ± 12	1233 ± 24	66 ± 8	42 ± 1	425 ± 21	763 ± 12
6§	5	5	4	3, 4	78 ± 6	102 ± 8	272 ± 15	675 ± 30	63 ± 5	59 ± 2	325 ± 15	335 ± 10
7§	5	—	2, 5	1, 3, 5	85 ± 10	110 ± 3	325 ± 25	900 ± 32	78 ± 8	69 ± 7	315 ± 10	306 ± 13
8§	—	—	2-5	1-5	78 ± 7	135 ± 7	475 ± 37	1030 ± 45	65 ± 8	60 ± 3	275 ± 15	273 ± 14
9§	—	—	2, 3	1, 2, 3, 5	88 ± 8	130 ± 5	170 ± 12	1056 ± 48	63 ± 6	59 ± 4	330 ± 13	326 ± 10
10§¶	—	—	1-5	1-5	75 ± 4	115 ± 3	326 ± 16	930 ± 52	58 ± 2	43 ± 2	282 ± 14	478 ± 16

Valeurs avant l'induction anesthésique: PAM : 105 ± 25 mmHg; LF : 678 ± 35 msec²/Hz; FC : 88 ± 12 bpm; HF : 475 ± 25 msec²/Hz. HRA = hyperréflexie autonome; PAM = pression artérielle moyenne; Ant. = antérieure; Post. = postérieure; D = droite; G = gauche. Activation significative du système sympathique§ et parasympathique¶ pendant la stimulation. Les patients no. 6, 8 et 10 avaient des manifestations modérées d'HRA (sueurs) en préopératoire.

de stimulation. Ces électrodes étaient protégées par un manchon biocompatible autour duquel la dure-mère est suturée pour permettre l'étanchéité parfaite. Les câbles des électrodes sont reliés à un récepteur interne installé dans l'espace sous-cutané latéro-thoracique (Figure 1). Un émetteur externe mis en regard du boîtier interne (Finetech-Brindley bladder controller™, Neurocontrol Systems, Cleveland, USA) déclenchait la miction. L'érection et la défécation sont également et respectivement déclenchées par la stimulation des racines antérieures S2 et S3. En effet, l'émetteur externe dispose de trois programmes indépendants (I : miction, II : défécation et III : érection). Il est alimenté par des batteries rechargeables ayant une autonomie d'une semaine.

Monitoring peropératoire

La pression artérielle moyenne (PAM) par cathéter radial, la FC, la spO₂, et la fraction expirée en CO₂ ont été enregistrées de manière continue. Parallèlement, l'analyse spectrale de l'ECG était obtenue, en temps

réel, grâce au logiciel (MemCalc™, Suwa Trust, Japan) d'un ordinateur connecté au moniteur d'anesthésie (Datex AS3™, Helsinki, Finland). La séquence des intervalles R-R de l'ECG était décomposée en spectres par la méthode d'entropie maximum:¹³ la zone des fréquences basses (LF : 0,04-0,15 Hz) correspondant à l'activité du système sympathique et celle des fréquences hautes (HF : 0,15-0,4 Hz) au système parasympathique (Figure 2). La profondeur d'anesthésie était contrôlée par un index bispectral de l'électroencéphalogramme entre 40 et 50 (Spacelabs™, Redmond, USA).

Critères de jugement et analyse statistique

La valeur la plus extrême de chaque paramètre était notée une minute avant et à chaque stimulation. Nous avons choisi une différence (Δ) supérieure à 10 % comme l'expression d'HRA. La comparaison (Δ LF vs Δ PAM et Δ HF vs Δ FC) était faite en considérant l'hypertension artérielle comme une stimulation sympathique et la bradycardie comme une réaction

