



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

École Doctorale BioSE (Biologie - Santé – Environnement)

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ HENRI POINCARÉ

Mention : « Sciences de la Vie et de la Santé »

par **Alexis LION**

**Modifications des stratégies sensori-motrices de l'équilibration en
fonction du type d'exercice et de perturbations de l'homéostasie**

Le 13 décembre 2010

Membres du Jury :

Rapporteurs :

Monsieur Pierre DENISE

Professeur, Université de Caen Basse-Normandie, Caen

Monsieur Thierry PAILLARD

Professeur, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Tarbes

Examineurs :

Monsieur Philippe PERRIN

Professeur, Université Henri Poincaré, Nancy-Université,
Directeur de Thèse

Monsieur Jean-Louis GUÉANT

Professeur, Université Henri Poincaré, Nancy-Université,
Directeur INSERM UMR_S 954

Madame Dominique VIBERT

Professeur, Université de Berne, Berne

Monsieur Gérome GAUCHARD

MCU-HDR, Université Henri Poincaré, Nancy-Université

Membre invité :

Monsieur Gilles BOSSER

Docteur, Institut Régional de Réadaptation, Nancy

INSERM UMR_S 954, NGERE - Nutrition-Génétique et Exposition aux Risques Environnementaux,
Faculté de médecine, Bâtiment C 2ème étage, 9 avenue de la Forêt de Haye - B.P. 184, 54505
Vandoeuvre-lès-Nancy.

École Doctorale BioSE (Biologie - Santé – Environnement)

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ HENRI POINCARÉ

Mention : « Sciences de la Vie et de la Santé »

par **Alexis LION**

**Modifications des stratégies sensori-motrices de l'équilibration en
fonction du type d'exercice et de perturbations de l'homéostasie**

Le 13 décembre 2010

Membres du Jury :

Rapporteurs :

Monsieur Pierre DENISE	Professeur, Université de Caen Basse-Normandie, Caen
Monsieur Thierry PAILLARD	Professeur, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Tarbes

Examineurs :

Monsieur Philippe PERRIN	Professeur, Université Henri Poincaré, Nancy-Université, Directeur de Thèse
Monsieur Jean-Louis GUÉANT	Professeur, Université Henri Poincaré, Nancy-Université, Directeur INSERM UMR_S 954
Madame Dominique VIBERT	Professeur, Université de Berne, Berne
Monsieur Gérome GAUCHARD	MCU-HDR, Université Henri Poincaré, Nancy-Université

Membre invité :

Monsieur Gilles BOSSER	Docteur, Institut Régional de Réadaptation, Nancy
------------------------	---

INSERM UMR_S 954, NGERE - Nutrition-Génétique et Exposition aux Risques Environnementaux,
Faculté de médecine, Bâtiment C 2ème étage, 9 avenue de la Forêt de Haye - B.P. 184, 54505
Vandoeuvre-lès-Nancy.

Table des matières

Remerciements	5
I – Introduction générale.....	7
II – Fonction d’équilibration.....	10
II.1 – Contrôle du regard.....	12
II.1.1 – Mouvements oculaires.....	12
II.1.2 – Orientation et stabilisation du regard	13
II.2 – Contrôle de la posture	14
II.2.1 – Maintien de la posture	16
II.2.2 – Stabilisation de la posture.....	18
III – Effets de l’exercice sur la fonction d’équilibration	21
III.1 – Effets du type d’exercice sur la fonction d’équilibration.....	21
III.2 – Effets de la fatigue et des modifications de l’homéostasie liées à l’exercice sur la fonction d’équilibration	23
III.3 – Exercices et pathologies liés à la fonction d’équilibration.....	25
IV – Modèle neurosensoriel : l’équilibration en cyclisme	26
IV.1 – Cyclisme traditionnel.....	26
IV.2 – Vélo Tout Terrain	28
V – Première étude : influence différenciée de la pratique du cyclisme sur route et du vélo tout terrain sur le contrôle de l’équilibre et l’organisation neurosensorielle	32
V.1 – Rappel	32
V.2 – Matériels et méthodes	33
V.2.1 – Participants	33
V.2.2 – Questionnaire	34
V.2.3 – Evaluation posturographique	34
V.2.4 – Evaluation de la fonction visuo-oculomotrice.....	38
V.2.5 – Evaluation de la verticale visuelle subjective.....	41
V.2.6 – Analyse statistique	41

V.3 – Résultats	42
V.4 – Discussion	54
V.4.1 – Rôle de l’environnement et de l’équipement dans le contrôle de l’équilibre des cyclistes.....	54
V.4.2 – Rôle du système visuel dans le contrôle de l’équilibre des cyclistes.....	55
V.4.3 – Rôle du système vestibulaire dans le contrôle de l’équilibre des cyclistes.....	57
V.4.4 – Rôle du système somatokinesthésique dans le contrôle de l’équilibre des cyclistes...	58
V.4.5 – Conclusion.....	59
 VI – Deuxième étude : exercice et déshydratation : un rôle possible de l’oreille interne dans les troubles du contrôle de l’équilibre	60
VI.1 – Rappel	60
VI.2 – Matériels et méthodes	61
VI.2.1 – Participants	61
VI.2.2 – Epreuve d’effort.....	61
VI.2.3 – Exercice.....	62
VI.2.4 – Mesures biologiques	63
VI.2.5 – Evaluation posturographique.....	63
VI.2.6 – Procédure.....	63
VI.2.7 – Analyse statistique	64
VI.3 – Résultats.....	65
VI.4 – Discussion	69
VI.4.1 – Exercice, déshydratation et effecteur.....	69
VI.4.2 – Exercice, déshydratation et intégration centrale de l’information.....	70
VI.4.3 – Exercice, déshydratation et capteurs sensoriels.....	71
VI.4.4 – Exercice, déshydratation et récupération	72
VI.4.5 – Conclusion.....	72
 VII – Troisième étude : vertiges induits par la pratique du vélo tout terrain descente ...	73
VII.1 – Rappel.....	73
VII.2 – Matériels et méthodes.....	74
VII.2.1 – Participants.....	74
VII.2.2 – Questionnaire	74
VII.2.3 – Analyse statistique.....	75

VII.3 – Résultats.....	75
VII.4 – Discussion.....	77
VII.4.1 – Mécanismes physiopathologiques des vertiges en cyclisme sur route.....	77
VII.4.2 – Mécanismes physiopathologiques des vertiges en VTT descente	77
VII.4.3 – Prévalance des vertiges dans la vie de tous les jours.....	78
VII.4.4 – Conclusion	79
VIII – Discussion générale.....	80
IX – Conclusion et perspectives	84
X – Références bibliographiques.....	86
XI – Annexes.....	108
Annexe 1 : Journal of Electromyography and Kinesiology 2009;19:623-630..	108
Annexe 2 : Journal of Electromyography and Kinesiology 2010;20:1196-1202.	117
Annexe 3 : Journal of Vestibular Research 2010;20:211-212.	125
Annexe 4 : Journal of Electromyography and Kinesiology 2010;20:162-169.	128

Remerciements

A Monsieur le Professeur Philippe Perrin pour m'avoir accueilli dans votre laboratoire et pour m'avoir guidé durant ces six dernières années. Vos conseils, votre expérience et votre confiance m'ont permis d'aller jusqu'au bout de ce projet. Vous m'avez permis de tisser des liens sur le plan local avec l'Université, l'Inserm et certains services du CHU de Nancy, mais également sur les plans national et international lors de congrès ou de réunions de sociétés scientifiques et médicales avec des chercheurs de renommée mondiale.

A Monsieur le Professeur Jean-Louis Guéant, pour votre confiance et votre bienveillance, pour m'avoir accepté dans votre équipe de recherche à l'Unité 954 de l'Inserm et pour avoir accepté de juger ce travail.

A Messieurs les Professeurs Pierre Denise et Thierry Paillard, pour avoir accepté de consacrer une partie de votre temps pour être les rapporteurs de ce travail.

A Madame le Professeur Dominique Vibert, pour vos conseils avisés et pour avoir accepté de juger ce travail.

A Monsieur Gérome Gauchard, pour votre disponibilité et vos conseils avisés, pour m'avoir soutenu et guidé dans ce travail de thèse et pour avoir accepté de juger ce travail.

A Monsieur Gilles Bosser, pour votre disponibilité et vos conseils avisés, pour m'avoir soutenu et guidé dans ce travail de thèse et pour avoir accepté de juger ce travail.

A Monsieur Dominique Deviterne, pour vos précieux conseils et pour m'avoir initié à l'analyse statistique.

A Monsieur Karim Djaballah, pour avoir encadré l'ensemble des épreuves d'effort.

A Monsieur le Professeur Jean-Pierre Mallié, pour votre aide à l'acquisition et à l'interprétation de données.

A Monsieur le Professeur Pierre Lascombes, pour votre soutien, avec mes respectueuses considérations.

A l'équipe de Troina, pour votre expérience enrichissante.

Aux organisateurs des compétitions.

A toutes les personnes volontaires qui ont accepté de participer à ces études.

A mes parents.

A Valérie, ma sœur, à Joël, son mari, à Corentin et à Maeva, mon neveu et ma nièce.

A toute ma famille.

A tous ceux et celles qui m'ont aidé par un mot, un geste et souvent bien plus, sans même le savoir : Alexandre, Aline, Anne-Cécile, Annie, Anthony, Cédric, Christiane, Dominique, Emilie, Guillaume, Jules, Julien, Marlène, Nathalie, Pierre, Rémy, Renaud, Séverine, Stève, *etc.*

I – Introduction générale

Seules les statues sont immobiles. Debout, au repos, le corps n'est jamais immobile ; il oscille en permanence suivant des rythmes particuliers et complexes qui rendent compte du fonctionnement des différentes boucles sensori-motrices qui placent et maintiennent la projection du centre de gravité à l'intérieur du polygone de sustentation avec un minimum d'énergie. La coordination entre posture, équilibre et mouvement est certainement l'une des fonctions principales du système de contrôle postural [Massion, 1994].

Le contrôle postural est un comportement moteur permettant la maîtrise de l'équilibre. L'équilibration est une fonction sensori-motrice qui assure en permanence la stabilité dynamique de la posture et l'orientation du corps dans l'espace [Massion, 1994]. Cette fonction d'équilibration nécessite l'intégration, via les noyaux vestibulaires du tronc cérébral, des informations visuelles, vestibulaires et somesthésiques [Black *et al.*, 1983 ; Black *et al.*, 1995 ; Smetacek & Meschner, 2004].

Il est en effet aujourd'hui bien établi que des informations sensorielles multiples participent chez l'homme à l'organisation et au contrôle de la station debout, parmi lesquelles les informations vestibulaires [Horstmann & Dietz, 1988 ; Lacour & Borel, 1993 ; Horak *et al.*, 1994], visuelles [Berthoz *et al.*, 1975 ; Lee & Lishman, 1975 ; Lestienne *et al.*, 1977 ; Soetiching & Berthoz, 1979 ; Horak *et al.*, 1990 ; Bronstein & Duckwell, 1997 ; Bosman *et al.*, 1999], proprioceptives [Mauritz & Dietz, 1980 ; Diener *et al.*, 1984b ; Roll & Roll, 1988 ; Roll *et al.*, 1989 ; Gurfinkel *et al.*, 1995 ; Ghilodes *et al.*, 1996] et extéroceptives plantaires [Okubo *et al.*, 1980 ; André-Deshays & Revel, 1988 ; Magnusson *et al.*, 1990a ; Magnusson *et al.*, 199b ; Thoumie & Do, 1996 ; Wu & Chiang, 1997 ; Kavounoudias *et al.*, 1999]. Ces informations participant au contrôle de la posture et de l'équilibre ont chacune un poids relatif qui varie d'un individu à l'autre [Lacour *et al.*, 1997 ; El-Kahky *et al.*, 2000] et, chez le même sujet, d'une période de sa vie à une autre [Lee & Lishman, 1974 ; Brandt *et al.*, 1976 ; Mirka & Black, 1990], voire d'un instant à l'autre selon les difficultés d'équilibration à résoudre et le contexte environnemental [Lisbonis *et al.*, 1999]. La contribution de ces afférences peut également varier en fonction de pathologies atteignant soit directement ces capteurs [Tagushi, 1978 ; Norré, 1990 ; Vitte *et al.*, 1991 ; Roques *et al.*, 1992 ; Guidetti *et al.*, 1993], pouvant être suivies d'une guérison ou de la mise en place de mécanisme de compensation, soit les centres nerveux supérieurs [Mauritz *et al.*, 1979 ; Diener *et al.*, 1984a ; Horak & Nashner, 1986 ; Horak, 1988 ; Bronstein *et al.*, 1990 ; Norré, 1990 ; Horak, 1992 ; Roques *et al.*, 1992 ; Vitte, 1992]. De plus, la sensibilité des individus aux informations visuelles varie également

en fonction de l'expérience et des apprentissages [Mesure & Crémieux, 1992 ; Crémieux & Mesure, 1994]. Enfin, le rôle des activités physiques et sportives semble améliorer le contrôle postural [Burton & Davis, 1992 ; Crémieux & Mesure, 1992 ; Mesure *et al.*, 1994 ; Crémieux *et al.*, 1995 ; Mesure *et al.*, 1995a ; Mesure *et al.*, 1995b], notamment chez le sujet âgé [Campbell *et al.*, 1997 ; Gauchard *et al.*, 1999 ; Perrin *et al.*, 1999 ; Gauchard *et al.*, 2001 ; Gauchard *et al.*, 2003a, Gauchard *et al.*, 2003b, Buatois *et al.*, 2007], en permettant l'acquisition de nouvelles stratégies motrices [Lord & Castell, 1994 ; Wolfson *et al.*, 1996 ; Buchner *et al.*, 1997], mais également le maintien de la sensibilité de certains capteurs [Hu & Woollacott, 1994 ; Perrin *et al.*, 1998].

Le sujet sportif, par l'acquisition de nombreuses qualités sensorimotrices dans des conditions d'exécution exceptionnelles propres à la discipline [Ekblom, 1987 ; Crémieux *et al.*, 1997], constitue un modèle [Golomer *et al.*, 1999], notamment dans le cadre d'études concernant les mécanismes de l'équilibration [Clément & Rezette, 1985 ; Rezette & Amblard, 1985 ; Debu & Woollacott, 1988 ; Perrin *et al.*, 1989 ; Perrin *et al.*, 1991a ; Perrin *et al.*, 1991b ; Perrin & Perrin, 1993 ; Perrot *et al.*, 1996 ; Perrin *et al.*, 1998 ; Perrot *et al.*, 1998 ; Hugel *et al.*, 1999 ; Perrin *et al.*, 2002 ; Vuillerme *et al.*, 2001a ; Davlin, 2004 ; Herpin *et al.*, 2010]. Certains travaux ont permis de souligner la variabilité quant au poids de chaque entrée sensorielle de la fonction d'équilibration, en particulier selon la nature des activités physiques et sportives [Crémieux & Mesure, 1992 ; Mesure & Crémieux, 1992].

La pratique d'activités physiques peut donc permettre l'acquisition et l'intégration de nouvelles habiletés motrices propres à la nature de l'activité considérée. Ces nouvelles habiletés motrices apportent l'automatisation du geste, un développement ou une amélioration du traitement des entrées sensorielles, une acquisition de programmes moteurs particuliers. Les pratiques sportives et les apprentissages moteurs créent de nouvelles connexions neuronales entre les aires perceptives et les aires motrices, qui rendent la réponse motrice plus rapide. Il apparaît alors un phénomène d'automatisation [Smetacek & Meschner, 2004]. Afin de réaliser des gestes moteurs sportifs complexes, le sportif doit développer et entraîner son équilibre. L'amélioration des performances motrices est effective après plusieurs années d'entraînement ou de pratique sportive. Davlin [2004] a montré que le contrôle postural des gymnastes est meilleur que celui d'autres sportifs et que celui des sujets témoins, cette supériorité pouvant être liée à l'entraînement dans des situations nombreuses et variées. Les résultats de l'étude menée par Davlin [2004] concordent avec ceux de Vuillerme *et al.* [2001a]. En effet, dans des tâches d'équilibre complexe, les gymnastes ont de meilleures performances posturales que celles des tennismen, des handballeurs et des footballeurs. Il

apparaît alors que les gymnastes auraient de bonnes aptitudes à changer d'informations sensorielles dominantes pour s'équilibrer en privilégiant essentiellement la proprioception lorsque les informations visuelles sont absentes. Les gymnastes seraient ainsi moins dépendants des informations visuelles que les autres sportifs testés. La proprioception semble donc être l'afférence sensorielle la plus susceptible d'acquisition ou d'éducation par la pratique d'activités physiques et sportives [Crémieux *et al.*, 1995 ; Mesure *et al.*, 1995b ; Denis *et al.*, 1996 ; Perrin, 1996 ; Perrin *et al.*, 2002]. Il a été montré par ailleurs que les réponses visuo-oculomotrices des tireurs sont d'une plus grande rapidité que celles de sujets témoins [Morrillo *et al.*, 2006]. Cette étude montre bien les corrélations entre une pratique sportive et les performances visuo-oculomotrices. De plus, il semble que l'exercice altère immédiatement et de manière éphémère la fonction d'équilibration [Nardone *et al.*, 1997 ; Nardone *et al.*, 1998 ; Bove *et al.*, 2007 ; Dickin & Doan, 2008 ; Fox *et al.*, 2008]. Toutefois, les mécanismes, qui peuvent être liés à des modifications de l'homéostasie, expliquant cette détérioration temporaire, sont encore mal connus. Enfin, l'exercice étant aussi connu pour être un facteur de blessures, il est nécessaire de mieux connaître les facteurs de risque associé à l'exercice qui pourraient avoir des conséquences sur la fonction d'équilibration.

