

Réponses posturales orientées induites par stimulations

A Kavounoudias, JP Roll, R Roll, JC Gilhodes, A Bouquerel

Laboratoire de Neurobiologie Humaine
UMR 6562, CNRS-Université de Provence, Marseille

Résumé

Situés à l'interface du corps et du support podal, les mécanorécepteurs de la sole plantaire, sensibles aux déformations mécaniques que subit la peau au contact du sol, doivent jouer un rôle important dans le maintien de la station érigée chez l'homme. Afin d'étudier le rôle spécifique des informations cutanées plantaires dans la régulation posturale, nous avons appliqué des stimulations vibratoires de manière sélective au niveau des trois principaux points d'appui de la sole plantaire; l'hypothèse étant que les mécanorécepteurs plantaires pourraient être à l'origine de la connaissance de la répartition spatiale et des changements de pressions qui s'exercent sur la surface podale au contact du sol. Des études microneurographiques ont montré par ailleurs que la stimulation vibratoire peut activer de manière sélective les mécanorécepteurs à adaptation rapide et lente de la peau et pourrait évoquer des messages sensoriels artificiels simulant une augmentation des forces de pression au niveau de la zone cutanée vibrée. Le résultat majeur qui ressort de cette étude est que la stimulation vibratoire, en modifiant artificiellement la distribution des patterns cutanés plantaires d'un pied par rapport à l'autre ou au niveau d'un même pied, évoque des réponses posturales spatialement orientées dont la nature régulatrice aurait pour objet de ramener le corps dans une position d'équilibre dont il se serait écarté. Ces réponses posturales spécifiques suggèrent que les afférences tactiles plantaires participent d'une manière organisée à la régulation de la posture érigée.

• Introduction

Il est aujourd'hui bien établi que des informations sensorielles multiples participent chez l'homme à l'organisation et au contrôle de la station debout. Parmi celles-ci, les informations vestibulaires [1, 2, 3, 4], visuelles [5, 6, 7, 8, 4] et musculaires [9, 10, 11, 12] occupent une place prépondérante et ont fait l'objet d'un grand nombre d'études. Peu de travaux en revanche se sont intéressés aux informations issues des récepteurs tactiles de la sole plantaire, qui, de par leur localisation à l'interface corps/support, devraient jouer un rôle de toute première importance dans la régulation de l'équilibre postural. Deux types de résultats expérimentaux apportent des arguments indirects en faveur de cette hypothèse : le premier repose sur des méthodes qui consistent à exclure de façon transitoire ces afférences extéroceptives par une hypothermie [13] ou une anesthésie [14, 15] de la sole plantaire. Dans tous les cas, la suppression de ces afférences s'accompagne d'un accroissement significatif de l'instabilité posturale. Des modifications de la réponse posturale consécutive au déplacement sinusoïdal du support peuvent aussi être observées à la suite d'un blocage ischémique pratiqué au niveau de la cheville [16, 17, 18] notamment lorsqu'on la teste au cours d'oscillations de basses fréquences (0,3Hz). Le blocage ischémique aurait en outre un effet sur la