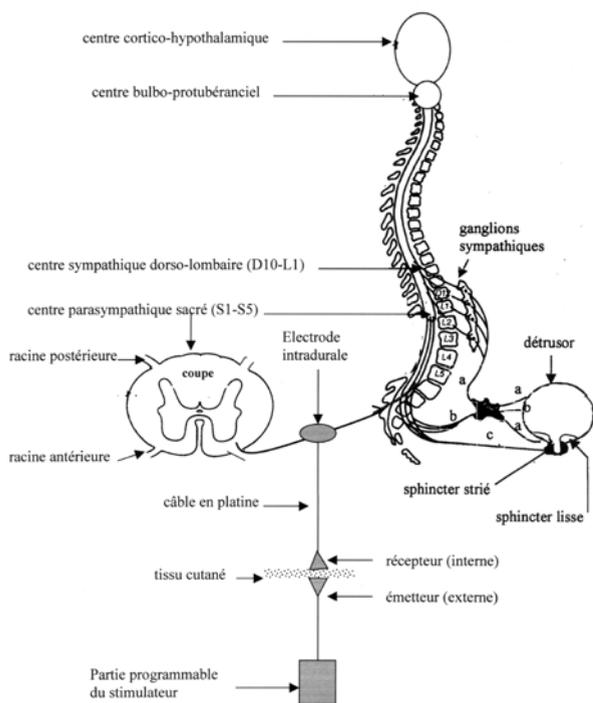


FIGURE 1 Innervation vésico-sphinctérienne et technique de neurostimulation de Brindley. a : nerf hypogastrique : relâchement du détrusor (activité β -adrénergique) et contraction du sphincter lisse (activité -adrénergique). b : nerf pelvien : contraction du détrusor (activité cholinergique de type muscarinique). c : nerf honteux : contraction du sphincter strié et du plancher pelvien pendant la continence et le relâchement de ces structures pendant la miction (activité somatique). Centre cortico-hypothalamique : commande volontaire de la miction. Centre bulbo-protuberantiel : action inhibitrice des réflexes médullaires.

parasympathique. La détection de l'HRA par les deux techniques (spectrale et conventionnelle) était évaluée par un test de concordance basé sur un coefficient kappa (k) : -1 = discordance totale à 1 = concordance totale. Les données paramétriques (exprimées en moyenne \pm déviation standard) étaient comparées par un test de Student avec un $P < 0,05$ considéré comme significatif.

Résultats

Les caractéristiques cliniques des patients sont présentées dans le Tableau I. Le délai moyen entre l'accident et l'implantation du stimulateur était de $8,6 \pm 7,5$ ans. La durée de l'opération était de $5,5 \pm 0,5$ h. La consommation horaire (en $mg \cdot kg^{-1}$) des produits

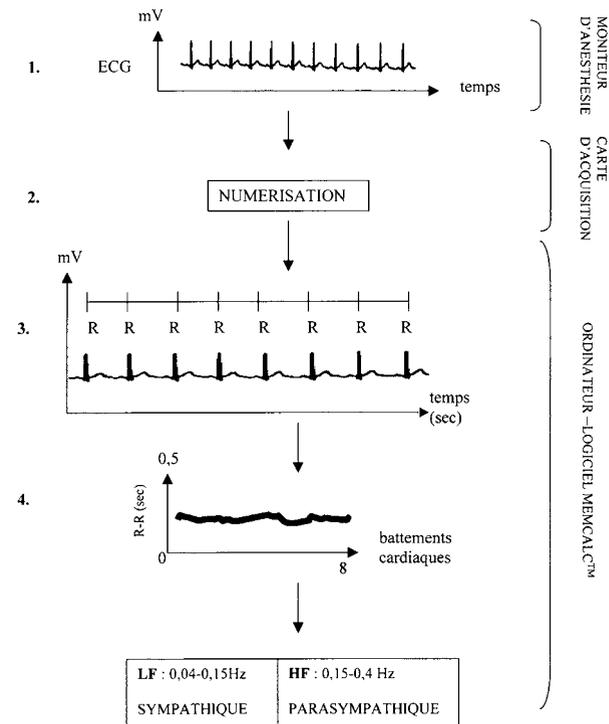


FIGURE 2 Principe de l'analyse spectrale de l'échocardiogramme (ECG). L'ordinateur est connecté au moniteur d'anesthésie par une carte d'acquisition. La numérisation permet à l'ordinateur de lire le signal analogique de l'ECG. Le logiciel MemCalc™ contient un algorithme de calcul automatisé des intervalles R-R. La séquence R-R est décomposée en spectres de basses fréquences (LF) et hautes fréquences (HF).

anesthésiques était faible : propofol ($7,0 \pm 1,5$) et remifentanyl ($0,25 \pm 0,02$). Les patients avaient une stabilité hémodynamique avant chaque stimulation. L'HRA était observée chez six patients. Celle-ci était provoquée par la stimulation de 36 racines postérieures et quatre racines antérieures S5 difficiles à dissocier de leurs contingents postérieurs (Tableau II). Les réactions neurovégétatives étaient détectées dans un délai de $5,3 \pm 1,0$ sec (LF, HF) et $10,4 \pm 1,2$ sec (PAM, FC) : $P < 0,001$. La proportion observée de réactions concordantes était de 85 % entre le LF et la PAM ($k = 0,7$) et 90 % entre le HF et la FC ($k = 0,8$). Ces réactions étaient transitoires disparaissant dans la minute qui suit l'arrêt de la stimulation. Aucune réaction d'HRA n'a été détectée en postopératoire.