Cette thèse a donc pour objet d'évaluer les éventuelles modifications des stratégies sensori-motrices physiologiques et compensatoires de l'équilibration en fonction du type d'exercice et des perturbations de l'homéostasie.

Dans cette thèse, le cyclisme a été utilisé comme modèle neurosensoriel. Les différences de nature de terrains, de types d'effort et d'attitudes posturales spécifiques au vélo tout terrain (VTT) et au cyclisme sur route induisent également des modifications au niveau énergétique et ostéogénique ; ainsi est-il aussi possible d'avoir une différenciation dans l'acquisition et le traitement des informations sensorielles entre routiers et vététistes. Par ailleurs, le cyclisme constitue un modèle idéal permettant l'évaluation des mécanismes responsables de la perturbation temporaire de la fonction d'équilibration à la suite d'un exercice. Les spécificités du VTT et du cyclisme sur route pourraient également expliquer des mécanismes physiopathologiques différents dans la survenue de troubles de l'équilibre.

Enfin, ce travail visera à identifier des avantages et des inconvénients, dans la vie quotidienne, des activités physiques et sportives, dont la pratique toutefois paraît actuellement être un des seuls moyens pour acquérir ou maintenir un niveau de régulation posturale efficace.

II – Fonction d'équilibration

L'homme est un organisme pluriarticulé soumis aux lois inéluctables de la gravité. En raison de l'appui bipodal, le rapport "surface d'appui / taille" est faible du fait de l'étroitesse du polygone de sustentation et de la situation haute du centre de gravité en avant de la deuxième ou de la troisième vertèbre sacrée [Perrin & Lestienne, 1994 ; Gagey & Weber, 1995]. Le maintien de l'équilibre en position debout est alors assuré lorsque la verticale passant par le centre de gravité se projette à l'intérieur de la surface d'appui au sol, c'est-à-dire la surface des pieds et la zone qui les sépare. L'homme doit donc corriger en permanence les micro-déplacements physiologiques de son centre de gravité pour que cette verticale se projette toujours dans ce polygone de sustentation. Ainsi, le maintien de la posture, beaucoup plus instable que celle des quadrupèdes, nécessite l'intervention de mécanismes complexes contrôlés par le système nerveux central et sous-tend un système de régulation tonique postural [Massion & Viallet, 1990 ; Crémieux *et al.*, 1995].

Comme les autres espèces animales, l'homme est d'abord un organisme qui agit dans et sur son environnement et y réagit par ses actions appropriées. Se maintenir et se mouvoir dans un environnement physique aussi contraignant met en œuvre un flux considérable d'informations qui seront traitées par les centres nerveux afin de contrôler l'activité musculaire nécessaire à assurer la cohésion mécanique entre les différents segments corporels [Perrin & Lestienne, 1994]. L'activité des effecteurs croisant chaque articulation concourt à éviter l'effondrement de l'architecture osseuse tout en autorisant une très grande mobilité. Selon Massion et Woollacott [1996], deux types d'habiletés motrices sont identifiées pour la coordination motrice : la première implique le contrôle moteur volontaire et inclut des activités comme la coordination œil-main par exemple, et la seconde implique le contrôle de la posture ou de l'équilibre. Cette dernière constitue réellement le fondement de toute habileté motrice volontaire, chaque mouvement engendré par l'individu étant élaboré à la fois par des composantes posturales qui stabilisent le corps et par des composants de force motrice qui sont en relation avec le but recherché du mouvement. Pourtant, si l'importance du contrôle postural dans de nombreuses activités comme la station debout, la marche ou des activités de manipulation n'est plus à démontrer, il n'y a encore ni définition universelle du contrôle postural, ni réel consensus sur les mécanismes qui sous-tendent la fonction d'équilibre.

Ainsi, une définition pourrait être que la fonction d'équilibration soit une fonction plurimodale affectée au maintien de l'équilibre chez l'homme en toutes circonstances statiques et dynamiques qui nécessite le traitement central de différents types d'informations

neurosensorielles – visuelles, vestibulaires, proprioceptives et extéroceptives plantaires – et d'informations en relation avec la planification du mouvement volontaire afin d'élaborer une réponse motrice adaptée en fonction de la tâche à exécuter et des contextes cognitif et environnemental. Cette réponse motrice vise à stabiliser à la fois la posture par le réflexe vestibulo-spinal et le regard par les réflexes oculaires d'origine visuelle et vestibulaire (Figure 1).

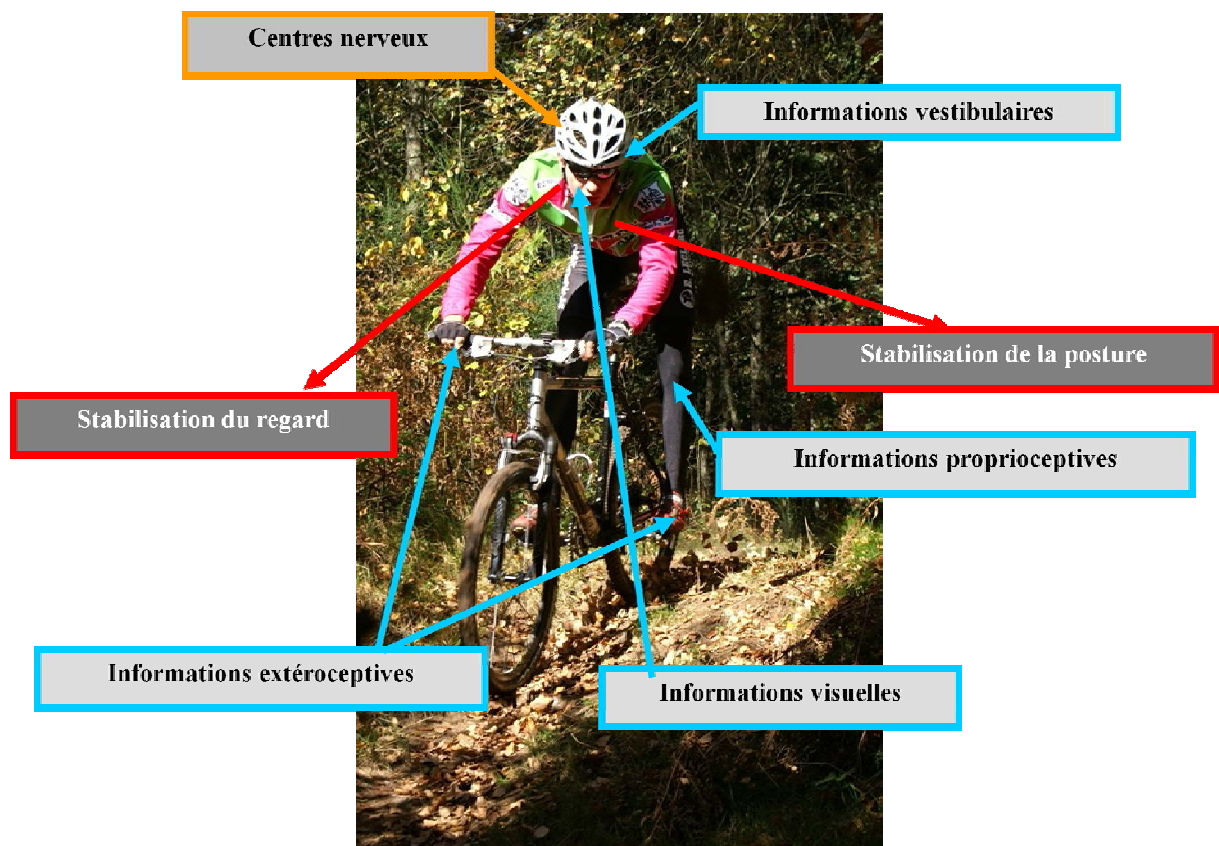


Figure 1 - L'équilibration : une fonction plurimodale. La fonction d'équilibration est la stabilisation du regard et de la posture via l'intégration par les centres nerveux des informations visuelles, vestibulaires, extéroceptives et proprioceptives.

II.1 – Contrôle du regard

Le contrôle du regard comprend d'une part l'orientation du regard qui s'effectue par l'intermédiaire des mécanismes de saccade oculaire et d'autre part la stabilisation du regard qui s'opère par l'intermédiaire des réflexes oculaires principalement d'origine vestibulaire et visuelle.

II.1.1 – Mouvements oculaires

Trois mouvements oculaires élémentaires (les mouvements de type saccade oculaire, ceux de type poursuite oculaire et ceux de type vergence) participent à l'orientation et à la stabilisation du regard. Ces mouvements sont effectués pour chaque œil au moyen de six muscles et de trois nerfs oculomoteurs (III, IV et VI). Les noyaux oculomoteurs, les nerfs dont ils sont issus et les muscles qu'ils innervent constituent la voie finale commune pour tous les mouvements oculaires [Pierrot-Deseilligny, 2004].

Les saccades, qui sont des mouvements conjugués des yeux caractérisés par leur rapidité (600 °/s, 500 m/s), leur fréquence variant de 0,1 à 1 Hz, leur durée courte (0,01 à 0,05 s) et leur faible amplitude (1 à 25 minutes d'arc), permettent à l'œil de quitter une cible située dans le champ visuel de la fovéa pour la remplacer par une cible localisée dans le champ visuel périphérique. Comme leur vitesse est élevée, la vision n'est pas altérée par ce déplacement [Wardak & Duhamel, 2004].

La poursuite oculaire est un mouvement continu, lent et conjugué des deux yeux consécutif au déplacement d'une cible ponctuelle ou large dans le champ visuel, dont le but est une fovéation d'une cible visuelle mobile et son maintien sur la zone centrale de la rétine [Young, 1977 ; Wardak & Duhamel, 2004]. La poursuite continue (smooth pursuit) est caractérisée par une synchronisation des mouvements oculaires avec ceux de la cible : l'œil glisse à une vitesse voisine de celle de la cible. Ce dernier mécanisme, dont la latence est de 140 ± 20 ms, permet de suivre le mouvement de la cible jusqu'à ce que l'œil atteigne une vitesse seuil (35 ± 5 °/s) au-delà de laquelle apparaissent des saccades de correction (ou de rattrapage) [Sibel *et al.*, 1993 ; Wardak & Duhamel, 2004]. Une poursuite dans laquelle survient, entre autres, des saccades de correction, est donc appelée poursuite saccadée (ou saccadique) dont les mouvements oculaires sont constitués par une suite de sauts et de pauses.

Enfin, la vergence est un mouvement disjoint des yeux dont les axes se rapprochent (convergence) ou s'éloignent (divergence) par opposition aux mouvements conjugués ou

version. Lorsque les axes des yeux se rapprochent, il s'agit de la convergence. Lorsqu'ils s'éloignent, il s'agit de la divergence. Ces mouvements de vergence permettent de fixer un point à une distance proche du corps en évitant une diplopie qui serait préjudiciable à une vision nette de l'objet [Wardak & Duhamel, 2004].

II.1.2 – Orientation et stabilisation du regard

L'orientation du regard est assurée par les saccades oculaires qui permettent de changer l'image sur la fovéa. Les saccades oculaires peuvent être réflexes, en réponse à un stimulus auditif, somesthésique ou visuel survenant brutalement dans le champ visuel périphérique, ou volontaires, déclenchées de façon interne par le sujet au moment où il le souhaite, vers une cible visible ou non [Sibel *et al.*, 1993 ; Pierrot-Deseilligny, 2004 ; Wardak & Duhamel, 2004]. La saccade volontaire nécessite donc une forte composante attentionnelle [Adam *et al.*, 2000 ; Kobayashi *et al.*, 2004 ; Pierrot-Deseilligny *et al.*, 2004 ; Meyer *et al.*, 2007]. De plus, tout mouvement naturel d'orientation du regard vers un objet met en jeu une étroite coordination entre les mouvements de tête et des yeux voire de l'ensemble du corps.

La stabilisation du regard est à la fois la résultante de la posture et un des moyens de contrôle postural servant à déterminer la verticalité [Berthoz & Melvill Jones, 1985]. La stabilité visuelle est assurée essentiellement par le jeu des réflexes oculaires d'origine vestibulaire, comme le réflexe vestibulo-oculaire, ou visuelle, comme le réflexe optocinétique. La combinaison des activités de ces deux réflexes permet une perception claire de l'environnement durant le mouvement. Néanmoins, d'autres réflexes d'origine proprioceptive peuvent également participer à la régulation de la stabilisation des images visuelles sur la rétine [Berthoz, 1989].

Le réflexe vestibulo-oculaire a pour rôle de maintenir le regard stable pendant les rotations de la tête à haute fréquence [Cohen, 1974 ; Perrin & Lestienne, 1994 ; Berthoz, 1997]. Schématiquement, chaque paire de canaux semi-circulaires active une paire de muscles oculaires dont la contraction entraîne le mouvement de l'œil dans un plan sensiblement parallèle au plan des canaux. Idéalement, le réflexe vestibulo-oculaire induit une rotation des yeux de vitesse et d'amplitude égale à la rotation de la tête, de direction opposée, de manière à stabiliser le regard dans l'espace. Lorsque le mouvement de la tête est de grande amplitude, les yeux arrivant en position excentrée dans l'orbite sont ramenés vers la position primaire par une saccade réflexe : c'est le nystagmus vestibulaire physiologique. Un nystagmus est donc un mouvement rapide involontaire conjugué des globes oculaires caractérisé par une succession

rythmée de mouvements composés de deux phases, rapide et lente, changeant alternativement de sens. La direction du nystagmus est définie par la direction de la phase rapide. Le nystagmus dépend de la coordination de l'activité de deux systèmes principaux, la vision et l'appareil vestibulaire. Le nystagmus physiologique est inhibé par la fixation du regard. En effet, le réflexe vestibulo-oculaire peut être inhibé lorsqu'il est associé à des mouvements de poursuite oculaire, étant donné que les réflexes visuo-moteurs mobilisent l'œil dans le sens de la rotation de la tête. La présence du réflexe vestibulo-oculaire provoquerait alors la mobilisation de la tête en sens inverse [Perrin & Lestienne, 1994].

Pour les rotations de la tête de basse fréquence, la stabilisation du regard est complétée par les systèmes visuels que sont le réflexe optocinétique et le système de poursuite. Le réflexe optocinétique, forme la plus simple de comportement visuo-oculomoteur, déclenche des mouvements oculaires dont le but est de compenser le déplacement de l'environnement visuel [Takahashi *et al.*, 1977]. Ce mouvement est lent, dans le sens du défilement de l'image, et est interrompu par une phase rapide de sens opposé, dite saccade de recentrage, qui survient avant que la déviation du globe oculaire ne soit limitée mécaniquement [Perrin & Lestienne, 1994]. Cette succession de poursuites, ou phases lentes, et de saccades, ou phases rapides, est appelée nystagmus optocinétique.

D'autres réflexes d'origine proprioceptive, essentiellement cervicale, peuvent participer à la régulation de la stabilisation des images visuelles sur la rétine [Berthoz, 1989]. Trois types de réflexes, qui prennent leur source au niveau de la proprioception cervicale, sont généralement décrits [Perrin & Lestienne, 1994]. Le réflexe vestibulo-collique provoque une contraction réflexe des muscles du cou s'opposant au déplacement de la tête suite à l'activation principale mais pas exclusive des organes otolithiques [Lacour *et al.*, 1987]. Le réflexe cervico-oculaire, synergique du réflexe vestibulo-oculaire, consiste en un mouvement oculaire compensatoire lent provoqué par la rotation du corps autour de la tête préalablement fixée [Barmack *et al.*, 1981]. Le réflexe cervico-collique, synergique du réflexe vestibulo-collique, est provoqué par l'étirement des muscles du cou [Ezure *et al.*, 1983].

II.2 – Contrôle de la posture

Une posture est une attitude, définie par la position relative des segments corporels ainsi que par leur orientation dans l'espace. La finalité du contrôle postural est triple : participer à l'élaboration des représentations spatiales, assurer l'équilibre, et fournir une base stabilisée à l'action [Pérennou & Amblard, 2001].