stratégie posturale adoptée pour compenser le déséquilibre induit. Cependant ce type d'intervention n'agit pas sélectivement sur les afférences tactiles puisqu'elle supprime l'ensemble des afférences somatosensorielles provenant du pied. La deuxième méthode expérimentale utilisée pour mettre en évidence le rôle des messages cutanés plantaires dans le contrôle postural consiste à modifier la nature du support sur lequel repose le sujet. En effet, en plaçant les sujets sur une surface revêtue de mousse, Magnusson [13] constate l'occurrence d'oscillations posturales plus amples. A l'inverse, le fait de se tenir debout sur une surface recouverte d'aspérités comme des billes de plomb [19] diminue de manière sensible les oscillations posturales. Cependant, l'inhibition ou la sollicitation globale de l'ensemble des afférences cutanées plantaires ne semble pas suffisante pour rendre compte du rôle fonctionnel très spécifique que les mécanorécepteurs de la sole plantaire sont susceptibles de jouer au plan postural. En effet, des études réalisées au niveau de la peau glabre du pied chez le rat [20] et surtout de la main chez l'homme [21] ont montré que la sensibilité tactile n'est pas homogène sur toute la surface de la peau. Il est alors probable que les afférences tactiles provenant des trois principales zones d'appui du pied [22] aient des fonctions spécifiques attachées à la répartition particulière du poids du corps du sujet, qu'il soit figé dans une attitude ou en mouvement lors d'oscillations ou de déplacements directionnels. Il existe en effet deux grandes catégories de mécanorécepteurs dans la peau : des récepteurs à adaptation lente qui répondent de manière soutenue à une pression dont l'intensité est maintenue constante, et des récepteurs à adaptation rapide qui sont, eux, plutôt sensibles aux variations d'intensité du stimulus. A l'intérieur de chacune de ces catégories on peut identifier des récepteurs de type I lorsque ceux-ci ont un champ récepteur de petite taille dont les bords sont bien délimités, et des récepteurs de type II dont le champ récepteur est au contraire étendu avec des limites plus floues. A la sensibilité spécifique de ces différents types de récepteurs se surajoute une densité inégale de récepteurs sensoriels dans certains territoires et une répartition qualitative différente selon les zones cutanées considérées. Une telle hétérogénéité pourrait être à l'origine de rôles fonctionnels différents joués par la peau. Par exemple, le fait que la capacité de discrimination spatiale soit supérieure à l'extrémité des doigts est très probablement lié à la répartition des récepteurs de type I (à adaptation rapide et lente) dont la densité est croissante depuis la paume de la main jusqu'à la pulpe des doigts où elle est alors maximale [20, 23]. La sole plantaire pourrait donc être dotée de capteurs sensoriels susceptibles de coder l'origine spatiale ainsi que l'amplitude et les variations d'amplitude des déformations mécaniques imposées à la peau qui est en contact avec le sol. En informant sans cesse le système nerveux central sur la répartition et la modulation, dans l'espace et dans le temps, des pressions exercées sur la peau du pied reposant au sol, les messages sensoriels issus des mécanorécepteurs cutanés plantaires pourraient participer d'une manière fine et organisée au contrôle et à la régulation de toute attitude posturale érigée. A l'aide de la vibration mécanique, qui permet d'une part de stimuler de manière sélective ces mécanorécepteurs et d'autre part d'activer des zones différentes du pied, nous avons cherché à évaluer le rôle spécifique des informations cutanées plantaires dans la régulation posturale. On sait en effet, grâce à des enregistrements microneurographiques effectués chez l'homme dans le nerf tibial postérieur de la jambe [24, 25], que les récepteurs cutanés à adaptation lente et rapide situés sur la face antérieure du pied sont très sensibles aux vibrations mécaniques et qu'ils répondent cycle par cycle au stimulus vibratoire pour des fréquences comprises entre 1 et 200-300Hz. En appliquant des stimulations vibratoires sur les différentes zones d'appui de la surface plantaire chez des sujets debout [22], nous avons cherché à évoquer des messages sensoriels cutanés pouvant simuler les modifications de pressions normalement associées à des déplacements corporels; l'hypothèse étant que les mécanorécepteurs cutanés plantaires pourraient être à l'origine de la connaissance de la répartition spatiale des pressions exercées sur la surface podale en contact avec le sol, mais aussi de leur évolution dynamique lors des mouvements corporels. L'analyse

des éventuels effets posturaux qui en résultent devrait nous permettre de préciser la spécificité fonctionnelle des messages cutanés plantaires par rapport à l'ensemble des informations sensorielles normalement impliquées dans le maintien postural.

• **Matériel et méthode**

Cette étude préliminaire a été conduite sur un échantillon de 7 sujets sains, 2 hommes et 5 femmes âgés de 22 à 55 ans.

Dispositif expérimental

La stimulation tactile était délivrée à l'aide de quatre vibreurs inertiels encastrés dans un support reposant sur une plate-forme de force à trois ponts de jauge qui permet d'enregistrer le déplacement du centre de pression podal du sujet dans le plan. Les vibreurs étaient disposés de manière à stimuler les parties antérieure et postérieure de la sole plantaire des deux pieds formant entre eux un angle de 30° (Fig.1A). Afin de limiter la stimulation aux récepteurs sensoriels de la peau, chaque vibreur était ajusté de manière à n'exercer qu'un contact léger sur la sole plantaire de telle manière qu'appliquée sur le sujet maintenu immobile, la vibration soit à l'origine d'une sensation tactile superficielle. La vibration était appliquée durant trois secondes avec une fréquence constante de 80 Hz et une amplitude comprise entre 0,2 et 0,5 mm. Des vibreurs électromagnétiques (Ling Dynamic Systems de type 201) couplés à des amplificateurs de puissance (LDS type O25) ont été utilisés lors d'une étude complémentaire destinée à stimuler les mêmes zones cutanées plantaires avec une fréquence de vibration plus élevée (120Hz) et une amplitude de 0,2 à 0,5mm.