Discussion

L'hyperréflexie autonome est une pathologie propre aux blessés médullaires. Elle a été décrite sous différentes appellations : dysréflexie autonome, hyper-réflexie sympathique, hypertension neurogène paroxystique, syndrome viscéral.¹ La gravité hémodynamique de cette réaction justifie le monitoring ciblé. Nos résultats montrent que l'analyse spectrale de l'intervalle R-R de l'ECG permet la détection de l'HRA induite par la stimulation des racines sacrées. Le niveau du traumatisme médullaire était au-dessus de D6 dans les six cas d'HRA détectés ce qui corrobore l'analyse physiopathologique de ce syndrome.

La détection précoce des réactions neurovégétatives est une préoccupation constante de la prise en charge des blessés médullaires. Généralement, après une section complète de la moelle épinière de haut niveau, l'évolution se fait vers une première phase de choc spinal (une à trois semaines) caractérisé par la dépression des réflexes médullaires.¹⁴ Cet état se traduit sur le plan cardiovasculaire par une hypotension artérielle (perte de l'activité sympathique) et une bradycardie par hypertonie parasympathique. Au choc spinal succède un état d'automatisme médullaire marqué par l'HRA. L'appareil vésico-sphinctérien représente le principal site de déclenchement de l'HRA du fait de son innervation particulière (Figure 1).¹⁵ Les réactions peuvent être déclenchées par la distension ou la contraction vésicale mais l'intensité est plus forte avec cette dernière.

Nous avons réalisé une technique de stimulation intradurale décrite par Brindley pratiquée dans 23 centres universitaires au monde.¹⁶ Il existe d'autres possibilités : stimulation des racines sacrées par voie extradurale¹⁷ ou stimulation percutanée du nerf périphérique à son émergence du trou sacré.¹⁸ Cette dernière technique, appelée neuromodulation, est la plus simple à réaliser et présente moins de risques infectieux. Cependant, elle ne permet pas d'effectuer les radicotomies (section des racines) postérieures qui sont nécessaires si l'on veut réduire l'HRA, améliorer la compliance vésicale et faire disparaître l'hyperactivité à l'origine des fuites mictionnelles réflexes.¹⁹

L'analyse spectrale de l'ECG a été validée dans de nombreuses situations cliniques autres que la neurostimulation sacrée.^{11,20,21} Cette technique repose sur le principe de Fourier stipulant que tout signal périodique (son, lumière ou courant électrique) est la superposition d'oscillations simples dites «sinusoïdales ou harmoniques», d'amplitudes et de fréquences variées. Des formules mathématiques comme la transformée de Fourier,²² l'index fractal²³ ou l'entropie maximum permettent la séparation des différentes composantes fréquentielles de la séquence R-R de

l'ECG. En analogie avec les sciences optiques, ces formules se comportent comme un prisme décomposant les différentes couleurs d'une lumière qui le traverse. La technique est très dépendante de la qualité du signal ECG. Elle exige un placement adéquat des électrodes sur le thorax du patient et un choix optimal de la dérivation de façon à bien visualiser les ondes R. Le logiciel MemCalc™ dispose d'un algorithme de détection des pics R et d'exclusion automatique d'artefacts. Ce logiciel développé par Ohtomo *et coll.*¹³ exploite la formule d'entropie maximum.

Pour pouvoir comparer les différents paramètres, nos critères de jugement ont été choisis en rapport avec les données de la littérature sur la corrélation entre réaction sympathique et pression artérielle et entre système parasympathique et fréquence cardiaque.²⁴ Cette approche schématique corrobore le profil neurovégétatif des blessés médullaires et le mécanisme physiopathologique de l'HRA.^{3,25}

En conclusion, l'ECG spectral est une technique non invasive permettant la détection précoce de l'HRA induite par la stimulation des racines sacrées des blessés médullaires. Ces résultats préliminaires demande une confirmation par d'autres études et les implications (diagnostiques et thérapeutiques) des différences observées restent à déterminer.

Remerciements

Dr J. Taillard et V. Sesay : assistants de recherche clinique ; Messieurs B. Crozat, F. Bientz, R. Hayashi, P-E. Hoareau et A. Saito (ingénieurs) pour leur assistance technique ; Dr P. Dehail, Dr P. Perez, Pr J-C Baste et Pr R. Dauman pour leur soutien méthodologique, les médecins et infirmières anesthésistes de Neurochirurgie pour leur participation active.