La posture et la coordination des mouvements seraient réalisées en fonction du schéma du corps qui serait contenu dans le cerveau [Head, 1920]. Le cerveau contiendrait alors un modèle interne des grandeurs relatives des segments corporels, de leurs relations et de leurs positions entre eux et par rapport au monde extérieur. Cette représentation interne, probablement génétiquement déterminée mais enrichie au cours du développement et de l'apprentissage de nouvelles dextérités [Bonnet & Lestienne, 2003], est appelée schéma corporel [Clément *et al.*, 1984 ; Gurfinkel *et al.*, 1988 ; Massion, 1994] et est peut-être aussi la source de la perception du corps [Gurfinkel *et al.*, 1986 ; Gurfinkel & Levik, 1991]. Une des voies classiques d'exploration du schéma corporel inclut l'application de stimulation artificielle au niveau des différents capteurs impliqués : les entrées proprioceptives peuvent être stimulées par vibration des tendons [Roll & Roll, 1988 ; Roll *et al.*, 1989 ; Roll *et al.*, 1998 ; Kavounoudias *et al.*, 2001], les entrées visuelles par l'utilisation de scènes visuelles mobiles [Dichgans *et al.*, 1972 ; Lestienne *et al.*, 1977], et les entrées vestibulaires par stimulation galvanique [Lund & Broberg, 1983 ; Gurfinkel *et al.*, 1988 ; Hlavacka *et al.*, 1995 ; Balter *et al.*, 2004a ; Balter *et al.*, 2004b, Balter *et al.*, 2004c]. L'homme posséderait donc non seulement une carte des événements externes mais aussi un modèle à petite échelle de la réalité extérieure et de ses actions possibles [Adrian, 1947]. Cette référence corporelle, véritable chaîne d'arpenteur, n'est donc pas seulement conçue comme une représentation du corps mais aussi comme un schème des actions possibles [Damasio, 1994 ; Berthoz, 1997].

L'équilibre est assuré à la fois par le maintien et la stabilisation de la posture qui doivent nécessairement respecter les lois de la physique. Ainsi, le contrôle de l'équilibre implique le maintien de l'alignement de la posture du corps et l'adoption d'une relation verticale appropriée entre les différents segments corporels pour contrecarrer les forces de gravité et ainsi permettre le maintien de la station érigée [Massion & Woollacott, 1996]. La posture a pour objet de s'opposer aux forces gravitaires en agissant sur un complexe musculo-squelettique par un contrôle de la tonicité musculaire afin d'assurer la cohésion mécanique de l'architecture posturale composée de multiples segments corporels superposés [Perrin, 1991 ; Massion, 1998 ; Bonnet & Lestienne, 2003]. Ainsi, en résistant aux forces de gravité et aux forces de réaction résultantes par cette rigidification articulaire, le tonus musculaire postural est le principal contributeur de la station verticale. Une fois cet alignement achevé, le maintien de l'équilibre peut alors être assuré [Massion, 1998]. La position du centre de masse du corps doit donc être maintenue dans des limites spatiales spécifiques, appelées limites de stabilité, en relation avec le polygone de sustentation de l'individu [Crutchfield *et al.*, 1989]. La stabilisation posturale fait appel à des réactions de maintien ou de positionnement

antigravitaire vis-à-vis desquelles le corps adopte et conserve une attitude posturale donnée. Pourtant, bien que la cohésion articulaire soit assurée par les ligaments et le tissu musculaire, les seules propriétés purement mécaniques qui confèrent aux muscles privés de leur innervation leur caractère viscoélastique ne suffisent pas pour maintenir la cohésion entre les différentes pièces osseuses. De fait, mettant à profit les propriétés mécaniques musculaires, le système nerveux central suscite et entretient la décharge tonique des fibres nerveuses commandant les muscles afin d'assurer un état de rigidité musculaire qui équilibre les forces mécaniques au niveau des articulations [Perrin & Lestienne, 1994]. Ainsi, le contrôle postural et ses adaptations vis-à-vis de l'environnement sont basés sur un tonus postural et sur des réflexes posturaux ou des réactions, qui ont pour origine les entrées visuelles, vestibulaires et somatokinesthésiques.

La posture est une base stabilisée à l'action. Elle constitue donc un composant clé de tout système perception-action et sert à maintenir l'orientation du corps dans l'environnement. Cette fonction d'interfaçage avec le monde extérieur permet à l'individu de percevoir et d'agir à partir d'un cadre de référence [Lestienne & Gurfinkel, 1988 ; Berthoz, 1991 ; Paillard, 1991 ; Massion, 1998]. La posture d'un individu peut alors être considérée comme le support primaire pour l'exploration de son espace environnant en termes d'analyse perceptuelle et d'action motrice. Pour assurer cette exploration, le système nerveux doit avoir une représentation précise de la position des segments corporels les uns par rapport aux autres et par rapport à l'espace. Cette représentation posturale interne, ou schéma corporel postural, fournit des informations, et est contrôlée et modulée par des entrées multisensorielles. Sur la base de cette représentation et en accord avec la tâche perceptivomotrice à réaliser, l'orientation d'un ou de plusieurs segments corporels sera sélectionnée comme un système de référence pour la réalisation de l'action correspondante. La posture sert également de support mécanique à l'action. Elle organise le couplage entre les différents segments en fonction de la tâche et ajuste l'amplitude des articulations de façon dynamique pendant le mouvement.

II.2.1 – Maintien de la posture

Le maintien de la posture nécessite une activité tonique des muscles posturaux [Collet & Paillard, 2001]. La répartition du tonus postural entre les différents effecteurs n'est pas égale. Elle privilégie les muscles qui s'opposent à l'action de la pesanteur et est principalement observée au niveau des muscles extenseurs des membres, du dos et de la nuque. Le principal vecteur force de ces muscles contrecarre les effets de la gravité, quand le sujet se tient debout.

Le tonus postural dépend de l'intégrité de la boucle réflexe myotatique [Sherrington, 1906 ; Sherrington 1947]. Le réflexe d'étirement, s'opposant à toute déviation de la posture initiale [Lloyd, 1950], pourrait être l'un des mécanismes contribuant au contrôle de la posture érigée. De ce fait, on pourrait considérer le maintien de l'équilibre comme l'enchaînement d'une multitude de réflexes locaux. En réalité, le contrôle de la posture et sa coordination avec le mouvement mettent aussi en jeu des mécanismes très différents de ces boucles de réflexes. La distribution de ce tonus postural au niveau des différents segments corporels, et donc la capacité à exercer des forces antigravitaires, est régulée par une série de réflexes qui ont pour objet de maintenir la posture de référence ou d'adapter celle-ci à tout changement de position des segments [Magnus, 1924]. Par exemple, les réflexes labyrinthiques ont pour origine les otolithes, qui sont sensibles au vecteur gravitaire et qui augmentent ou réduisent le tonus postural bilatéralement ou de manière asymétrique en fonction de l'orientation de la tête dans l'espace [Roberts, 1979]. Les réflexes nucaux modulent également le tonus postural en fonction de la position de la tête par rapport au tronc [Magnus, 1924], de même que les réflexes lombaires [Massion & Woollacott, 1996]. D'autres réactions de support dont l'origine provient de récepteurs proprioceptifs ou cutanés, régulent le niveau de co-contraction des muscles des membres en fonction du poids qui doit être supporté [Lacquaniti *et al.*, 1990]. Ainsi, il existe trois grands types de réactions : la première est d'origine tactile, dans laquelle l'activation des récepteurs cutanés de la sole plantaire engendre l'activation des muscles extenseurs des membres inférieurs, la deuxième d'origine visuelle et la troisième d'origine labyrinthique [De Kleijn, 1923 ; Magnus, 1924].

L'orientation du corps est prépondérante pour le maintien de la posture érigée et est régulée par les capteurs localisés à la fois dans la tête et dans les autres segments corporels [Massion & Woollacott, 1996]. Premièrement, les capteurs permettant la détection du vecteur gravitaire sont les capteurs labyrinthiques, en particulier les otolithes. L'orientation verticale de la tête dans l'obscurité est généralement attribuée à leur activité [De Kleijn, 1923 ; Magnus, 1924]. La distribution des otolithes dans les plans vertical et horizontal donne des informations sur l'inclinaison de la tête par rapport à la verticale à la fois dans les plans sagittal et frontal. De plus, les récepteurs otolithiques contrôlent les accélérations linéaires le long des axes vertical et horizontal et les trois paires de récepteurs canaux contrôlent les accélérations angulaires. Les récepteurs labyrinthiques jouent également un rôle important dans la stabilisation de la tête. Deuxièmement, les capteurs visuels sont utilisés pour l'orientation de l'axe du corps et sa stabilisation [Amblard *et al.*, 1985]. Ainsi, le système visuel contrôle les déplacements de la tête et du corps par rapport au monde environnant ; ce

type d'information, appelé vection, influence fortement le contrôle de l'équilibre postural et la direction des réactions posturales [Dichgans *et al.*, 1972 ; Lestienne *et al.*, 1977]. Ces deux types d'information, visuelle et labyrinthique, sont localisés dans la tête et aident à l'orientation de sa position. Pourtant, du fait de l'absence de fixité de la tête sur le tronc, leur influence sur la posture et plus spécifiquement sur le contrôle postural dépend de l'évaluation de la position de la tête sur le tronc qui est assurée par les récepteurs proprioceptifs nucaux [Massion & Woollacott, 1996]. La troisième source d'information pour l'orientation vis-à-vis de la verticalité concerne les gravicepteurs [Gurfinkel *et al.*, 1981 ; Mittelstaedt, 1996 ; Paillard *et al.*, 2009] qui sont présents essentiellement au niveau du reins, du système vasculaire [Mittelstaedt, 1997] et de l'estomac [Trousselard *et al.*, 2004]. Additivement à ces gravicepteurs, la stabilisation de la posture dépend principalement des informations proprioceptives, qui indiquent tout changement de position des segments les uns par rapport aux autres et, de ce fait, induisent des ajustements posturaux [Allum *et al.*, 1998]. De plus, les capteurs proprioceptifs du pied, en association avec les capteurs extéroceptifs de la sole plantaire, contrôlent l'amplitude et la direction des forces de contact exercées par le corps sur le sol.

L'adaptation statique intègre la lutte antigravitaire en programmant une activité phasique limitée aux membres supérieurs ou impliquant les segments inférieurs juste pour compenser des déséquilibres sans déplacer les appuis. En situation simple, elle peut être isométrique, c'est-à-dire ne provoquer ni allongements ni raccourcissement musculaire [Collet & Paillard, 2001].

II.2.2 – Stabilisation de la posture

Le contrôle postural doit souvent faire face à des situations beaucoup plus complexes que celles envisagées précédemment, dans lesquelles le sujet ne devait contrôler que des oscillations de base. Ces situations, rencontrées majoritairement dans la vie courante, nécessitent une habileté à répondre aux perturbations externes qui doit prendre en compte toutes les variations posturales en direction, amplitude et vitesse. L'équilibration suppose obligatoirement des processus phasiques anisométriques et s'appuie sur une activité motrice variée [Collet & Paillard, 2001]. L'équipe de Nashner a montré, en utilisant des déstabilisations de type translation, que le contrôle de l'équilibre était sous la dépendance de synergies neurales programmées entraînant des séquences d'activation tout au long de la chaîne musculaire posturale depuis les muscles de la cheville jusqu'aux muscles nucaux. La

séquence d'activation des muscles de type distoproximal permettait la stabilisation des oscillations au niveau de l'articulation de cheville [Nashner, 1977 ; Nashner & Woollacott, 1979 ; Nashner & McCollum, 1985]. Néanmoins, pour les situations dans lesquelles l'utilisation de l'articulation de cheville comme régulateur des oscillations posturales est délicate, les sujets ont la possibilité d'utiliser une séquence d'activation musculaire de type proximodistal à partir de l'articulation de la hanche pour compenser les perturbations d'équilibre postural [Horak & Nashner, 1986]. Dans ces conditions, cette activation synergique des muscles de la cuisse et du tronc étant à l'origine d'une inclinaison de la partie supérieure du corps autour de l'articulation de hanche. La stratégie de hanche s'oppose donc à la stratégie de cheville qui est à l'origine d'une inclinaison compensatrice de l'ensemble du corps autour de la cheville.

Sous des conditions environnementales stables, un profil d'activation musculaire donne toujours la même stratégie. En revanche, lorsque ces contraintes externes changent, les synergies musculaires doivent changer pour assurer la stratégie définie [Massion & Woollacott, 1996]. Lors de changements dans les contraintes externes, la contribution des entrées sensorielles de l'équilibre peut être modifiée en fonction des caractéristiques physiques de la perturbation posturale. Lors de perturbations de la posture de type translation, les informations vestibulaires jouaient ainsi un rôle mineur dans la stabilisation posturale par rapport aux informations somatokinesthésiques [Dietz *et al.*, 1991]. En revanche, lors de stimulations de type rotation, la stabilisation de l'équilibre était initiée par les systèmes visuel et vestibulaire en condition yeux ouverts et principalement par les canaux semi-circulaires en condition yeux fermés [Allum & Pfaltz, 1985].

La posture érigée a souvent été comparée à un pendule inversé oscillant autour de l'articulation de la cheville. Si dans certaines circonstances, notamment dans les situations posturales statiques, l'ensemble du corps peut effectivement se comporter ainsi, la posture ne peut pas être conçue d'une manière générale comme une unité fonctionnelle unique mais révèle une organisation en modules, superposés des pieds à la tête [Massion, 1993]. Chaque module est lié au suivant par une série de muscles qui disposent chacun d'une régulation centrale et périphérique visant à maintenir la position de référence du module [Rademaker, 1931 ; Martin 1967]. Ainsi, la tête est un module fondamental car elle est le support de différentes catégories de récepteurs, comme la rétine, les labyrinthes et les propriocepteurs musculaires nucaux [Berthoz & Pozzo, 1988 ; Amblard *et al.*, 1990] et sa stabilisation dans l'espace durant la locomotion est utilisée comme une plateforme de navigation permettant ainsi aux capteurs visuels et vestibulaires de signaler les changements de position par rapport

à l'environnement [Berthoz, 1991]. Néanmoins, cette organisation de la posture ne repose pas seulement sur cette base modulaire mais également sur une organisation plus globale destinée à s'opposer aux effets de la pesanteur basée sur un tonus postural distribué dans les muscles antigravitaires [Massion, 1993].

Lors de l'exécution d'un mouvement volontaire vers une cible, la position et l'orientation de segments corporels servent de valeur de référence pour le calcul de la trajectoire à effectuer et pour l'exécution de cette trajectoire. Or, tout mouvement entraîne une modification de la posture qui constitue une source de déséquilibre. Ce déséquilibre sera accentué par les forces de réaction au niveau des membres mobilisés et par les forces d'inertie consécutives au mouvement intentionnel. L'intervention d'une commande parallèle exercée sur les segments posturaux semble donc nécessaire afin de minimiser leur déplacement. La nécessité de minimiser ces conséquences du mouvement peut être mise en œuvre de deux manières. La première vise à corriger le déplacement du segment postural causé par le mouvement à partir des messages sensoriels. Ce mode de correction est efficace, mais survient avec retard, puisqu'il ne peut se manifester qu'après le début de la perturbation. La réaction posturale induite ne peut alors qu'être imparfaite [Massion, 1993 ; Massion, 1998]. La seconde manière de minimiser la perturbation posturale est de mettre en action un ajustement postural anticipé, c'est-à-dire un ajustement qui se manifeste avant que la perturbation posturale liée au mouvement n'ait pris naissance. Par sa nature anticipatrice, l'ajustement postural pourra annuler par avance l'effet de la perturbation et par conséquent maintenir la stabilité du segment postural. Les muscles mis en jeu dans ces ajustements posturaux anticipatoires sont les mêmes que ceux utilisés pour stabiliser la posture suite à des perturbations externes [Cordo & Nashner, 1982]. Ces ajustements anticipatoires sont adaptables à la tâche à exécuter. Ceci suggère qu'il existe une présélection des muscles posturaux à utiliser dans les ajustements posturaux anticipatoires en fonction de leur capacité à former un support approprié [Massion & Woollacott, 1996]. Le but de ces ajustements posturaux anticipatoires est, dans la plupart des cas, de servir à la fois au contrôle de l'équilibre et à la stabilisation de la posture. Néanmoins, il semble exister deux types d'ajustements posturaux anticipatoires spécifiques, ceux dont le but est de stabiliser le centre de gravité durant le mouvement et ceux dont le but est de stabiliser la position des segments corporels, avec chacun une organisation centrale propre [Massion & Woollacott, 1996].

III – Effets de l'exercice sur la fonction d'équilibration

III.1 – Effets du type d'exercice sur la fonction d'équilibration

Les stratégies sensori-motrices de la fonction d'équilibration sont soumises à des modifications à la suite de la pratique d'exercices en particulier ou d'activités physiques et sportives en général. En effet, des spécificités neurosensorielles ont été observées en fonction des types d'activités physiques et sportives, de leur niveau de pratique et des pathologies qui en découlent [Perrin *et al.*, 1991a ; Hugel *et al.*, 1999 ; Guskiewicz *et al.*, 2001 ; Perrin *et al.*, 1998 ; Perrot *et al.*, 2000 ; Perrin *et al.*, 2000 ; Vuillerme *et al.*, 2001a ; Perrin *et al.*, 2002 ; Davlin, 2004 ; Paillard *et al.*, 2006 ; Paillard & Noé, 2006 ; Gerbino *et al.*, 2007 ; Paillard *et al.*, 2007 ; Herpin *et al.*, 2010]. Les effets des activités physiques et sportives sur le maintien et/ou le développement de stratégies efficaces d'équilibration n'est plus à démontrer. La pratique d'activités physiques est particulièrement recommandée chez les personnes âgées [Gauchard *et al.*, 1999 ; Buatois *et al.*, 2007].