figure 1

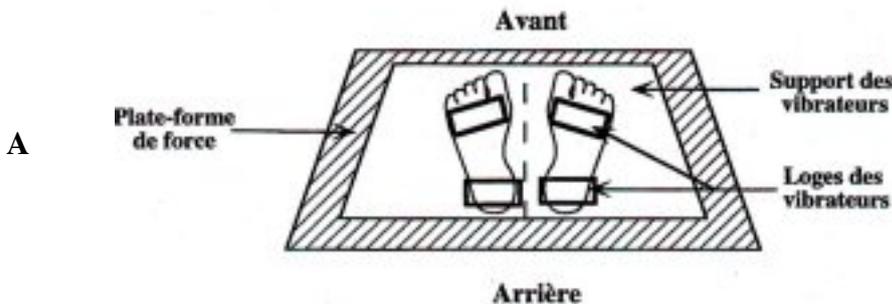
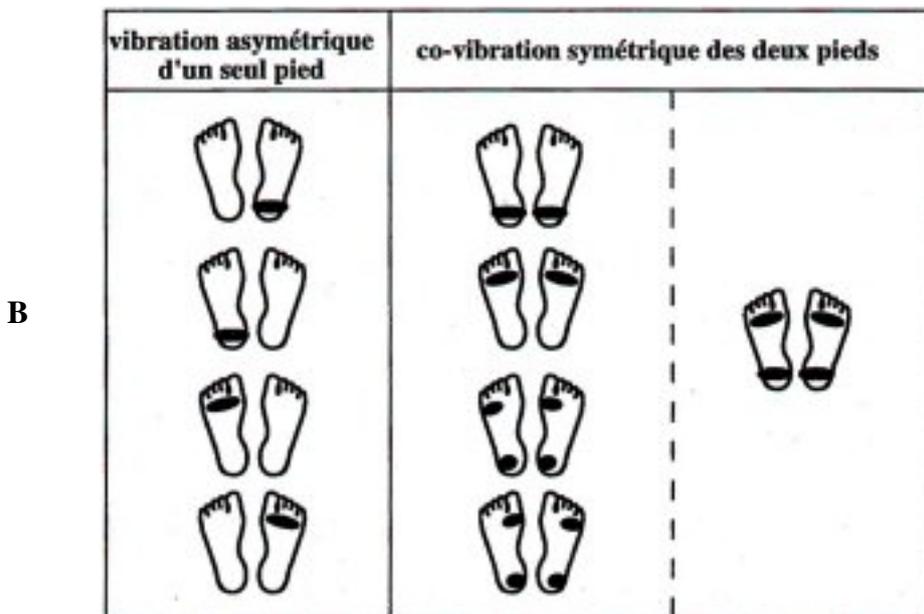


Schéma représentant le dispositif expérimental utilisé : le support dans lequel sont encastrés les vibreurs repose sur la plate-forme de force qui permet de recueillir l'évolution du centre de pression podal des sujets.



Récapitulatif des différentes conditions de stimulation appliquées au niveau de la sole plantaire d'un et/ou des deux pieds sous la forme de pictogrammes. Les vibreurs et les zones d'appui plantaires stimulés sont représentés par les ronds noirs.

Procédure et conditions expérimentales Le sujet se tenait debout, les bras le long du corps, les yeux fermés, ses pieds reposant sur la plate-forme où étaient encastrés les vibreurs. La consigne donnée au sujet était de rester debout et de ne pas s'opposer à l'éventuelle réponse posturale induite par la vibration, un expérimentateur se tenant à ses côtés afin d'éviter tout risque de chute. Hormis la condition contrôle durant laquelle aucune vibration n'était appliquée, neuf conditions de stimulation différentes comprenant chacune deux essais ont été testées. La figure 1B récapitule ces différentes conditions de stimulation sous la forme de pictogrammes. Dans quatre conditions de stimulation, seule la partie antérieure ou postérieure du pied droit ou gauche était stimulée. Dans quatre autres conditions de stimulation utilisées, la vibration a été appliquée simultanément sur la sole plantaire des deux pieds : elle concernait les parties antérieures ou postérieures des deux pieds ou encore le bord latéral externe et interne de chacun d'eux. Dans la dernière condition expérimentale, les deux parties antérieures et postérieures des deux pieds étaient stimulées simultanément. Lorsque la stimulation était appliquée de manière isolée ou combinée sur chacune des parties antérieures ou postérieures, les pieds du sujet étaient disposés de telle sorte que les zones correspondant aux cinq têtes métatarsiennes et au talon reposent respectivement sur un vibreur. Dans le cas des stimulations appliquées sur les bords latéraux des pieds, seules les têtes du premier métatarsien d'un pied et du cinquième métatarsien de l'autre étaient en contact avec un vibreur.

Acquisition et analyse des données L'évolution du centre de pression podal (COP) des sujets recueilli à l'aide de la plate-forme de force a été numérisée avec une fréquence d'échantillonnage de 25Hz. L'enregistrement de cet indice posturographique démarrait deux secondes avant le début de la vibration et se poursuivait trois secondes après son arrêt. Les réponses posturales observées sont analysées à partir du déplacement du COP dans le plan (mm) indiquant, pour chacune des conditions de stimulation testée, la direction et l'amplitude de l'inclinaison du corps. Les résultats individuels obtenus au cours des deux essais réalisés dans chacune des conditions de stimulation sont analysés à partir du relevé de la position atteinte par le COP après deux secondes de vibration. De plus, des ellipses de confiance calculées sur la base de ces différentes positions individuelles indiquent la dispersion des effets obtenus dans le groupe expérimental. Lorsque les réponses individuelles sont homogènes en terme de direction et de sens, les résultats moyens sont calculés et représentés par le déplacement moyen du COP dans le plan (statokinésigrammes).