Références

- 1 Trop CS, Bennett CJ. Autonomic dysreflexia and its urological implications: a review. *J Urol* 1991; 146: 1461-9.
- 2 Schonwald G, Fish KJ, Perkasch I. Cardiovascular complications during anesthesia in chronic spinal cord injured patients. *Anesthesiology* 1981; 55: 550-8.
- 3 Vaidyananthan S, Soni BM, Sett P, Watt JWH, Oo T, Bingley J. Pathophysiology of autonomic dysreflexia: long-term treatment with terazosin in adult and paediatric spinal cord injury patients manifesting recurrent dysreflexic episodes. *Spinal Cord* 1998; 36: 761-70.
- 4 Eltorai I, Kim R, Vulpe M, Kasravi H, Ho W. Fatal cerebral hemorrhage due to autonomic dysreflexia in a tetraplegic patient: case report and review. *Paraplegia* 1992; 30: 355-60.
- 5 Yarkony GM, Katz RT, Wu YC. Seizures secondary to

- autonomic dysreflexia. *Arch Phys Med Rehabil* 1986; 67: 834–5.
- 6 *Albin MS, Bunegin L, Wolf S.* Brain and lungs at risk after cervical spinal cord transection: intracranial pressure, brain water, blood – brain barrier permeability, cerebral blood flow, and extravascular lung water changes. *Surg Neurol* 1985; 24: 191–205.
 - 7 *Van Kerrebroeck PEV, Koldewijn EL, Scherpenhuizen S, Debruyne FMJ.* The morbidity due to lower urinary tract function in spinal cord injury patients. *Paraplegia* 1993; 31: 320–9.
 - 8 *Brindley GS.* The first 500 patients with sacral anterior root stimulator implants: general description. *Paraplegia* 1994; 32: 795–805.
 - 9 *Egon G, Barat M, Colombel P, Visentin C, Isambert JL, Guerin J.* Implantation of anterior sacral root stimulators combined with posterior sacral rhizotomy in spinal injury patients. *World J Urol* 1998; 16: 342–9.
 - 10 *Akselrod S, Gordon D, Ubel EA, Shannon DC, Berger AC, Cohen RJ.* Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control. *Science* 1981; 213: 220–2.
 - 11 *Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology.* Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation* 1996; 93: 1043–65.
 - 12 *Groleau D, Corcos J.* Traitements pharmacologiques des vessies neurogènes. In: Corcos J, Schick E (Eds.). *Les Vessies Neurogènes de l'Adulte*. Masson: Paris, 1996: 162–72.
 - 13 *Ohtomo N, Tokiwano K, Tanaka Y, Sumi A, Terachi S, Konno H.* Exponential characteristics of power spectral densities caused by chaotic phenomena. *J Phys Soc Jpn* 1995; 64: 1104–13.
 - 14 *Dumont RJ, Okonkwo DO, Verma S, et al.* Acute spinal cord injury, part I: pathophysiologic mechanisms. *Clin Neuropharmacol* 2001; 24: 254–64.
 - 15 *deGroat WC, Booth AM.* Physiology of the urinary bladder and urethra. *Ann Int Med* 1980; 92(part 2): 312–5.
 - 16 *Van Kerrebroeck PEV, Koldewijn EL, Debruyne FMJ.* Worldwide experience with the Finetech-Brindley sacral anterior root stimulator. *Neurourol Urodyn* 1993; 12: 497–503.
 - 17 *Sauerwein D, Ingunza W, Fischer J, et al.* Extradural implantation of sacral anterior root stimulators. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1990; 53: 681–4.
 - 18 *Chartier-Kastler EJ, Ruud Bosch JLH, Perrigot M, Chancellor MB, Richard F, Denys P.* Long-term results of sacral nerve stimulation (S3) for the treatment of neurogenic refractory urge incontinence related to detrusor hyperreflexia. *J Urol* 2000; 164: 1476–80.
 - 19 *Koldewijn EL, Van Kerrebroeck PEV, Rosier PFWM, Wijckstra H, Debruyne FMJ.* Bladder compliance after posterior sacral root rhizotomies and anterior sacral root stimulation. *J Urol* 1994; 151: 955–60.
 - 20 *Winchell RJ, Hoyt DB.* Spectral analysis of heart rate variability in the ICU: a measure of autonomic function. *J Surg Res* 1996; 63: 11–6.
 - 21 *Kato M, Komatsu T, Kimura T, Sugiyama F, Nakashima K, Shimada Y.* Spectral analysis of heart rate variability during isoflurane anesthesia. *Anesthesiology* 1992; 77: 669–74.
 - 22 *Challis RE, Kitney RI.* Biomedical signal processing (in four parts). Part 3. The power spectrum and coherence function. *Med Biol Eng Comput* 1991; 29: 225–41.
 - 23 *Akay M, Fischer R.* Fractal analyses of HRV signals: a comparative study. *Meth Inform Med* 1997; 36: 271–3.
 - 24 *Linden D, Diehl RR.* Comparison of standard autonomic tests and power spectral analysis in normal adults. *Muscle Nerve* 1996; 19: 556–62.
 - 25 *Inoue K, Miyake S, Kumashiro M, Ogata H, Yoshimura O.* Power spectral analysis of heart rate variability in traumatic quadriplegic humans. *Am J Physiol* 1990; 258: H1722–H6.