Les judoka ont une utilisation plus efficace des informations somato-kinesthésiques que les danseurs classiques qui font davantage confiance aux informations visuelles pour s'équilibrer. En effet, les judoka sont constamment sujets aux mouvements inattendus de leurs adversaires. Les bonnes performances posturales des judoka dans les situations inhabituelles peuvent être liées à un possible transfert, quelles que soient les circonstances, des habilités sensorimotrices développées par les Arts Martiaux. En revanche, l'information visuelle est principalement utilisée par les danseurs de ballet qui utilisent cette information pour prendre des repères pendant l'exécution de la tâche motrice. La direction du regard est importante pour l'expression artistique et pour la perception de l'environnement. De plus, durant les rotations à grande vitesse, les rotations corporelles sont régulières alors que celles de la tête marquent des arrêts avec de courtes périodes de fixation du regard vers le public à chaque tour, cette dernière permet également de limiter les nystagmus post-rotatoires [Hugel *et al.*, 1999 ; Perrin *et al.*, 2002]. De plus, Gerbino *et al.* [2007] ont montré que les danseurs avaient de meilleures performances posturales que des footballeurs en particulier lors des conditions avec les yeux ouverts, confirmant la possible dépendance des danseurs aux informations visuelles. La gymnastique, dont la finalité est le contrôle parfait du mouvement, permet de développer de meilleures stratégies d'équilibration que le football ou la natation [Davlin, 2004]. Par ailleurs, il a été montré que les basketteurs avaient des performances posturales plus faibles que celles des gymnastes en équilibre statique et plus faibles que celles des footballeurs en équilibre

dynamique. Les gymnastes développent une attention supérieure aux signaux qui indiquent une altération du contrôle postural, comme les accélérations ou des changements de position articulaire. En revanche, les basketteurs ont peu de situations d'équilibre statique, ils sont davantage sensibles aux signaux indiquant la position du ballon et des joueurs. Lors des passes, des tirs et des contrôles du ballon, les footballeurs mettent en place des stratégies posturales dynamiques qui sont moins présentes chez les basketteurs [Bressel *et al.*, 2007]. Les tireurs au pistolet dépendent moins des informations visuelles et présentent un meilleur contrôle postural que les escrimeurs. D'un autre côté, les escrimeurs ont une meilleure capacité d'utilisation des informations vestibulaires et proprioceptives en particulier dans les situations nécessitant principalement l'utilisation des informations vestibulaires [Herpin *et al.*, 2010]. Ces études suggèrent que les stratégies sensorimotrices de la fonction d'équilibration des sportifs sont conditionnées par les stimulations et les réalisations motrices spécifiques de chaque activité physique et sportive. Toutefois, toutes ces études comparent des activités physiques et sportives très différentes les unes des autres en termes de but à atteindre (esthétique pour les danseurs, score pour les sports collectifs, temps pour les nageurs, *etc.*), de gestes moteurs (pirouettes, tirs, passes, contrôles, coulées, visées, projections, *etc.*) et d'environnement (scène, stade, piscine, tatamis, piste, *etc.*), il serait intéressant de chercher la présence de différences de stratégies sensorimotrices entre deux activités physiques et sportives voisines (cyclisme sur route et vélo tout terrain par exemple).

Par ailleurs, l'environnement de la pratique conditionne également les stratégies sensorimotrices. En effet, plusieurs travaux ont montré que le contexte environnemental avait des conséquences sur l'utilisation des informations sensorielles ; par exemple, un séjour en apesanteur va induire une réorganisation sensorielle entre les différents capteurs [Black *et al.*, 1995 ; Speers *et al.*, 1998]. Robert *et al.* [2004] ont montré que l'entraînement prolongé dans l'eau (natation) avait davantage de conséquences sur le contrôle postural qu'un entraînement plus général de type triathlon. Cette différence est en partie liée à une modification du seuil de sensibilité cutanée plantaire qui a été observée uniquement chez les nageurs. De plus, l'utilisation répétée d'équipement spécifique à chaque pratique physique peut aussi induire des modifications des stratégies sensorimotrices. En effet, les conséquences mécaniques du port de chaussures de ski sont compensées par des changements de stratégies posturales à travers une réorganisation de la coordination musculaire [Noé *et al.*, 2009]. Un effet à long terme du port répété de chaussures de ski perturbe le contrôle postural des skieurs de haut niveau lorsque celui-ci est évalué pieds nus [Noé & Paillard, 2005]. Les stratégies sensorimotrices sont donc également modifiées par le niveau de pratique [Vuillerme *et al.*, 2001a].

En football, le niveau de pratique a été associé à la performance posturale. Les footballeurs professionnels étaient plus stables que les amateurs. En outre, la contribution de la vision dans le maintien de la posture était moins importante chez les footballeurs de haut niveau, la vision étant davantage dédiée au traitement des informations émanant du jeu [Paillard *et al.*, 2006 ; Paillard & Noé, 2006]. Les stratégies sensori-motrices de la fonction d'équilibration semblent être liées aux différents types d'activités physiques et sportives et à leurs niveaux de pratique. Enfin, l'entraînement permet donc de modifier les performances neuromusculaires [Zemková & Hamar, 2010].

III.2 – Effets de la fatigue et des modifications de l'homéostasie liées à l'exercice sur la fonction d'équilibration

L'exercice induit généralement une fatigue périphérique et centrale qui diminue la performance motrice par des modifications métaboliques (production d'interleukine-6), structurales (fuite de la membrane cellulaire), fonctionnelles et comportementales. Ces modifications varient en fonction des groupes musculaires, du type de contraction et de l'intensité et du type d'exercice [Millet & Lepers, 2004]. Parmi les fonctions motrices, le contrôle postural semble être, lui-aussi, altéré immédiatement après un exercice global (course à pieds, cyclisme ou triathlon) sollicitant de nombreux groupes musculaires, qu'il soit d'une courte durée (environ 15 min) [Gauchard *et al.*, 2002 ; Pendergrass *et al.*, 2003 ; Wilkins *et al.*, 2004 ; Bove *et al.*, 2007 ; Vuillerme & Hintzy, 2007], d'une durée prolongée (25 à 120 min) [Lepers *et al.*, 1997 ; Nardone *et al.*, 1997 ; Derave *et al.*, 1998 ; Nardone *et al.*, 1998 ; Derave *et al.*, 2002 ; Gauchard *et al.*, 2002] ou d'une durée très prolongée (triathlon de type IronMan d'une durée de 9 à 12 heures) [Burdet & Rougier, 2004, Nagy *et al.*, 2004]. Par ailleurs, le contrôle postural est également perturbé à la suite d'exercices sollicitant seulement quelques groupes musculaires, comme ceux de la nuque, du dos ou des membres supérieurs. Ainsi, des contractions musculaires volontaires des triceps suraux de 50% à 100% de la contraction musculaire volontaire maximale peuvent altérer et modifier le contrôle postural [Ochsendorf *et al.*, 2000 ; Joyce *et al.*, 2001 ; Ramsdell *et al.*, 2001 ; Vuillerme *et al.*, 2001b ; Vuillerme *et al.*, 2002a ; Vuillerme *et al.*, 2002b ; Caron, 2003 ; Corbeil *et al.*, 2003 ; Caron, 2004 ; Gribble *et al.*, 2004 ; Gribble & Hertel, 2004 ; Ledin *et al.*, 2004 ; Harkins *et al.*, 2005 ; Mello *et al.*, 2007 ; Salavati *et al.*, 2007 ; Vuillerme *et al.*, 2007 ; Dickin & Doan, 2008]. De même, des contractions ou des répétitions de contractions de 5% à 35% de la contraction maximale des muscles extenseurs de la nuque [Beretta *et al.*, 2002 ; Schieppati *et al.*, 2003 ;

Gosselin *et al.*, 2004 ; Vuillerme *et al.*, 2005] et de 60% à 100% de la contraction maximale des muscles extenseurs du dos [Davidson *et al.*, 2004 ; Madigan *et al.*, 2006 ; Vuillerme *et al.*, 2007 ; Vuillerme & Pinsault, 2007] altèrent le contrôle de la posture. Enfin, il a été montré que les perturbations de l'équilibre immédiatement après un exercice étaient transitoires (de 6 à 30 min) [Nardone *et al.*, 1997 ; Nardone *et al.*, 1998 ; Bove *et al.*, 2007 ; Dickin & Doan, 2008 ; Fox *et al.*, 2008].

Différentes hypothèses ont été formulées pour expliquer les perturbations de l'équilibre à la suite d'exercices. Ainsi, la mauvaise exécution du programme moteur peut être due à des phénomènes qui ne sont pas directement liés à la qualité des contractions musculaires [Sesboüé & Guincestre, 2006]. La fatigue centrale, qui pourrait être définie comme une réduction de la contraction maximale volontaire qui n'est pas associée à la même réduction de force maximale obtenue par stimulation [Astrand *et al.*, 2003], pourrait être à l'origine des altérations posturales observées après exercice [Nardone *et al.*, 1997 ; Burdet & Rougier, 2004 ; Wilkins *et al.*, 2004]. Par ailleurs, la normalisation de la posture de 6 à 30 min suivant l'exercice pourrait être expliquée par l'arrêt de l'adaptation transitoire du système nerveux central aux stimulations prolongées des systèmes visuels, vestibulaires et somato-kinesthésiques [Lepers *et al.*, 1997 ; Nagy *et al.*, 2004 ; Zanetti & Schieppati, 2007]. En revanche, Bove *et al.* [2007] ont suggéré que la normalisation des performances posturales pendant la phase de repos suivant un exercice serait liée à une récupération rapide d'une consommation d'oxygène normale. La perturbation des performances posturales à la suite d'un exercice pourrait être expliquée par la fatigue musculaire qui résulterait d'une diminution de la force et de la vitesse de contraction [Allen *et al.*, 2008]. Cette fatigue musculaire altère l'efficacité de la contraction musculaire et ne permet pas la production d'une réponse motrice de courte latence et de haute fréquence nécessaire pour limiter les perturbations de l'équilibre [Ledin *et al.*, 2004]. De plus, cette fatigue musculaire et les stimulations répétées des récepteurs articulaires et musculaires pourraient modifier la contribution de la proprioception dans les stratégies d'équilibration [Hashiba, 1998 ; Gauchard *et al.*, 2002 ; Burdet & Rougier, 2004 ; Bizid *et al.*, 2007 ; Vuillerme & Hintzy, 2007]. Derave *et al.* [2002] ont indiqué qu'un exercice d'intensité modérée diminuait la contribution de la vision dans la stabilité posturale. Les mouvements de tête, qui sont plus importants en course à pieds qu'en cyclisme, pourraient également participer à la perturbation de l'équilibre à la suite d'un exercice [Lepers *et al.*, 1997 ; Nardone *et al.*, 1997 ; Hashiba, 1998 ; Derave *et al.*, 2002]. Parmi les facteurs expliquant la fatigue centrale et la fatigue périphérique, la déshydratation et l'hémoconcentration liée à la déshydratation peuvent

résulter à la fois de la sudation thermorégulatrice [Mallié *et al.*, 2002], mais aussi de l'augmentation de l'eau dans le muscle. Cette augmentation de l'eau dans le muscle lors d'exercices a été mise en évidence par des études de biopsies musculaires du muscle *vastus lateralis* [Nielsen *et al.*, 1986]. Ces changements homéostatiques jouent un rôle significatif dans la limitation de la puissance, de la force et de l'endurance [Judelson *et al.*, 2007]. La déshydratation pourrait avoir des conséquences à chaque niveau de la régulation posturale et pourrait expliquer les troubles de l'équilibre observés après un exercice. Toutefois, les effets de la déshydratation sur le contrôle postural à la suite d'un exercice restent controversés étant donné que les études présentent des résultats contradictoires [Derave *et al.*, 1998 ; Gauchard *et al.*, 2002 ; Patel *et al.*, 2007].

III.3 – Exercices et pathologies liés à la fonction d'équilibration

La pratique d'exercices, qui permet toutefois d'augmenter en général les performances d'équilibre, est un facteur important de risque de blessures [Gibson, 1987]. Tous les niveaux de régulation de la fonction d'équilibration peuvent être touchés par une lésion induisant par conséquent une diminution, au moins à court terme, de la performance motrice. De nombreuses études ont montré que la pratique d'exercice et en particulier la pratique de certains sports, tels que le football, le football américain, le rugby ou le cyclisme était à l'origine de la survenue de commotions cérébrales [Barnes *et al.*, 1998 ; Guskiewicz, 2003 ; Peterson *et al.*, 2003 ; McIntosh, 2005 ; Kennedy, 2009]. Peterson *et al.* [2003] ont montré que le contrôle postural de sportifs ayant eu une commotion cérébrale était de moins bonne qualité que celui de sujets témoins pendant au moins 10 jours suivant la commotion. Par ailleurs, l'utilisation des informations visuelles et vestibulaires était altérée à la suite de la commotion. Cette altération pouvait durer quelques jours [Guskiewicz *et al.*, 2001 ; Peterson *et al.*, 2003]. De plus, le système visuel et l'appareil musculo-squelettique sont également soumis à une fréquence élevée de blessures [Napier *et al.*, 1996 ; Bird, 2004]. Enfin, des vertiges ont été observés après la pratique d'exercices tels que la natation, la plongée sous-marine ou le vélo tout terrain [Rozsasi *et al.*, 2003 ; Aksoy & Sennaroğlu, 2007 ; Vibert *et al.*, 2007]. Ces vertiges soulignent un dysfonctionnement vestibulaire qui pourrait être lié soit aux gestes de l'exercice, soit aux conséquences d'un traumatisme crânien.

IV – Modèle neurosensoriel : l'équilibration en cyclisme

Le cyclisme traditionnel (cyclisme sur route) et le vélo tout terrain (VTT) sont des pratiques sportives où la composante énergétique est très importante pour les réalisations des performances. En effet, le but en cyclisme de compétition est de passer la ligne d'arrivée en premier et/ou d'avoir le meilleur temps sur un parcours donné. Le cycliste doit alors consommer de façon optimum son énergie ; cependant, il doit aussi utiliser les différentes informations sensorielles pour éviter la chute et de perdre du temps dans des parties techniques. C'est l'alliance entre les composantes sensorielles et énergétiques qui assure la performance sportive.

En cyclisme, l'équilibre est l'une des trois bases techniques fondamentales permettant une bonne performance, les deux autres étant constituées par la propulsion et la conduite. Le cycliste cherche à avoir le meilleur équilibre et la meilleure propulsion possible associés à un pilotage optimum. L'équilibre en cyclisme consiste à être capable d'adapter la position du corps par rapport au vélo pour ne pas mettre le pied au sol, pour ne pas tomber ou pour récupérer un déséquilibre. La position du corps (appuis, maintien au dessus des appuis, opposition à une force), la vitesse, la nature du terrain, la pente du terrain, le matériel (géométrie du vélo, pneumatiques, *etc.*), et la proximité avec de nombreux concurrents sont des variables perturbant ou modifiant l'équilibre. La propulsion est la capacité à créer des forces visant à provoquer un mouvement. La propulsion est la résultante des forces propulsives et des forces de résistances. Pour se déplacer, le cycliste utilise principalement les muscles des membres inférieurs. Enfin, la conduite consiste à orienter sa trajectoire et à élaborer des comportements tactiques en fonction de l'environnement. La conduite va imposer aux cyclistes de produire une force capable de s'opposer à la force centrifuge en virage pour maintenir leur équilibre. Ils vont contrôler leur vitesse, anticiper les trajectoires, abaisser le centre de gravité (CDG) du couple homme-vélo, et favoriser l'adhérence par une répartition judicieuse du CDG au-dessus des appuis de la roue avant et de la roue arrière.