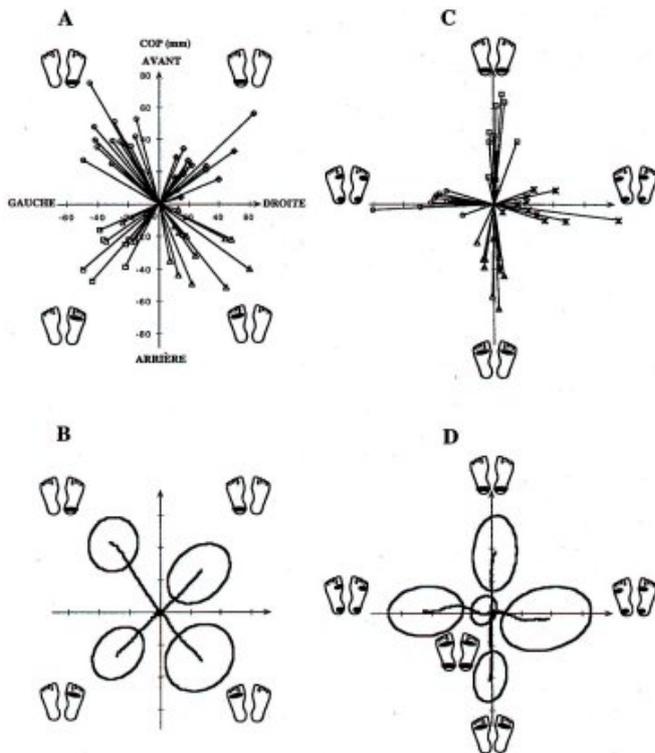
- **Résultats**

Quelle que soit la condition expérimentale, la stimulation vibratoire appliquée au niveau de la sole plantaire des pieds induit, chez tous les sujets testés, des déplacements de l'ensemble du corps clairement orientés. De plus, la direction de ces réponses posturales dépend strictement des zones cutanées plantaires stimulées de l'un et/ou l'autre des pieds.

Réponses posturales induites par la stimulation asymétrique de la sole plantaire d'un seul pied Dans les quatre conditions de stimulation où seul l'avant ou l'arrière d'un pied est stimulé, les effets posturaux évoqués sont orientés suivant une direction oblique et dans le sens opposé à la zone cutanée vibrée c'est-à-dire : vers l'arrière et la gauche (en moyenne après 2s de vibration : $X = -27,6 \pm 12,6 \text{ mm}$ et $Y = -25,3 \pm 11,6 \text{ mm}$) si la stimulation est

appliquée sur la partie antérieure du pied droit, vers l'arrière et la droite ($X=25,8\pm 17,3$; $Y=-28,4\pm 14,7$) s'il s'agit du pied gauche et, réciproquement, vers l'avant et la gauche ($X=-30,6\pm 11,6$; $Y=41,6\pm 12,4$) ou vers l'avant et la droite ($X=25,6\pm 15,8$; $Y=23,5\pm 12,6$) si la stimulation est respectivement appliquée sur le point d'appui postérieur du pied droit ou sur celui du pied gauche (Fig.2A et B). Les résultats individuels obtenus dans les quatre conditions de stimulation différentes (deux essais par sujet) sont illustrés sur la figure 2A à partir du relevé de la position du centre de pression (COP) après deux secondes de vibration. Il apparaît sur cette figure que dans chaque condition de stimulation vibratoire, les réponses posturales évoquées sont toujours orientées dans la même direction et le même sens quel que soit le sujet testé. Des ellipses de confiance ont été calculées à partir des différentes positions relevées; elles illustrent la distribution des effets posturaux induits au niveau de la population. Ces ellipses de confiance sont clairement comprises entre deux axes orthogonaux, ce qui conforte statistiquement le fait que les réponses obtenues pour l'ensemble de la population testée suivent globalement une direction oblique. Les trajectoires moyennes du COP ont été calculées et sont représentées sous la forme de statokinésigrammes moyens sur la figure 2B.

figure 2

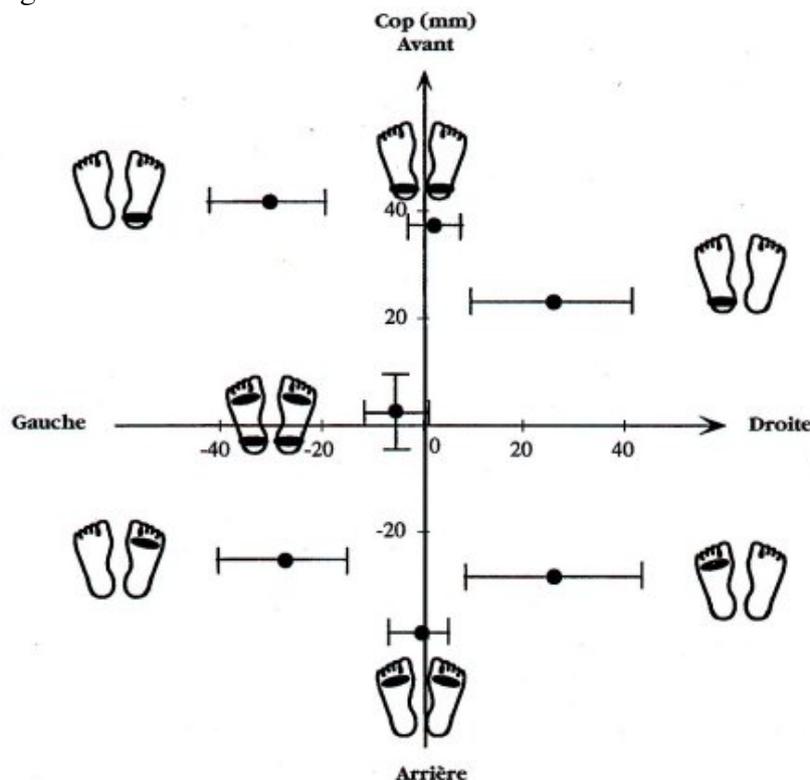


Effets posturaux directionnalisés individuels (A et C) et moyens (B et D) obtenus dans les différentes conditions de stimulation testées. Les résultats individuels sont représentés par la position atteinte par le COP après deux secondes de vibration au cours des deux essais réalisés dans chacune des conditions expérimentales. La dispersion moyenne de la position du COP après deux secondes de vibration (ellipse de confiance) et la trajectoire moyenne du COP sont représentées pour chacune des situations. Les pictogrammes indiquant les zones tactiles plantaires vibrées sont situés en regard des enregistrements posturographiques correspondants. A et B : Réponses posturales orientées induites par la stimulation sélective du point d'appui antérieur ou postérieur de la sole plantaire d'un seul pied. C et D : Réponses posturales induites par l'application de co-stimulations symétriques sur la sole plantaire des deux pieds.

Réponses posturales induites par la co-stimulation symétrique de la sole plantaire des deux pieds Lorsque la stimulation vibratoire est appliquée de manière symétrique sur les zones cutanées plantaires antérieures ou postérieures des deux pieds, les déplacements corporels observés sont orientés dans le plan antéro-postérieur ou latéral et toujours dans le sens opposé par rapport au site de la stimulation (Fig.2C et D). En effet, chez tous les sujets, la co-stimulation de la partie antérieure des deux soles plantaires déclenche une réponse posturale dirigée vers l'arrière (en moyenne après 2s de vibration: $X=-0,9\pm 5,8$ mm et $Y=-39,1\pm 12,9$ mm) et, inversement, vers l'avant ($X=2,4\pm 5,1$; $Y=36,8\pm 19,5$) lorsqu'il s'agit des talons. De même, le corps est entraîné vers la gauche ($X=-43,7\pm 21,2$; $Y=1,4\pm 4,5$) si la co-stimulation est appliquée sur les bords latéraux droits de chacun des pieds et vers la droite ($X=36,2\pm 24,8$; $Y=-$

3,4±9) si elle concerne les bords latéraux gauches. Comme précédemment, l'analyse de l'orientation des effets posturaux individuels (Fig.2C) d'une part, et les ellipses de confiance calculées (Fig.2D) d'autre part, indiquent la bonne homogénéité des réponses obtenues en terme de direction et de sens. Par contre, la co-stimulation des quatre zones antéro-postérieures à la fois n'induit jamais de déplacement corporel orienté dans une direction donnée mais seulement des oscillations posturales réduites autour d'une position moyenne proche de zéro ($X=-5,1\pm6,3$; $Y=2,5\pm6,9$). Ainsi, comme l'illustre la figure 3, la direction des réponses posturales induites lorsque la stimulation est appliquée de manière symétrique sur les deux pieds semble devoir résulter de la combinaison de celles obtenues lors de la sollicitation sélective de chacun d'eux. Alors que, par exemple, la stimulation du talon droit est à l'origine d'un déséquilibre postural orienté vers l'avant et la gauche et celle du talon gauche entraîne le corps vers l'avant et la droite, la co-stimulation des deux induit un déplacement corporel de direction intermédiaire, c'est-à-dire vers l'avant. De même, la stimulation appliquée simultanément sur les zones antérieures et postérieures des deux pieds semble neutraliser les déplacements posturaux de directions opposées qui sont induits par les stimulations isolées de chacune de ces quatre zones.

figure 3



Comparaison des réponses posturales induites par la stimulation isolée et combinée des différentes zones tactiles plantaires.

Les positions moyennes du centre de pression et les écart-types latéraux sont figurés pour les quatre conditions de stimulation asymétrique de la sole plantaire d'un seul pied et pour les différentes conditions de co-stimulation symétrique des deux pieds mettant en jeu les mêmes zones d'appui plantaire.