IV.1 – Cyclisme traditionnel

La compétition sur route demeure l'élément moteur du sport cycliste. Elle regroupe cinq catégories d'épreuves : les classiques, les courses par étapes, les « Contre-La-Montre » (CLM) individuel ou par équipes, les courses en circuit et les critériums [Fédération Française

de Cyclisme, 2010 ; Union Cycliste Internationale, 2010a]. Les classiques sont les courses dites de « ville à ville », disputées « en ligne », et aux parcours parfois spécifiques (les pavés de Paris-Roubaix ou les longues lignes droites de Paris-Tours par exemple). Les courses par étapes sont des compétitions durant plusieurs jours (de 2 jours jusqu'à 21 ou 22 jours). Le classement général se fait par addition des temps journaliers. Pour les épreuves « Contre-La-Montre », les coureurs prennent le départ l'un après l'autre, à intervalle de temps régulier. Le classement s'effectue en fonction du temps réalisé. Le « Contre-La-Montre » peut aussi se disputer par équipes. Le nombre de coureurs retenus dans chaque équipe varie selon le caractère de l'épreuve. Les courses en circuit sont des courses d'un jour où le circuit est à parcourir un certain nombre de fois (Championnats de France et les Championnats du Monde). Enfin, les critériums sont des épreuves courues sur des distances totales relativement courtes (moins de 100 km), souvent en « nocturne ». Les critériums se disputent sur des circuits d'une longueur qui peut varier de 800 m à 4 km, « en ville » la plupart du temps. Les différentes disciplines de la route justifient bien évidemment le choix d'un matériel spécifique, avec l'emploi de braquets appropriés en fonction des parcours. Les distances à parcourir, ainsi que les braquets utilisés, varient en fonction des épreuves, mais également des catégories de coureurs (Figure 2).

En cyclisme sur route, la consommation maximale d'oxygène (VO_{2Max}) des routiers varie de 4,4 à 6,4 l.min⁻¹, la puissance maximale de 370 à 570 W et la puissance au seuil lactique de 300 à 500 W [Mujika & Padilla, 2001]. Les performances en cyclisme sur route sont liées majoritairement à la puissance produite au seuil lactique et à l'effort maximal (avec un rapport puissance/poids supérieur ou égal à 5,5 W.kg⁻¹), au pourcentage de fibres musculaires de type I (en particulier dans les muscles *vastus lateralis*), et à l'intensité maximale à laquelle la concentration de lactate dans le sang reste stable [Faria *et al.*, 2005]. Bien que le terrain d'évolution soit stable et que le coefficient de roulement soit assez faible en cyclisme sur route, la principale force contre laquelle le cycliste doit lutter est la résistance à l'avancement qui est proportionnelle au carré de la vitesse. La recherche de la position aérodynamique la plus efficace et des techniques permettant de diminuer la résistance de l'air (position sur la route, position par rapport aux autres cyclistes) sont donc essentielles en cyclisme sur route pour limiter la fatigue et assurer la meilleure performance [Grappe *et al.*, 1998 ; Hausswirth *et al.*, 2001 ; Grappe, 2005 ; Duc *et al.*, 2008].

Concernant les différents niveaux de régulation de la fonction d'équilibration, la vision semble être une information sensorielle essentielle à la réalisation de la performance en cyclisme. Elle permet au cycliste de s'équilibrer, de se diriger et de prendre des informations

techniques (mesure de la distance avec la roue arrière du coureur qui se situe juste devant) et tactiques (différences de vitesse, positionnement pour une éventuelle attaque) sur les adversaires (principalement en cyclisme sur route). La proprioception ne semble pas être spécialement développée ni perturbée par ce type d'exercice. Par ailleurs, la vitesse importante et le profil de certaines compétitions (du type critérium), composées de nombreux virages et de nombreuses répétitions, peuvent solliciter le vestibule.



Figure 2 – Le cyclisme sur route se pratique sur des surfaces généralement dures et lisses (routes goudronnées). Les vibrations induites par la route sont rares. La bicyclette n'est pas équipée de dispositifs permettant d'absorber les vibrations. De plus, les pneumatiques, dont la section est généralement de 23 mm, ont une pression de gonflage importante (pression souvent supérieure à 7 bar) afin d'augmenter leur rendement.

IV.2 – Vélo Tout Terrain

Le Vélo Tout Terrain (VTT) est un sport importé des Etats-Unis où l'on utilisait de « drôles de bicyclettes », les « fat tyre bikes » ou des « ballooners » pour dévaler les pentes. A partir du milieu des années 80, l'industrie du cycle trouve un nouvel essor grâce au nombre important de VTT qui sont vendus en France et dans le monde. Les pratiquants de loisirs cherchent, avec cette bicyclette, une autre façon de pratiquer le cyclisme en étant plus proches de la nature. Le VTT regroupe deux disciplines principales : le cross-country (XC) et la descente (DH) [Fédération Française de Cyclisme, 2010 ; Union Cycliste Internationale, 2010a].

Le cross-country (XC) est la discipline d'endurance du VTT et se pratique sur circuits fermés accidentés (descentes techniques, chemins forestiers, sentiers rocaillieux, franchissement d'obstacles) de 5 à 9 km. La variété des terrains rencontrés sur le parcours doit permettre l'expression des qualités techniques (pilotage, franchissement) et physiques des

coureurs (gestion d'un effort avec des variations de rythme) (Figure 3). Les compétitions de VTT cross-country durent en moyenne 120 min et la fréquence cardiaque relevée, durant la totalité de l'épreuve, est souvent proche de 90% du maximum ce qui correspond à environ 84% de la consommation maximale d'oxygène (VO_{2Max}). Plus de 80% du temps de course est passé au-dessus du seuil lactique. Cette intensité élevée d'exercice est liée au départ de la course qui est rapide, mais également aux nombreuses montées qui obligent les vététistes à dépenser beaucoup d'énergie pour lutter contre la gravité. Enfin, l'importante résistance de roulement et les contractions isométriques des muscles des membres supérieurs et inférieurs, nécessaires au contrôle et la stabilisation de la bicyclette, participent aussi au maintien de l'intensité élevée en VTT. En raison de l'importante production de puissance (supérieure à 500 W) pendant les montées les plus pentues et au départ de la course, le métabolisme anaérobie est également une composante importante de la performance. Les caractéristiques physiologiques des vététistes spécialistes du cross-country indiquent que la puissance aérobie (VO_{2Max} souvent supérieure à $70 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) et la capacité à maintenir un effort soutenu pendant des périodes de temps prolongées constituent des pré-requis de la performance en VTT cross-country. Enfin d'autres facteurs, comme l'efficacité du pédalage, la puissance et la capacité anaérobie, les stratégies nutritionnelles et les habiletés techniques participent également à la performance [Impellizzeri & Marcora, 2007].



Figure 3 – Les profils des parcours de VTT cross-country se composent de parties montantes, descendantes et plates où le terrain d'évolution est caractérisé par son irrégularité, son instabilité et ses modifications dans le temps. La pratique du VTT cross-country requiert d'importantes capacités physiologiques et d'importantes habiletés techniques. La bicyclette permet une absorption de l'irrégularité du terrain par les pneumatiques, dont la section varie de 1,2 pouces (30 mm) à 2,6 pouces (66 mm) et dont la pression varie de 1,5 bar à 3 bar, et la suspension avant dont le débattement est compris entre 70 mm et 150 mm. Les amortisseurs (généralement sur la partie arrière de la machine) sont rarement utilisés lors des compétitions de VTT cross-country.

La descente (downhill, DH) est une épreuve individuelle Contre-La-Montre sur un profil descendant parsemé d'obstacles. Le parcours très technique doit privilégier les paramètres vitesse et pilotage. Le descendeur doit faire preuve d'engagement et posséder un sens aiguisé du pilotage pour affronter les racines, dévers, bosses, sauts et autres obstacles naturels rencontrés lors d'une descente. Les vitesses de pointes atteignent près de 80 km/h. Le temps de course est compris entre 2 et 5 minutes pour un parcours de 1,5 à 3,5 km. La technicité du matériel (cadre avec double suspension, freins à disque) nécessite un budget important. L'équipement obligatoire du pilote comprend un casque intégral monobloc, des coudières, des gants complets, une protection dorsale et des genouillères (Figure 4). Les données physiologiques du VTT descente n'ont actuellement pas encore été évaluées. L'effort, d'une durée comprise entre 2 et 5 minutes, est caractérisé par des fréquences de pédalage très élevées (utilisation de petits braquets) dans les parties de relance permettant de reprendre de la vitesse. La capacité de produire une puissance élevée pendant de courtes durées est alors essentielle [MacRae *et al.*, 2003]. Il est alors important pour le descendeur de conserver une attention optimale afin de passer les parties techniques le plus vite possible. Il a été montré qu'un exercice intense d'une durée de 5 minutes, diminuait significativement les processus attentionnels, cette diminution était par ailleurs corrélée à une augmentation de la lactatémie [Coco *et al.*, 2009].



Figure 4 – Les profils des parcours de VTT descente se composent principalement de parties descendantes où le terrain d'évolution se caractérise par son irrégularité (sauts pouvant dépasser 1 mètre de hauteur), son instabilité et ses modifications dans le temps. La pratique du VTT descente requiert d'importantes capacités physiologiques et surtout d'importantes habiletés techniques. La bicyclette permet une absorption de l'irrégularité du terrain par les pneumatiques, dont la section varie de 2,3 pouces (58 mm) à 3,0 pouces (76 mm) et dont la pression varie de 1,5 bar à 2,7 bar, la suspension avant dont le débattement est compris entre 170 mm et 203 mm et l'amortisseur arrière dont le débattement est compris entre 130 mm et 300 mm. La selle est très basse et son utilisation est fortement limitée. Le descendeur porte des protections à la tête, au dos et aux membres supérieurs et inférieurs.

Concernant les différents niveaux de régulation de la fonction d'équilibration, le VTT perturbe la vision par les vibrations provoquées par les irrégularités du terrain (atténuées avec l'utilisation de suspensions), par la poussière ou la boue (limitées par l'utilisation de lunettes) et par les différences de luminosité (forêt, prairie, *etc.*). Plus la piste est technique et plus le regard sera placé loin devant afin de voir certains détails (racines, cailloux, ornières, *etc.*). La proprioception et les informations issues des différents appuis sont également perturbées en VTT par les vibrations. Les informations proprioceptives et extéroceptives sont fortement utilisées pour prendre des informations sur les positions du corps par rapport à la machine et les positions de la machine par rapport au sol. D'autre part, les fortes accélérations dues aux vibrations, aux chocs et aux incessants changements du profil du terrain en VTT sollicitent énormément les capteurs vestibulaires.

V – Première étude : influence différenciée de la pratique du cyclisme sur route et du vélo tout terrain sur le contrôle de l'équilibre et l'organisation neurosensorielle

*Ce travail a fait l'objet d'une publication internationale parue en 2009 dans **Journal of Electromyography and Kinesiology** 19:623-630.*

V.1 – Rappel

Les études utilisant le cyclisme (VTT ou cyclisme sur route) comme modèle sont nombreuses mais discutent principalement des capacités énergétiques et de leurs répercussions sur la performance motrice. Ainsi, il a été montré que les vététistes et les routiers développaient différemment leurs capacités énergétiques [Wilber *et al.*, 1997 ; Lee *et al.*, 2002] et les caractéristiques de leur squelette, les vététistes ayant une densité osseuse plus importante que les routiers [Warner *et al.*, 2002]. Le métabolisme aérobie explique seulement 40% de la variance des performances entre les vététistes, d'autres facteurs physiologiques et techniques semblent donc être impliqués dans la performance en VTT [Impellizzeri *et al.*, 2005]. De plus, les vététistes (spécialistes du cross-country) développent une puissance par rapport à leur poids plus importante que celle des routiers lors d'un exercice maximal, d'un exercice au seuil lactique et lors d'un exercice de type « Contre-La-Montre » de 30 min [Lee *et al.*, 2002]. Par ailleurs, le maintien d'une posture appropriée sur la bicyclette semble être une base fondamentale pour produire la meilleure performance [Grappe, 2005 ; Duc *et al.*, 2008]. Cette posture consiste à adapter la position du corps par rapport à la position de la bicyclette, ceci permettant d'avoir une propulsion et un pilotage optimal afin d'éviter les chutes. L'adaptation du système individu/bicyclette doit prendre en compte l'environnement qui est plutôt stable en cyclisme sur route et toujours instable en VTT. Ainsi, les différences techniques et environnementales, qui sont associées au triptyque individu/bicyclette/environnement, entre le VTT et le cyclisme sur route devraient conduire à des différences dans le traitement central de l'information induisant des réponses motrices spécifiques. En effet, les changements constants du regard, qui est loin devant sur le sentier pour choisir la meilleure trajectoire en VTT et qui est sur la route et sur le cycliste juste devant pour éviter les collisions en cyclisme sur route, et l'exploration de l'environnement autour de la bicyclette, qui est plus importante en VTT qu'en cyclisme sur route, sont des comportements spécifiques nécessitant des processus particuliers d'apprentissage moteur, particulièrement en termes de régulation de l'équilibre. De plus, l'équilibre du système individu/bicyclette dépend également de la vitesse qui a des répercussions sur la stabilité du système selon, en autres, les propriétés des forces

gyroscopiques [Jones, 1970]. La vitesse étant généralement plus importante en cyclisme sur route qu'en VTT, les contraintes d'équilibre devraient être moins importantes en cyclisme sur route. Néanmoins, aucune étude n'a évalué les capacités d'équilibration des routiers et des vététistes. Selon les contraintes d'équilibre élevées, les vététistes devraient faire davantage confiance aux informations somesthésiques pour trouver une réponse motrice rapide et adaptée à l'instabilité de l'équilibre induite par l'environnement. En revanche, les routiers, qui ont moins de contraintes d'équilibre dans leur pratique, devraient davantage faire confiance à la vision pour anticiper la production des prochains mouvements moteurs. Cette étude visait à comprendre les variations spécifiques des stratégies posturales sensori-motrices et l'organisation neurosensorielle qui y est associée dans deux spécialités cyclistes, c'est-à-dire le VTT et le cyclisme sur route.

V.2 – Matériels et méthodes

V.2.1 – Participants

Un groupe de 48 cyclistes a été inclus dans ce protocole. Ils étaient tous licenciés dans des clubs affiliés à la Fédération Française de Cyclisme (FFC) et pratiquaient régulièrement leur sport en compétition.

Parmi les 48 cyclistes, deux groupes ont été constitués selon la spécialité choisie par le coureur, qui était indiquée sur la licence. Ainsi, 24 vététistes spécialistes du cross-country (4 femmes, 20 hommes ; 7 années d'expérience) et 24 routiers de sexe masculin (8 années d'expérience), de niveau international (Champion Olympique de VTT, Champion du Monde de VTT, Champions d'Europe de VTT, participants du Tour de France), national (Champions Nationaux) et régional (Champions Régionaux), ont participé à cette étude.

Tous les participants étaient indemnes de pathologies du système nerveux central et ne présentaient aucun traumatisme de la tête, du tronc ou des membres inférieurs pouvant altérer la performance posturale et/ou oculomotrice. Tous les participants ont donné leur consentement avant la réalisation des tests. Les tests de la stabilisation de regard (vidéonystagmographie), d'équilibre (posturographie) et de la verticalité subjective ont été effectués dans le laboratoire « Equilibration et Performance Motrice », au Centre Hospitalier Universitaire de Nancy, dans des locaux habilités pour l'expérimentation (Autorisation de Lieu de Recherche), placés sous la direction du Professeur Philippe Perrin.

V.2.2 – Questionnaire

Un questionnaire concernant les paramètres d'intensité de pratique du VTT et du cyclisme sur route a été distribué à chaque participant de l'étude. Chaque sportif (vététiste ou routier) a ainsi pu être caractérisé pour l'intensité de sa pratique cycliste en VTT et sur route, à travers quatre paramètres : le nombre de kilomètres parcourus dans l'année (km_{VTT} et km_{Route}), le nombre d'heures effectuées dans l'année (h_{VTT} et h_{Route}), la proportion de kilomètres parcourus sur route par rapport aux kilomètres totaux [$\%D = km_{Route} / (km_{Route} + km_{VTT})$] et la proportion d'heures effectuées sur route par rapport aux heures totales [$\%T = h_{Route} / (h_{Route} + h_{VTT})$].

V.2.3 – Evaluation posturographique

Les évaluations posturographiques ont été réalisées dans une cabine de posturographie dynamisée de type EquiTest[®] (Neurocom, Clackamas, OR) (Figure 5) permettant de réaliser le Test d'Organisation Sensorielle (TOS) (Figure 6).



Figure 5 – Cabine de posturographie dynamisée de type EquiTest[®] composée d'un panorama et d'une plateforme pouvant être asservis aux oscillations du sujet et d'un ordinateur permettant d'analyser le contrôle postural dans différentes conditions.

Le TOS évalue les capacités du sujet à utiliser séparément les entrées visuelles, vestibulaires et somatosensorielles et à supprimer une information sensorielle inappropriée. Afin de fournir une information inadéquate, les entrées visuelles et somatosensorielles sont faussées par la technique de l'asservissement aux oscillations. Cette technique implique des mouvements de la surface de support et / ou de l'environnement visuel afin de suivre les oscillations antéropostérieures du centre de gravité (CG) [Nashner & Peters, 1990].