• Discussion

Le fait majeur qui ressort de l'ensemble de ces résultats est que la stimulation vibratoire appliquée sur la sole plantaire d'un sujet en position érigée déclenche une réponse posturale correspondant à un déplacement de l'ensemble du corps dont la direction est spécifique des zones plantaires stimulées. Ce fait, qui semble indiquer que les réponses posturales évoquées résultent bien de la sollicitation sélective de la modalité tactile plantaire, est conforté par un certain nombre d'arguments expérimentaux apportés par la littérature et par des tests complémentaires réalisés dans cette étude.

La vibration mécanique : un instrument de stimulation sélectif de la sensibilité cutanée plantaire La possible diffusion de la vibration vers les muscles

intrinsèques du pied ou les tendons des muscles de la jambe dont on sait que l'insertion basse se situe au niveau du pied soulève une première question relative à la sélectivité de la stimulation utilisée. En effet, en s'étendant aux récepteurs sensoriels musculaires, celle-ci pourrait alors donner naissance à des réponses posturales d'origine proprioceptive. Or, le déséquilibre postural induit, par exemple, par la stimulation vibratoire des talons étant dirigé vers l'avant, il ne paraît pas être la conséquence d'une diffusion du stimulus vers les tendons du triceps sural (dont l'insertion se situe au niveau du calcanéum). En effet, la stimulation de ces derniers entraîne une réponse posturale bien connue, qui elle, est orientée vers l'arrière [26, 12, 11]. De même, les déplacements corporels latéraux induits lorsque la stimulation vibratoire est appliquée de manière symétrique sur les bords latéraux droits ou gauches des deux pieds sont de directions opposées à ceux évoqués par la co-stimulation du péronier latéral (insertion basse au niveau de la base du premier métatarsien) d'une jambe et du jambier postérieur (insertion basse au niveau du scaphoïde et de différentes bases métatarsiennes) de l'autre [9]. Par ailleurs, des études microneurographiques, qui permettent d'enregistrer l'activité unitaire de différents récepteurs sensoriels à l'aide de microélectrodes métalliques insérées dans un nerf superficiel, ont montré que les sensibilités au stimulus vibratoire des récepteurs cutanés et des terminaisons fusoriales primaires se situent dans des gammes de fréquence vibratoire en partie différentes. Nous avons donc effectué quelques expériences complémentaires afin de vérifier que les réponses posturales restaient inchangées lorsque les mêmes zones cutanées plantaires étaient stimulées à une fréquence (120Hz) située au delà de la bande passante de la majorité des terminaisons fusoriales [27, 28]. A cette fréquence, on peut raisonnablement considérer que le message afférent évoqué par le stimulus vibratoire est majoritairement constitué d'activités sensorielles en provenance de récepteurs cutanés à adaptation rapide et lente [23, 24]. De plus, la vibration prolongée (10 secondes) de la sole plantaire lorsque le sujet est maintenu immobile les yeux fermés n'évoque jamais de sensation kinesthésique alors que, dans le même contexte expérimental, la même vibration appliquée sur différents tendons musculaires est à l'origine d'une sensation illusoire de mouvement dont la direction est celle qui correspondrait à l'étirement du muscle vibré [29, 28]. La vibration mécanique utilisée dans ces conditions expérimentales semble constituer un outil expérimental susceptible de stimuler de manière quasi-spécifique le canal sensoriel tactile. On pourrait alors considérer que la vibration simule, au plan sensoriel, un message codant une augmentation de pression au niveau de la zone stimulée (message par ailleurs réellement évoqué lorsqu'une partie du poids du corps se reporte sur cette zone). Une telle information, simulée par vibration, pourrait alors induire une réponse posturale régulatrice.

Rôle des informations tactiles plantaires dans le contrôle postural Le fait que les déplacements posturaux induits par la stimulation vibratoire soient toujours orientés controlatéralement par rapport au site sur lequel est appliqué la vibration suggère que les informations cutanées plantaires participent au maintien de l'équilibre postural. En effet, en simulant une augmentation de pression au niveau de la zone cutanée plantaire vibrée (ce qui survient réellement lorsque le corps s'incline du côté de cette dernière), une réponse posturale tendant à compenser le déséquilibre simulé serait alors déclenchée dans la direction opposée. Ainsi, par exemple, la stimulation du talon droit des sujets pourrait être à l'origine d'un message sensoriel informant le système nerveux que le corps est incliné en arrière et à droite ce qui a pour conséquence d'entraîner le corps en avant et à gauche. De même, la réponse posturale est dirigée vers l'avant lorsqu'une inclinaison corporelle vers l'arrière est

artificiellement simulée par la co-stimulation symétrique des deux talons. Ces résultats peuvent être confrontés à ceux obtenus lors de la manipulation spécifique des afférences proprioceptives issues des muscles de la cheville. De nombreuses études ont en effet mis en évidence le fait que la stimulation vibratoire appliquée sur différents muscles de la cheville entraîne également des réponses posturales orientées dont la direction s'oppose toujours à l'allongement (simulé par la vibration) du muscle vibré [9, 12, 26]. Ainsi, les messages sensoriels artificiels évoqués par le stimulus vibratoire aussi bien dans la modalité proprioceptive musculaire que dans la modalité tactile appellent des réponses posturales spécifiques qui, par leur orientation, semblent avoir pour but de corriger un écart à la posture verticale. En effet, au cours du maintien postural, un déplacement du corps survenant dans une direction donnée est codé conjointement par les deux modalités, proprioceptive musculaire et cutanée, dès lors qu'il entraîne d'une part l'allongement spécifique de certains muscles et d'autre part l'accroissement des pressions plantaires dans des zones elles-mêmes spécifiques de la direction du déplacement postural. Nos résultats sont sur ce point fonctionnellement congruents qu'il s'agisse des réponses posturales régulatrices ayant pour point de départ la sensibilité des muscles de la cheville ou des réponses posturales régulatrices dont le point de départ est la sensibilité cutanée plantaire.

Le codage spatio-temporel des pressions plantaires La spécificité directionnelle de la réponse posturale évoquée selon la zone cutanée plantaire stimulée semble indiquer que les mécanorécepteurs de la sole seraient responsables du codage de la répartition spatiale des pressions entre les différentes zones d'appui plantaires. La sole pourrait alors être assimilée à une véritable « carte dynamométrique » composée de capteurs susceptibles de coder à chaque instant le point d'application et l'intensité des forces de pression qu'elle subit au contact du support podal. Dès lors, le contraste entre les pressions s'exerçant sur la surface plantaire d'un pied par rapport à l'autre, d'une part, et au niveau de chacun d'eux, d'autre part, pourrait en partie rendre compte de l'état postural dans lequel se trouve le sujet à un instant donné et de ses changements. Cette hypothèse semble appuyée par le fait que l'anesthésie de la sole plantaire d'un seul pied évoque chez les sujets la sensation que leur corps est incliné du côté non anesthésié [14]. Autrement dit, le contraste généré par l'absence d'informations tactiles issues d'un pied et celles maintenues constantes sur l'autre serait la cause du déséquilibre orienté perçu par les sujets. De même, dans cette étude, le fait qu'aucun déplacement corporel orienté ne puisse être induit lorsque la stimulation vibratoire est appliquée de manière symétrique sur la totalité de la sole plantaire des deux pieds suggère qu'elle pourrait être indicatrice d'un accroissement des pressions également réparti sur les deux pieds; accroissement qui ne nécessiterait alors pas de réponse posturale correctrice. A l'inverse, toute stimulation asymétrique susceptible d'induire une modification de la distribution des pressions plantaires d'un pied par rapport à l'autre ou au sein d'un même pied entraîne une réponse posturale tendant à compenser la répartition inégale des pressions, celle-ci signifiant alors que le corps s'est écarté de sa position d'équilibre. Dans la perspective de vérifier l'hypothèse d'un codage spatial et temporel des pressions plantaires par les mécanorécepteurs cutanés, il semblerait nécessaire d'organiser la stimulation de manière dynamique en simulant par exemple un accroissement et une diminution simultanée des forces qui s'appliquent sur les différentes zones d'appui plantaires. Nous développons à cet effet une « carte de stimulation » qui, appliquée sur « la carte dynamométrique » naturelle du pied, serait capable de générer des patterns de stimulation complexes susceptibles de copier l'évolution spatio-temporelle des pressions plantaires normalement

associée aux déplacements réels du corps. Enfin, si les outils expérimentaux dont nous disposons semblent permettre d'étudier de manière isolée le rôle spécifique d'une modalité sensorielle donnée, ils ne permettent pas en revanche de rendre compte de son importance fonctionnelle au regard des autres modalités sensorielles également impliquées dans le contrôle postural. Les travaux de Magnusson [30] montrent à cet égard que les oscillations posturales consécutives à l'anesthésie de la sole plantaire des deux pieds sont plus amples lorsque, en plus de la suppression des afférences extéroceptives, le sujet, les yeux fermés, est privé d'information visuelle. La manipulation simultanée des différentes entrées sensorielles s'impose donc et devrait permettre à terme de mieux comprendre comment les messages sensoriels multiples sont intégrés par le système nerveux central afin d'assurer à tout moment la stabilité posturale désirée dans un contexte environnemental et comportemental particulier.