Le test d'organisation sensorielle est composé de six conditions, les deux premières produisant une mesure de la stabilité basique du sujet ; le support est fixe et les yeux du sujet sont ouverts (condition 1) ou fermés (condition 2). En condition 3, la surface de support reste fixe tandis que le sujet évolue les yeux ouverts dans un environnement visuel asservi. En conditions 4 à 6, les informations somatosensorielles sont systématiquement faussées par asservissement de la surface de support avec le sujet en condition yeux ouverts (condition 4), yeux fermés (condition 5) ou vision asservie (condition 6). Le participant doit se maintenir debout pendant trois essais de 20 secondes pour chaque condition en oscillant le moins possible et sans modifier le polygone de sustentation. Le participant porte un harnais de sécurité attaché aux montants de la cabine pour prévenir toute blessure en cas de chute. Si le sujet nécessite une assistance du harnais ou fait un pas, le test est considéré comme une chute.

Un score d'équilibre (SE) est calculé en comparant les oscillations antéropostérieures du sujet durant chaque essai de 20 secondes aux limites d'oscillation théorique maximale de stabilité (8,5° en avant et 4,0° en arrière). La formule suivante est utilisée pour le calculer :

$$SE = \left[12,5 - \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{12,5} \right] \times 100$$

Le plus grand angle de déplacement du centre de pression des pieds est indiqué par $\theta_{\max}$ alors que le plus petit est quant à lui indiqué par $\theta_{\min}$. Un score de 100 indique l'absence d'oscillations, tandis qu'un score de 0 indique que les oscillations ont excédé les limites de stabilité, traduisant une chute. $C1^{SE}$ représente le score d'équilibre moyen des trois essais en condition 1, $C2^{SE}$ en condition 2, $C3^{SE}$ en condition 3, $C4^{SE}$ en condition 4, $C5^{SE}$ en condition 5 et $C6^{SE}$ en condition 6. Un score d'équilibre global (C^{SE}) est calculé en moyennant indépendamment les scores pour les conditions 1 et 2, puis en ajoutant les scores unitaires d'équilibre pour chaque essai des conditions 3, 4, 5 et 6, et enfin en divisant par le nombre total d'essais (Figure 6).

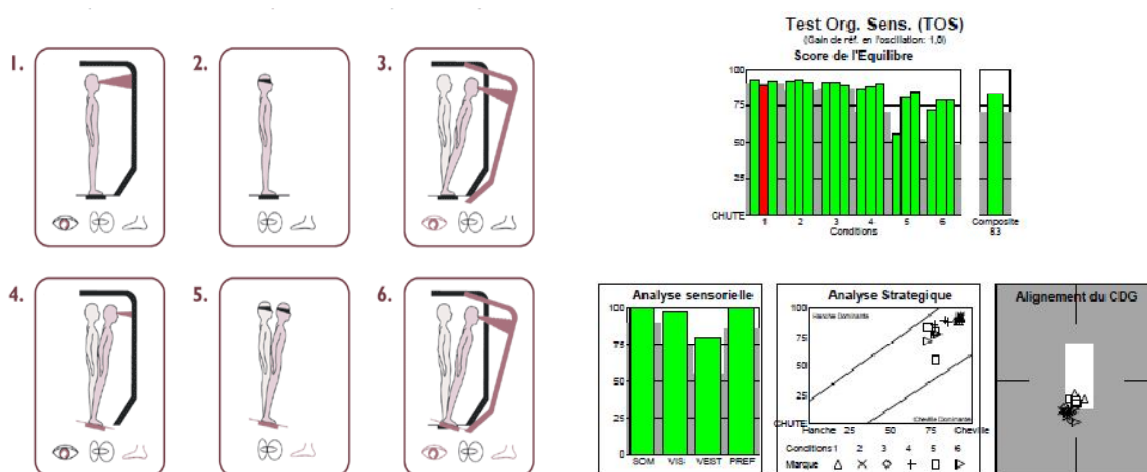


Figure 6 – Test d’organisation sensorielle (EquiTest). A gauche : les six conditions. Dans les 3 premières conditions, la plate-forme est fixe alors qu’elle est asservie dans les 3 dernières conditions. Le panorama est asservi dans les conditions 3 et 6. Le sujet a les yeux fermés dans les conditions 2 et 5. A droite : exemple de résultat.

Chaque SE peut être ajusté à $C1^{SE}$ pour identifier la qualité d’utilisation de chaque système sensoriel impliqué dans le contrôle postural. Le ratio $C2^{SE}/C1^{SE}$ (R^{SOM}) représente la contribution somatosensorielle dans le contrôle de l’équilibre, le ratio $C4^{SE}/C1^{SE}$ (R^{VIS}) la contribution visuelle et le ratio $C5^{SE}/C1^{SE}$ (R^{VEST}) la contribution vestibulaire. De plus, la capacité à reposer sur une orientation visuelle pour s’équilibrer, ou préférence visuelle (R^{PREFV}), est évaluée en comparant les situations en environnement visuel asservi avec les situations en absence de vision $[(C3^{SE} + C6^{SE}) / (C2^{SE} + C5^{SE})]$. Enfin, la capacité à reposer sur une orientation proprioceptive pour s’équilibrer, ou préférence proprioceptive (R^{PREFP}), est évaluée en comparant toutes les situations de surface de support asservi aux situations de surface de support fixe $[(C4^{SE} + C5^{SE} + C6^{SE}) / (C1^{SE} + C2^{SE} + C3^{SE})]$ [Black *et al.*, 1983 ; Black *et al.*, 1995; *et al.*, 1995 ; Nashner, 1997] (Tableau I). Selon les ratios, les valeurs élevées indiquaient une utilisation efficace de l’information sensorielle.

La posturographie dynamisée donne des informations fonctionnelles sur le contrôle postural proprement dit et donne une indication de l’importance des troubles de l’équilibre d’un sujet donné dans sa vie de tous les jours [Furman, 1994]. Tous les outils de mesure du contrôle postural doivent avoir trois propriétés psychométriques : fiabilité, sensibilité et validité prédictive [Chien *et al.*, 2007]. En terme de fiabilité, la reproductibilité du score d’équilibre global (coefficient de fiabilité = 0,67) et des scores d’équilibre (de 0,35 à 0,79) du Test d’Organisation Sensorielle est particulièrement satisfaisante dans une période de deux jours chez des jeunes adultes [Wrisley *et al.*, 2007]. De même, cette fiabilité était également satisfaisante dans une période d’une semaine chez des personnes âgées [Ford-Smith *et al.*,

1995]. Cependant, chez des patients lombalgiques, les résultats à court et long terme de la fiabilité intersession ont montré un effet d'apprentissage qui peut limiter les applications cliniques dans la pratique quotidienne de rééducation [Leitner *et al.*, 2007 ; Wrisley *et al.*, 2007]. Néanmoins, le Test d'Organisation Sensorielle a été reconnu comme un outil fiable pour identifier les sujets avec des capacités d'équilibre élevées [Diard *et al.*, 1997].

Tableau I – Test d'organisation sensorielle. Spécificités des six conditions et signification des ratios sensoriels : EV, environnement visuel (Black *et al.*, 1995 ; Gauchard *et al.*, 2010 ; Herdman *et al.*, 1995 ; Herpin *et al.*, 2010 ; Lion *et al.*, 2009 ; Nashner, 1997) .

Test d'Organisation Sensorielle		
Conditions		
<i>Nom</i>	<i>Situation</i>	<i>Conséquences sensorielles</i>
Condition 1 (C1)	Yeux ouverts, support fixe	-----
Condition 2 (C2)	Yeux fermés, support fixe	Vision absente
Condition 3 (C3)	EV asservi, support fixe	Vision faussée
Condition 4 (C4)	Yeux ouverts, support asservi	Proprioception faussée
Condition 5 (C5)	Yeux fermés, support asservi	Vision absente, proprioception faussée
Condition 6 (C6)	EV asservi, support asservi	Vision et proprioception faussées
Ratios		
<i>Nom</i>	<i>Calcul</i>	<i>Signification</i>
Somesthésique (R^{SOM})	$\frac{C2}{C1}$	Question : Les oscillations augmentent-elles quand les informations visuelles sont absentes ? Scores bas : Faible utilisation des informations proprioceptives.
Visuel (R^{VIS})	$\frac{C4}{C1}$	Question : Les oscillations augmentent-elles quand les informations proprioceptives sont faussées ? Scores bas : Faible utilisation des informations visuelles.
Vestibulaire (R^{VEST})	$\frac{C5}{C1}$	Question : Les oscillations augmentent-elles quand les informations visuelles et proprioceptives sont respectivement absentes et faussées ? Scores bas : Faible utilisation des informations vestibulaires ou informations vestibulaires indisponibles.
Préférence visuelle (R^{PREFV})	$\frac{C3 + C6}{C2 + C5}$	Question : Une vision faussée entraîne-t-elle une augmentation des oscillations par rapport à l'absence de vision ? Scores bas : Confiance dans les informations visuelles même lorsqu'elles sont fausses.
Préférence proprioceptive (R^{PREFP})	$\frac{C4 + C5 + C6}{C1 + C2 + C3}$	Question : Les informations proprioceptives faussées entraînent-elles une augmentation des oscillations par rapport aux informations proprioceptives non-faussées ? Scores bas : Faible compensation d'une perturbation de l'entrée sensorielle.

V.2.4 – Evaluation de la fonction visuo-oculomotrice

La vidéonystagmographie (VNG) est un dispositif d'observation, d'enregistrement et d'analyse des mouvements oculaires et par conséquent de la fonction visuo-oculomotrice. Elle permet d'obtenir des mesures oculaires précises avec une très grande fiabilité. La précision obtenue est d'un quart de degré. Ce dispositif (Synapsys, Marseille, France) est composé d'une caméra infrarouge CCD (définition: 320000 pixels) montée sur un masque similaire à ceux utilisés pour le MotoCross (Figure 7). Ce dispositif permet d'enregistrer en temps réel les mouvements oculaires. Les mouvements des yeux sont enregistrés sur l'œil non dominant dans un axe horizontal. La résolution spatiale est inférieure à $0,1^\circ$ [Meyer *et al.*, 2007].



Figure 7 - Masque de vidéonystagmographie composé d'une caméra infrarouge captant les mouvements visuo-oculomoteurs des yeux.

Le sujet a été installé dans un fauteuil fixe dans une pièce totalement noire en face d'un écran placé frontalement au niveau des yeux à une distance de 1,2 mètre. La tête du sujet était stabilisée afin d'obtenir uniquement une réponse oculaire. Une cible blanche est projetée par un vidéo projecteur (1200 ANSI lumens) sur l'écran. Le sujet a pour instruction de fixer et de suivre le point aussi vite et précisément que possible avec ses yeux. Le déplacement de la cible est contrôlé par le logiciel de l'ordinateur préalablement défini. Une calibration précède chaque test pour obtenir des mesures précises en tenant compte des caractéristiques individuelles.

L'évaluation de la fonction visuo-oculomotrice par la vidéonystagmographie s'effectue par l'enregistrement des réponses visuo-oculomotrices lors des mouvements rapides des yeux (saccade) et lors des mouvements lents des yeux (poursuite oculaire).

L'étude des mouvements réflexes se différencie selon que la stimulation permet ou non une automatisation. Le temps de réalisation d'une saccade est fonction de l'incertitude spatiale mais aussi temporelle imposée par la stimulation. Effectivement, la diminution des incertitudes spatiale et temporelle entraîne la création de saccades-réflexes. Ainsi, deux types de séquences ont été utilisés pour les épreuves de saccades afin de différencier ces deux types de mouvements réflexes.

La première séquence (séquence Carrée) est composée de mouvements réguliers de la cible (Figure 8). Le test débute par la fixation d'un point lumineux qui apparaît au milieu de l'écran. Une fois la séquence débutée, le point de fixation disparaît et réapparaît soit à droite, soit à gauche avec une angulation de 20°. Pendant la période de test de 35 secondes, le point alterne entre la droite et la gauche de l'écran avec une fréquence régulière de 0,30 Hz, sans repasser par la position centrale. Cette séquence est ainsi caractérisée par un temps d'apparition mais aussi un emplacement de la cible prévisible. Aucune incertitude n'existe dans ce test.

La seconde séquence (séquence de Freyss) respecte le même procédé que la première. Cependant, lors de ce second test, le temps d'apparition de la cible devient aléatoire. Ainsi, ce test se caractérise par un emplacement de la cible prévisible, défini par son amplitude et sa direction, mais avec une incertitude temporelle.

Les variables de l'interprétation sont la latence et la précision. La latence de refixation est le temps, généralement exprimé en millisecondes, qui sépare l'instant d'apparition d'une nouvelle cible de l'instant du début de déflexion de l'œil qui part à sa rencontre. La latence de refixation est inférieure à 280 ms pour les sujets sains. La précision est le rapport d'amplitude entre la saccade de refixation et l'angle de déflexion de la cible. Ce rapport est exprimé en pourcentage, et on parle d'hypométrie si la précision est inférieure à 75 %. et d'hypermétrie si la précision est supérieure à 100 %.



Figure 8 – Saccades oculaires horizontales induites par la projection alternative, sur un grand écran, d’une cible à droite ou à gauche. La courbe verte représente la cible. La courbe rouge est la réponse oculomotrice du sujet. Le temps est en abscisses et l’amplitude de la saccade est en ordonnées.

Pour les épreuves d’anti-saccades, le sujet a la consigne de regarder un point virtuel symétriquement opposé par rapport à l’apparition du point projeté sur le grand écran. Si le point apparaît à gauche, le sujet doit regarder à droite en conservant la même amplitude (de même quand le point apparaît à droite, le sujet doit regarder à gauche). Ces épreuves d’anti-saccades sont faites à l’aide de la séquence régulière Carrée et de la séquence aléatoire de Freyss. Cette épreuve oblige le sujet à supprimer la saccade réflexe qui amène normalement le regard sur la cible [Munoz & Everling, 2004], il doit alors regarder à l’opposé du site d’apparition de la cible.

Pour l’analyse de la poursuite oculaire, qui est une séquence régulière, le sujet a pour instruction de fixer et de suivre une cible lumineuse qui oscille de gauche à droite (Figure 9). La cible suit un mouvement horizontal, d’amplitude 45° et avec une vitesse constante (0,30 Hz). La poursuite sinusoïdale est extrêmement sensible aux consignes données avant et peut-être plus encore pendant le déroulement du test. L’opérateur informe le participant de ce qu’il attend de lui avant le déclenchement du test.

La variable de l’interprétation est le rapport de vitesse de déplacement de la cible et de celle de l’œil permettant d’obtenir un gain. La valeur du gain est sans unité.

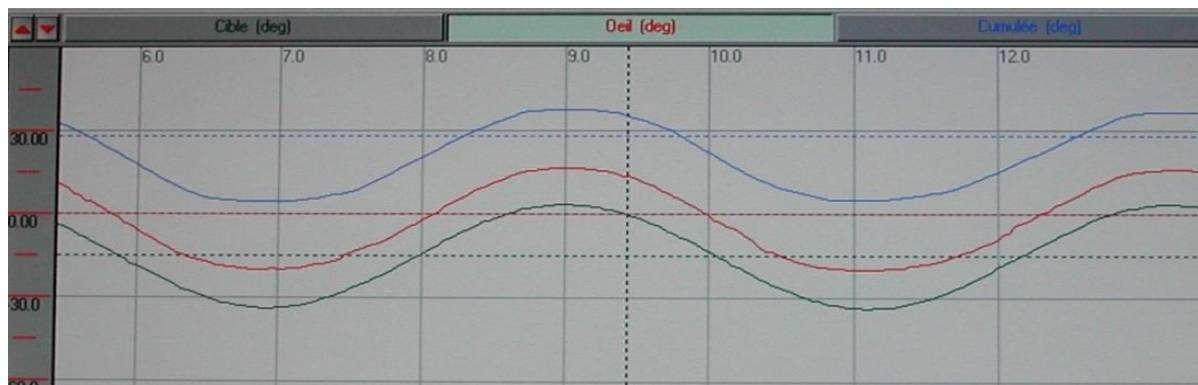


Figure 9 – Poursuite oculaire horizontale d’une cible se déplaçant d’une manière régulière et continue sur un grand écran. La courbe verte représente les déplacements de la cible. La courbe rouge représente le mouvement visuo-oculomoteur du sujet. La courbe bleue, qui représente la réponse cumulée des phases lentes, permet une visualisation d’une éventuelle asymétrie de la poursuite. Le temps est en abscisses et l’amplitude de la poursuite est en ordonnées.

V.2.5 – Evaluation de la verticale visuel subjective

L’évaluation de la verticale visuelle subjective (VVS) a été réalisée, successivement, à la lumière et à l’obscurité, afin d’estimer la verticale gravitaire perçue. Pour chaque évaluation, le sujet était assis dans un fauteuil et devait mettre la baguette placée en face de lui le plus verticalement possible. Dans un premier temps, en présence de lumière, la baguette était inclinée à gauche d’environ 90° par rapport à la verticale gravitaire réelle, et le sujet devait la mettre avec les mains le plus verticalement possible. La différence entre la verticale théorique enregistrée par le dispositif et la verticale subjective est exprimée en degrés et apparaît sur un écran à l’abri du regard du sujet testé. Dans un second temps, dans l’obscurité, la baguette était inclinée horizontalement vers la droite. Le sujet avait là aussi pour consigne de mettre la baguette le plus verticalement possible, mais dans cette condition « sans lumière », seule la phosphorescence de la baguette permettait de prendre des informations visuelles sur sa position. Ce test, très utilisé dans les pathologies vestibulaires, permet de voir les interactions entre le vestibule et la vision dans l’évaluation de la verticale gravitaire [Fetter, 2000].

V.2.4 – Analyse statistique

Les résultats ont été exprimés par la médiane, le premier quartile (Q_1) et le troisième quartile (Q_3). En raison de l’incertitude de la normalité des distributions et en rapport avec la faiblesse des effectifs des populations testées, des tests non paramétriques ont été utilisés. Ainsi, le test U de Mann & Whitney a été utilisé pour effectuer les comparaisons entre les deux groupes

(VTT et routiers) pour les différents paramètres d'intensité de pratique cycliste, du SOT, de la VNG et de la VVS, ainsi que de l'âge, de la taille, du poids et de l'IMC. Enfin, un test non paramétrique de corrélation (rhô de Spearman) a été utilisé pour vérifier les relations possibles entre l'intensité de pratique (VTT et route) et les différentes performances au SOT, à la VNG et à la VVS. Les différences ont été considérées comme significatives au seuil de $p \leq 0,05$.

V.3 – Résultats

Aucune différence significative n'a été observée entre les groupes de vététistes et de routiers pour l'âge, la taille, le poids et l'indice de masse corporel (Tableau II).

Tableau II – Médiane, 1^{er} et 3^{ème} quartiles de l'âge, de la taille, du poids et de l'indice de masse corporel (IMC) observés dans le groupe des vététistes et dans celui des routiers. NS : non significatif.

	Vététistes (n = 24) Médiane (Q ₁ ; Q ₃)	Routiers (n = 24) Médiane (Q ₁ ; Q ₃)	U Mann & Whitney Vététistes vs. Routiers Valeur de z ; p
Age (ans)	20,5 (17,6 ; 24,5)	22,1 (18,6 ; 27,4)	z = -1,57 ; NS
Taille (m)	1,77 (1,73 ; 1,80)	1,80 (1,76 ; 1,84)	z = -1,91 ; NS
Poids (kg)	63,0 (61,0 ; 69,5)	68,5 (64,0 ; 73,5)	z = -1,79 ; NS
IMC (kg.m ⁻²)	21,0 (19,8 ; 21,6)	21,1 (19,6 ; 22,4)	z = -0,86 ; NS

Le tableau III indique les caractéristiques de la pratique du VTT et du cyclisme sur route chez les vététistes et les routiers. Les vététistes pratiquent à la fois le VTT et le cyclisme sur route, alors que l'entraînement des routiers est réalisé quasi-exclusivement sur la route. Les vététistes parcourent 3000 km (Q₁ = 1900 km et Q₃ = 4500 km) en 200,0 heures (Q₁ = 100 heures et Q₃ = 300 heures) de VTT en sous-bois et ont une pratique également sur route 4500 km (Q₁ = 2000 km et Q₃ = 7500 km) en 172,5 heures (Q₁ = 73 heures et Q₃ = 255 heures). Les routiers font 12000 km (Q₁ = 8250 km et Q₃ = 15000 km) en 392 heures (Q₁ = 260 heures et Q₃ = 500 heures) et ils ne font pas de VTT. Tous les paramètres d'entraînement sont statistiquement différents entre les routiers et les vététistes. En résumé, l'entraînement sur route des vététistes est plus faible que celui des routiers ; les vététistes pratiquent évidemment le VTT, alors que les routiers ne le pratiquent pas.

Tableau III – Médiane, 1^{er} et 3^{ème} quartiles des paramètres caractérisant l'intensité de la pratique du VTT ou du cyclisme sur route. Les 4 paramètres sont les distances, le temps, la proportion de kilomètres (%_D) parcourus sur route par rapport aux nombres de kilomètres totaux parcourus et la proportion d'heures (%_T) effectuées sur route par rapport aux nombres d'heures totales effectuées.

	Vététistes et Routiers (n = 48)	Vététistes (n = 24)	Routiers (n = 24)	U Mann & Whitney Vététistes vs. Routiers
	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)	Médiane (Q ₁ ; Q ₃)	Valeur de z ; p
<i>VTT</i>				
Distances (km/an)	1500 (0 ; 3000)	3000 (1900 ; 4750)	0 (0 ; 0)	z = -6,13 ; p < 0,0001
Temps (heures/an)	58 (0 ; 200)	200 (100 ; 300)	0 (0 ; 0)	z = -6,13 ; p < 0,0001
<i>Route</i>				
Distances (km/an)	8000 (4500 ; 12000)	4500 (2000 ; 7500)	12000 (8250 ; 15000)	z = -4,29 ; p < 0,0001
Temps (heures/an)	255 (150 ; 400)	172 (73 ; 255)	392 (260 ; 500)	z = -4,52 ; p < 0,0001
<i>Ratios</i>				
% _D	0,89 (0,60 ; 1,00)	0,60 (0,33 ; 0,78)	1,00 (1,00 ; 1,00)	z = -6,13 ; p < 0,0001
% _T	0,87 (0,48 ; 1,00)	0,48 (0,17 ; 0,67)	1,00 (1,00 ; 1,00)	z = -6,13 ; p < 0,0001

$$\%_D = \text{km}_{\text{Route}} / (\text{km}_{\text{Route}} + \text{km}_{\text{VTT}})$$

$$\%_h = h_{\text{Route}} / (h_{\text{Route}} + h_{\text{VTT}})$$

La figure 10 présente et compare (test U de Mann & Whitney) les résultats aux tests posturographiques des deux populations étudiées. Les performances posturales des routiers sont supérieures à celles des vététistes de manière significative dans les conditions 1 (z = -2,51 ; p = 0,011) et 4 (z = -2,05 ; p = 0,039).

La distance associée au temps de pratique a été retenue pour caractériser le niveau et l'intensité de la pratique sportive. Nous avons donc analysé, à l'aide du test de corrélation de Spearman, la relation pouvant exister entre l'intensité de pratique (distance parcourue, temps et proportions de route) et les performances posturales. Pour l'ensemble des cyclistes (routiers + vététistes : n = 48), les résultats montrent une corrélation négative significative entre les deux paramètres d'intensité de pratique en VTT (km_{VTT} : p = 0,012 ; h_{VTT} : p = 0,012) et les performances posturales dans la condition 1 du SOT (Tableau IV). Ces résultats sont corroborés par des corrélations significativement positives entre la proportion d'entraînement sur route et les performances posturales dans la première condition (%_D : p = 0,017 et %_T : p = 0,015). Quand en situation-test posturale toutes les informations sensorielles sont disponibles et non faussées, les cyclistes les plus performants sont ceux qui pratiquent essentiellement le cyclisme sur route. Les corrélations sont aussi significativement négatives entre l'intensité de pratique du VTT (km_{VTT} : p = 0,035 ; h_{VTT} : p = 0,022) et la condition 4. Comme pour la

condition 1, ces derniers résultats sont confirmés par des corrélations significativement positives relatives aux pourcentages d'entraînement sur route ($\%_D$: $p = 0,009$ et $\%_T$: $p = 0,012$). L'ensemble des résultats de la condition 4 montre que les vététistes sont très perturbés quand la proprioception est faussée. Enfin, le ratio visuel est significativement corrélé positivement avec le pourcentage de kilomètres effectués sur route ($\%_D$: $p = 0,054$).

Le tableau V permet de vérifier si la pratique du cyclisme sur route dans le groupe de vététistes ($n = 24$) a des conséquences sur le contrôle postural. Les corrélations obtenues montrent que plus le vététiste fait de kilomètres en VTT ($p = 0,018$), plus son ratio somesthésique est grand. Plus le vététiste fait de kilomètres sur route ($p = 0,033$), plus son ratio à la préférence proprioceptive (R^{PREFP}) est important. Le ratio visuel est, comme pour l'ensemble des cyclistes, corrélé de manière significative et positive avec l'entraînement sur route (km_{Route} : $p = 0,048$).

D'autre part, il n'y a pas de corrélation significative entre l'intensité de pratique et les performances posturales dans le groupe de routiers (Tableau VI).

En résumé, il apparaît que le contrôle postural des routiers est, globalement et dans certaines conditions, plus efficace que celui des vététistes. Il apparaît aussi que les vététistes semblent développer une certaine préférence pour les informations somesthésiques, alors que les routiers utiliseraient davantage la vision pour s'équilibrer. Néanmoins, les routiers possèdent également de bonnes aptitudes à permuter entre les différents types d'informations sensorielles lorsque la vision est absente ou faussée (pour passer de la vision à la proprioception ou à la régulation vestibulaire).

La figure 11 rapporte les données de la VNG et les comparaisons (test U de Mann & Whitney) entre les groupes de vététistes et de routiers. Aucune différence significative n'a été observée.

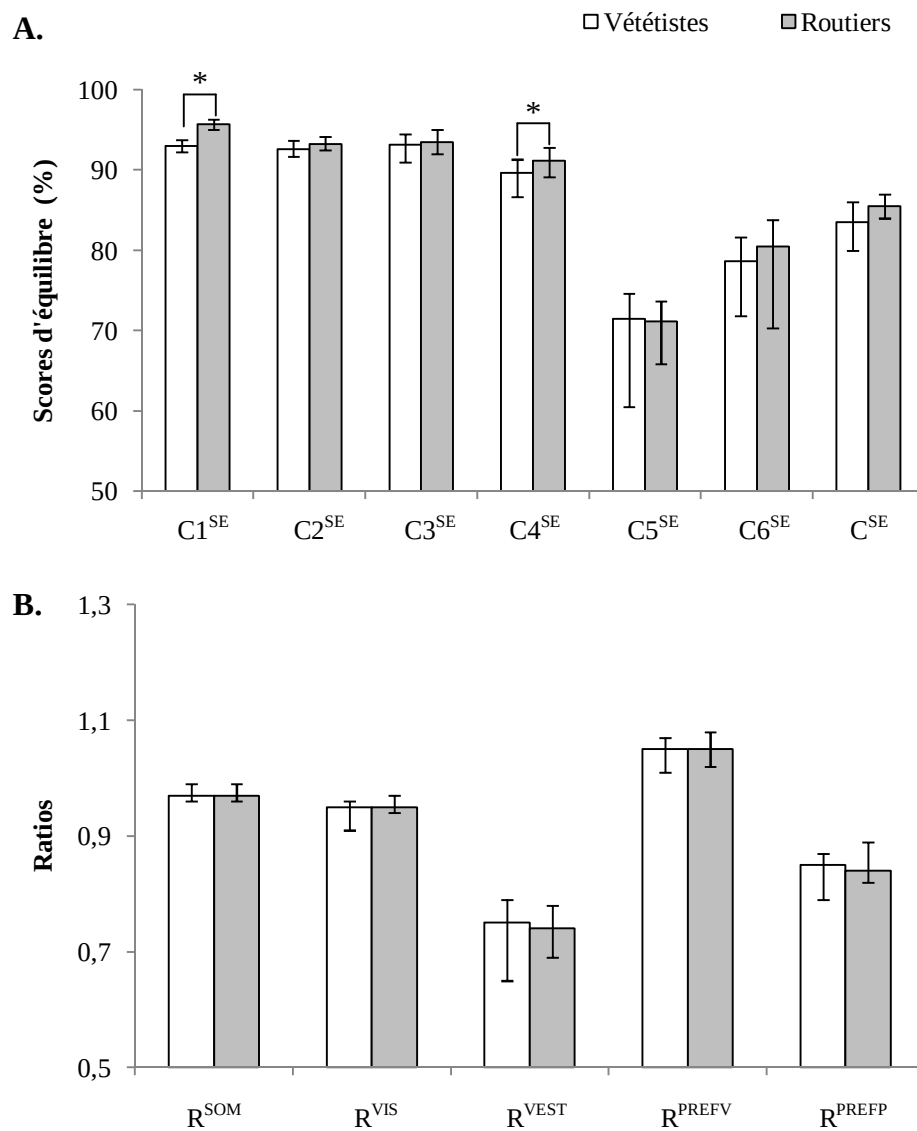


Figure 10 – Test d’organisation sensorielle. Valeurs exprimées en médiane, 1^{er} et 3^{ème} quartiles pour les scores d’équilibre des six conditions (C1^{SE}, C2^{SE}, C3^{SE}, C4^{SE}, C5^{SE}, C6^{SE}), pour le score d’équilibre composite (C^{SE}) (partie A) et pour les différents ratios (R^{SOM}, R^{VIS}, R^{VEST}, R^{PREFV}, R^{PREFP}) (partie B) observés chez les vététistes (barres blanches) et les routiers (barres gris clair). Significativités statistiques utilisées : * : $p \leq 0,05$.

Tableau IV – Test de corrélation de Spearman entre l'intensité de la pratique et les performances posturales pour l'ensemble des sujets ($n = 48$). Les kilomètres parcourus en VTT (km_{VTT}) et en route (km_{Route}) par an, les heures faites en VTT (h_{VTT}) et en route (h_{Route}) par an, et les proportions en km ($\%_D$) et en heure ($\%_T$) de cyclisme sur route effectué sur la somme route plus VTT par an sont corrélés aux conditions et aux ratios du Test d'Organisation Sensorielle. NS : non significatif.

	Corrélation de Spearman, valeur de ρ					
	Significativité (p)					
	km_{VTT}	h_{VTT}	km_{Route}	h_{Route}	$\%_D$	$\%_T$
$C1^{SE}$	$\rho = -0,36$	$\rho = -0,37$	$\rho = 0,19$	$\rho = 0,21$	$\rho = 0,35$	$\rho = 0,35$
	$p = 0,012$	$p = 0,012$	NS	NS	$p = 0,017$	$p = 0,015$
$C2^{SE}$	$\rho = -0,20$	$\rho = -0,22$	$\rho = 0,20$	$\rho = 0,21$	$\rho = 0,21$	$\rho = 0,23$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
$C3^{SE}$	$\rho = -0,19$	$\rho = -0,21$	$\rho = 0,10$	$\rho = 0,17$	$\rho = 0,19$	$\rho = 0,19$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
$C4^{SE}$	$\rho = -0,31$	$\rho = -0,33$	$\rho = 0,27$	$\rho = 0,22$	$\rho = 0,38$	$\rho = 0,36$
	$p = 0,035$	$p = 0,022$	NS	NS	$p = 0,009$	$p = 0,012$
$C5^{SE}$	$\rho = 0,01$	$\rho = -0,02$	$\rho = 0,19$	$\rho = 0,24$	$\rho = 0,08$	$\rho = 0,10$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
$C6^{SE}$	$\rho = -0,07$	$\rho = -0,10$	$\rho = 0,17$	$\rho = 0,13$	$\rho = 0,15$	$\rho = 0,13$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
C^{SE}	$\rho = -0,18$	$\rho = -0,20$	$\rho = 0,26$	$\rho = 0,24$	$\rho = 0,25$	$\rho = 0,23$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
R^{SOM}	$\rho = 0,06$	$\rho = 0,02$	$\rho = 0,10$	$\rho = 0,12$	$\rho = -0,005$	$\rho = 0,07$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
R^{VIS}	$\rho = -0,17$	$\rho = -0,21$	$\rho = 0,25$	$\rho = 0,17$	$\rho = 0,28$	$\rho = 0,26$
	NS	NS	NS	NS	$p = 0,054$	NS
R^{VEST}	$\rho = 0,03$	$\rho = 0,01$	$\rho = 0,18$	$\rho = 0,22$	$\rho = 0,06$	$\rho = 0,07$
	NS	NS	NS	NS	NS	$\rho = NS$
R^{PREFV}	$\rho = -0,08$	$\rho = -0,07$	$\rho = -0,04$	$\rho = -0,09$	$\rho = 0,07$	$\rho = 0,04$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
R^{PREFP}	$\rho = -0,09$	$\rho = -0,04$	$\rho = 0,22$	$\rho = 0,18$	$\rho = 0,12$	$\rho = 0,10$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Tableau V – Test de corrélation de Spearman entre l'intensité de la pratique et les performances posturales pour le groupe des vététistes (n = 24). Les kilomètres parcourus en VTT (km_{VTT}) et en route (km_{Route}) par an, les heures faites en VTT (h_{VTT}) et en route (h_{Route}) par an, et les proportions en km (%_D) et en heure (%_T) de cyclisme sur route effectué sur la somme route plus VTT par an sont corrélés aux conditions et aux ratios du Test d'Organisation Sensorielle. NS : non significatif.