Bibliographie

- Horak FB, Shupert CL, Dietz V, Horstmann G. Vestibular and somatosensory contributions to responses to head and body displacements in stance. *Exp Brain Res* 100: 93-106, 1994.
- Lacour M, Borel L. Vestibular control of posture and gait. *Arch Ital Biol* 131: 81-104, 1993.
- Horstmann G, Dietz V. The contribution of vestibular input to the stabilization of human posture: a new experimental approach. *Neurosc Lett* 95: 179-184, 1988.
- Berthoz A, Pavard B, Young LR. Perception of linear horizontal self-motion induced by peripheral vision (linearvection). Basic characteristics and visual-vestibular interactions. *Exp Brain Res* 23: 471-489, 1975.
- Bronstein AM, Duckwell D. Automatic control of postural sway by visual motion parallax. *Exp Brain Res* 113: 243-248, 1997.
- Soetiching JF, Berthoz A. Dynamic role of vision in the control posture in man. *Exp Brain Res* 36: 551-561, 1979.
- Lestienne F, Soetiching JF, Berthoz A. Postural readjustments induced by linear motion of visual scenes. *Exp brain Res* 28: 363-384, 1977.
- Lee DN, Lishman JR. Visual proprioceptive control of stance. *J Human Movement Study* 1: 87-95, 1975.
- Gilhodes JC, Kavounoudias A, Roll R, Roll JP. Orientation et régulation de la posture chez l'homme: deux fonctions de la proprioception musculaire? In: Pied, équilibre et posture. Frison-Roche (ed), Paris, 1996, 1-13.
- Gurfinkel VS, Ivanenko YuP, Levik YuS, Babakova A. Kinesthetic reference for human orthograde posture. *Neuroscience* 68: 229-243, 1995.
- Roll JP, Vedel JP, Roll R. Eye, head and skeletal muscle spindle feedback in the elaboration of body references. *Prog Brain Res* 80: 113-123, 1989.
- Roll JP, Roll R. From eye to foot: a proprioceptive chain involved in postural control. In: Posture and gait. B Amblard, A Berthoz, F Clarac (eds), Elsevier, Amsterdam, 1988, 155-164.
- Magnusson M, Embon H, Johansson R, Pyykkö I. Significance of pressure input from the human feet in anterior-posterior postural control. *Acta Oto* 110: 182-188, 1990.
- André-Deshays C, Revel M. Rôle sensoriel de la plante du pied dans la perception du mouvement et le contrôle postural. *Méd Chir Pied* 4: 217-223, 1988.
- Thoumie P, Do MC. Changes in motor activity and biomechanics during balance recovery following cutaneous and muscular deafferentation. *Exp Brain Res* 110: 289-297, 1996.
- Horak FB, Nashner LM, Diener HC. Postural strategies associated with somatosensory and vestibular loss. *Exp Brain Res* 82: 167-177, 1990.
- Diener HC, Dishgans B, Guschlbauer B, Mau H. The significance of proprioception on postural stabilization as assessed by ischemia. *Brain Res* 296: 103-109, 1984.
- Mauritz KH, Dietz V. Characteristics of postural instability induced by ischemic blocking leg afferents. *Exp Brain Res* 38: 117-119, 1980.

- Okubo J, Watanabe I, Baron JB. Study on influence of plantar mechanoreceptor on body sways. *Agressologie* 21:61-69, 1980.
- Leem JW, Willis WD, Chung JM. Cutaneous sensory receptors in the rat foot. *J Neurophysiol* 69: 1684-1699, 1993.
- Johansson RS, Vallbo AB. Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin. *J Physiol* 286: 283-300, 1979.
- Bessou P, Bessou M, Dupui PH, Severac A. Le pied, organe de l'équilibre. In: *Pied, Equilibre et Posture*, Frison-Roche (ed), Paris, 1996, 21-32.
- Roll JP. Sensibilités cutanées et musculaires. In: *Traité de psychologie expérimentale*. M Richelle, J Requin, M Robert (eds) Presse universitaire de France, 1994, 483-542.
- Ribot E, Vedel JP, Roll JP. Vibration sensitivity of slowly and rapidly adapting cutaneous mechanoreceptors in the human foot and leg. *Neurosc Lett* 104: 130-135, 1989.
- Vedel JP, Roll JP. Response to pressure and vibration of slowly adapting cutaneous mechanoreceptors in the human foot. *Neurosc Lett* 34: 289-294, 1982.
- Eklund G. General features of vibration-induced effects on balance. *Upsala Med Sci* 77: 112-124, 1972.
- Roll JP, Vedel JP, Ribot E. Alteration of proprioceptive messages induced by tendon vibration in man: a microneurographic study. *Exp Brain Res* 76: 213-222, 1989.
- Roll JP, Vedel JP. Kinaesthetic role of muscle afferents in man, studied by tendon vibration and microneurography. *Exp Brain Res* 47: 177-190, 1982.
- Roll JP, Vedel JP, Gilhodes JC, Ribot E. Proprioceptive sensory coding of motor activities in man. In: *Sensory plasticity: theoretical, experimental and clinical aspects*. S Ron, R Schmidt, M Jeannerod (eds), Inserm, Paris, 1986, 283-304.

Magnusson M, Embon H, Johansson R, Pyykkö I. The importance of somatosensory informations from the feet in postural control in man. In: *Disorders of posture and gait*, T Brandt, W Paulus, X Bles, M Diettrich, S Krafczyk and A Straube (eds), Stuttgart: 1990, 190-193.