	Corrélation de Spearman, valeur de ρ					
	Significativité (p)					
	km _{VTT}	h _{VTT}	km _{Route}	h _{Route}	% _D	% _T
C1 ^{SE}	$\rho = -0,11$	$\rho = -0,07$	$\rho = -0,11$	$\rho = 0,01$	$\rho = 0,004$	$\rho = -0,08$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
C2 ^{SE}	$\rho = 0,30$	$\rho = 0,19$	$\rho = -0,18$	$\rho = -0,19$	$\rho = -0,21$	$\rho = -0,25$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
C3 ^{SE}	$\rho = -0,09$	$\rho = -0,18$	$\rho = 0,05$	$\rho = 0,09$	$\rho = 0,13$	$\rho = 0,11$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
C4 ^{SE}	$\rho = -0,01$	$\rho = -0,11$	$\rho = 0,32$	$\rho = 0,19$	$\rho = 0,21$	$\rho = 0,29$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
C5 ^{SE}	$\rho = 0,12$	$\rho = 0,05$	$\rho = 0,24$	$\rho = 0,33$	$\rho = 0,19$	$\rho = 0,18$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
C6 ^{SE}	$\rho = 0,05$	$\rho = -0,09$	$\rho = 0,38$	$\rho = 0,32$	$\rho = 0,24$	$\rho = 0,32$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
C ^{SE}	$\rho = 0,06$	$\rho = 0,01$	$\rho = 0,25$	$\rho = 0,24$	$\rho = 0,15$	$\rho = 0,22$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
R ^{SOM}	$\rho = 0,49$	$\rho = 0,34$	$\rho = -0,09$	$\rho = -0,12$	$\rho = -0,26$	$\rho = -0,29$
	$p = 0,018$	NS	NS	NS	NS	NS
R ^{VIS}	$\rho = 0,09$	$\rho = -0,03$	$\rho = 0,41$	$\rho = 0,25$	$\rho = 0,20$	$\rho = 0,30$
	NS	NS	$p = 0,048$	NS	NS	NS
R ^{VEST}	$\rho = 0,13$	$\rho = 0,05$	$\rho = 0,27$	$\rho = 0,34$	$\rho = 0,20$	$\rho = 0,18$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
R ^{PREFV}	$\rho = -0,16$	$\rho = -0,17$	$\rho = 0,14$	$\rho = 0,01$	$\rho = 0,08$	$\rho = 0,19$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
R ^{PREFP}	$\rho = 0,08$	$\rho = -0,04$	$\rho = 0,44$	$\rho = 0,38$	$\rho = 0,27$	$\rho = 0,34$
	NS	NS	$p = 0,033$	NS	NS	NS

Tableau VI – Test de corrélation de Spearman entre l'intensité de la pratique et les performances posturales pour le groupe des routiers (n = 24). Les kilomètres parcourus en route (km_{Route}) par an et les heures faites en route (h_{Route}) par an sont corrélés aux conditions et aux ratios du Test d'Organisation Sensorielle. NS : non significatif.

	Corrélation de Spearman, valeur de ρ Significativité (p)	
	km _{Route}	h _{Route}
C1 ^{SE}	$\rho = -0,05$	$\rho = -0,03$
	NS	NS
C2 ^{SE}	$\rho = 0,20$	$\rho = 0,27$
	NS	NS
C3 ^{SE}	$\rho = -0,05$	$\rho = 0,08$
	NS	NS
C4 ^{SE}	$\rho = -0,11$	$\rho = -0,13$
	NS	NS
C5 ^{SE}	$\rho = 0,04$	$\rho = 0,06$
	NS	NS
C6 ^{SE}	$\rho = -0,09$	$\rho = -0,10$
	NS	NS
C ^{SE}	$\rho = -0,02$	$\rho = 0,01$
	NS	NS
R ^{SOM}	$\rho = 0,22$	$\rho = 0,31$
	NS	NS
R ^{VIS}	$\rho = -0,14$	$\rho = -0,17$
	NS	NS
R ^{VEST}	$\rho = 0,04$	$\rho = 0,06$
	NS	NS
R ^{PREFV}	$\rho = -0,24$	$\rho = -0,22$
	NS	NS
R ^{PREFP}	$\rho = -0,05$	$\rho = -0,06$
	NS	NS

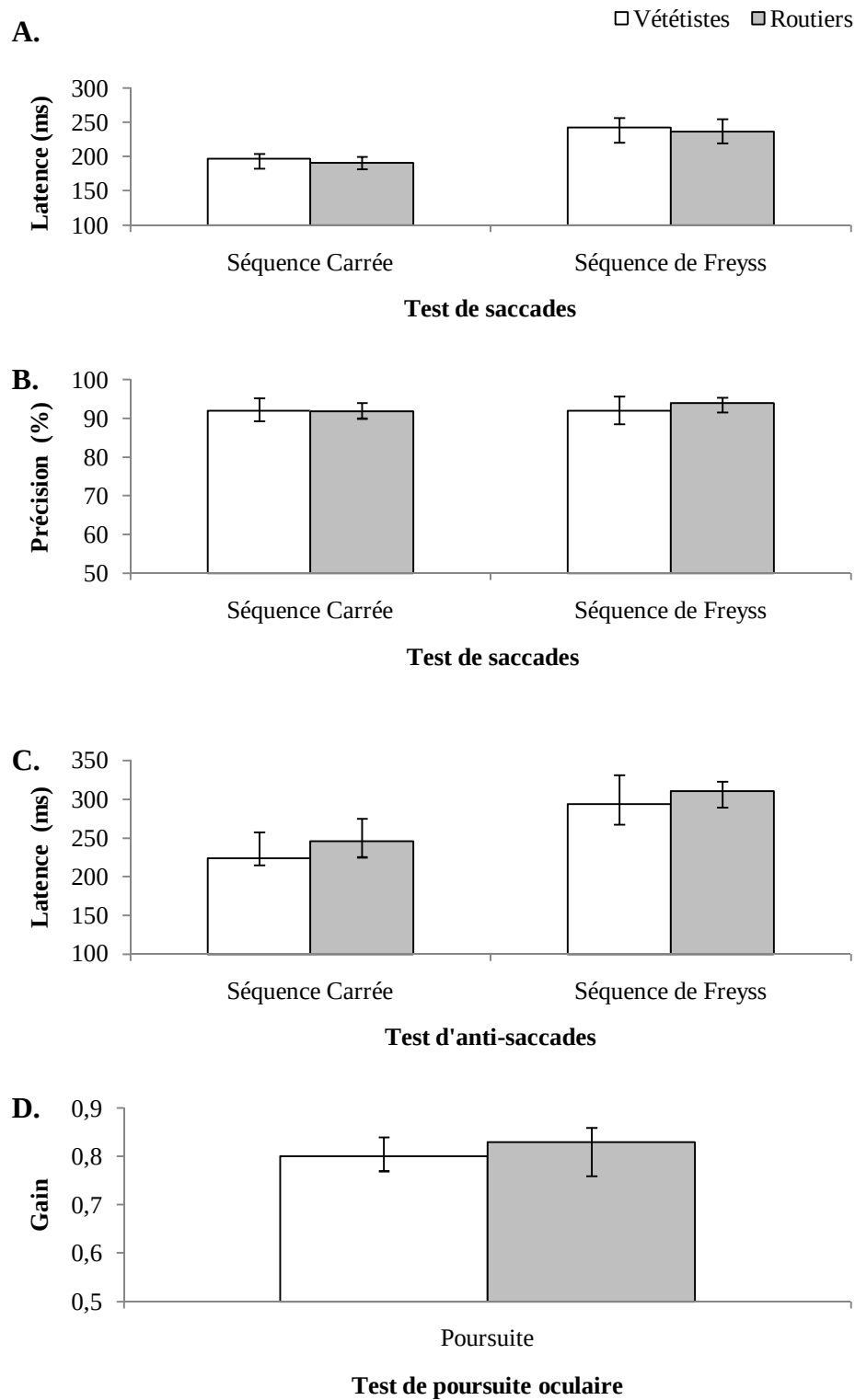


Figure 11- Test d'oculomotricité : la vidéonystagmographie. Valeurs exprimées en médiane, 1^{er} et 3^{ème} quartiles des paramètres latence (ms) et précision (%) de la Séquences Carrée et de la Séquence de Freyss pour les épreuves de saccades (parties A et B), du paramètre latence (ms) de la Séquences Carrée et de la Séquence de Freyss pour les épreuves d'anti-saccades (partie C) et du gain pour la poursuite oculaire (partie D) observés chez les vététistes (barres blanches) et les routiers (barres gris clair).

Pour l'ensemble des cyclistes ($n = 48$), plus la pratique du VTT est importante, plus les réponses visuo-oculomotrices sont rapides dans les tests d'anti-saccades (Tableau VII). Plus le coureur fait du VTT ($km_{VTT} : p = 0,025$; $h_{VTT} : p = 0,049$), plus sa latence pour la séquence Carrée en anti-saccades est petite, les observations sont identiques pour la séquence de Freyss en anti-saccades ($km_{VTT} : p = 0,049$).

Aucune corrélation n'existe entre l'intensité de pratique et les réponses visuo-oculomotrices quelles que soient les épreuves et quelles que soient les spécialités cyclistes (Tableaux VIII et IX).

En résumé, lorsque l'on demande au sujet de regarder d'une façon symétriquement opposée à l'apparition de la cible sur l'écran (épreuves d'anti-saccades), les latences des réponses visuo-oculomotrices des vététistes sont plus courtes que celles des routiers.

Enfin, pour le test de verticalité visuelle subjective, aucune différence significative n'a été observée, dans les deux conditions avec et sans lumière entre les deux populations (Figure 12). D'autre part, aucune corrélation n'est significative entre les paramètres d'intensité de la pratique et la VVS.

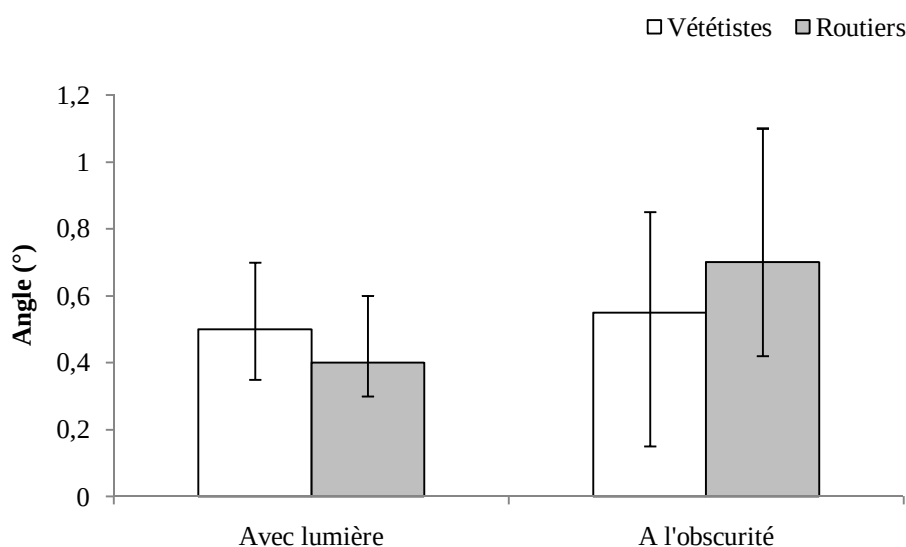


Figure 12 - Test de verticalité visuelle subjective (avec lumière et à l'obscurité). Les Valeurs exprimées en médiane, 1^{er} et 3^{ème} quartiles des paramètres des écarts de la verticale visuelle subjective perçue par rapport à la verticale gravitaire réelle (exprimés en degré (°)) observées chez les vététistes (barres blanches) et les routiers (barres gris clair).

Tableau VII – Test de corrélation de Spearman entre l'intensité de la pratique et les performances visuo-oculomotrices pour l'ensemble des sujets ($n = 48$). Les kilomètres parcourus en VTT (km_{VTT}) et en route (km_{Route}) par an, les heures faites en VTT (h_{VTT}) et en route (h_{Route}) par an, et les proportions en km ($\%_D$) et en heure ($\%_T$) et de cyclisme sur route effectué sur la somme route plus VTT par an sont corrélés aux différents paramètres concernant la vidéonystagmographie. AS : épreuves d'anti-saccades. NS : non significatif.

	Corrélation de Spearman, valeur de ρ Significativité (p)					
	km_{VTT}	h_{VTT}	km_{Route}	h_{Route}	$\%_D$	$\%_T$
Séquence carrée : latence	$\rho = -0,001$	$\rho = -0,01$	$\rho = -0,04$	$\rho = -0,02$	$\rho = -0,04$	$\rho = -0,07$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Séquence carrée : précision	$\rho = 0,02$	$\rho = 0,04$	$\rho = -0,18$	$\rho = -0,16$	$\rho = -0,04$	$\rho = -0,07$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Séquence de Freyss : latence	$\rho = -0,07$	$\rho = -0,02$	$\rho = -0,11$	$\rho = -0,05$	$\rho = -0,01$	$\rho = -0,02$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Séquence de Freyss : précision	$\rho = -0,19$	$\rho = -0,17$	$\rho = -0,11$	$\rho = -0,03$	$\rho = 0,17$	$\rho = 0,14$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
AS séquence carrée : latence	$\rho = -0,35$	$\rho = -0,30$	$\rho = 0,18$	$\rho = 0,19$	$\rho = 0,28$	$\rho = 0,28$
	$p = 0,025$	$p = 0,049$	NS	NS	NS	NS
AS séquence de Freyss : latence	$\rho = -0,30$	$\rho = -0,27$	$\rho = 0,03$	$\rho = 0,09$	$\rho = 0,26$	$\rho = 0,25$
	$p = 0,049$	NS	NS	NS	NS	NS
Poursuite	$\rho = -0,02$	$\rho = -0,01$	$\rho = 0,09$	$\rho = 0,08$	$\rho = 0,05$	$\rho = 0,06$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Tableau VIII – Test de corrélation de Spearman entre l'intensité de la pratique et les performances visuo-oculomotrices pour le groupe des vététistes (n = 24). Les kilomètres parcourus en VTT (km_{VTT}) et en route (km_{Route}) par an, les heures faites en VTT (h_{VTT}) et en route (h_{Route}) par an, et les proportions en km (%_D) et en heure (%_T) de cyclisme sur route effectué sur la somme route plus VTT par an sont corrélés aux différents paramètres concernant la vidéonystagmographie. AS : épreuves d'anti-saccades. NS : non significatif.

	Corrélation de Spearman, valeur de ρ					
	Significativité (p)					
	km _{VTT}	h _{VTT}	km _{Route}	h _{Route}	% _D	% _T
Séquence carrée : latence	$\rho = -0,28$	$\rho = -0,24$	$\rho = -0,01$	$\rho = 0,13$	$\rho = 0,12$	$\rho = 0,01$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Séquence carrée : précision	$\rho = 0,11$	$\rho = 0,19$	$\rho = -0,32$	$\rho = -0,23$	$\rho = -0,20$	$\rho = 0,30$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Séquence de Freyss : latence	$\rho = -0,13$	$\rho = 0,08$	$\rho = -0,34$	$\rho = -0,17$	$\rho = -0,15$	$\rho = -0,22$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Séquence de Freyss : précision	$\rho = 0,01$	$\rho = 0,05$	$\rho = -0,20$	$\rho = -0,02$	$\rho = -0,02$	$\rho = -0,12$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
AS séquence carrée : latence	$\rho = -0,23$	$\rho = -0,03$	$\rho = -0,05$	$\rho = 0,10$	$\rho = 0,02$	$\rho = -0,05$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
AS séquence de Freyss : latence	$\rho = -0,33$	$\rho = -0,20$	$\rho = 0,04$	$\rho = 0,19$	$\rho = 0,17$	$\rho = 0,14$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Poursuite	$\rho = 0,13$	$\rho = 0,17$	$\rho = 0,16$	$\rho = 0,12$	$\rho = 0,05$	$\rho = 0,07$
	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Tableau IX – Test de corrélation de Spearman entre l'intensité de la pratique et les performances visuo-oculomotrices pour le groupe de routiers (n = 24). Les kilomètres parcourus en route (km_{Route}) par an et les heures faites en route (h_{Route}) par an sont corrélés aux différents paramètres concernant la vidéonystagmographie. AS : épreuves d'anti-saccades. NS : non significatif.

	Corrélation de Spearman, valeur de ρ Significativité (p)	
	km _{Route}	h _{Route}
Séquence carrée : latence	$\rho = 0,07$	$\rho = -0,07$
	NS	NS
Séquence carrée : précision	$\rho = -0,08$	$\rho = -0,17$
	NS	NS
Séquence de Freyss : latence	$\rho = 0,13$	$\rho = 0,08$
	NS	NS
Séquence de Freyss : précision	$\rho = -0,35$	$\rho = -0,36$
	NS	NS
AS séquence carrée : latence	$\rho = 0,05$	$\rho = -0,06$
	NS	NS
AS séquence de Freyss : latence	$\rho = -0,15$	$\rho = -0,19$
	NS	NS
Poursuite	$\rho = 0,01$	$\rho = 0,09$
	NS	NS

V.4 – Discussion

Cette étude a montré que les performances posturales des routiers étaient supérieures à celles des vététistes en C1^{SE} et C4^{SE}. De plus, l'information visuelle nécessaire au maintien de l'équilibre était mieux utilisée par les routiers et les vététistes qui pratiquaient le plus de cyclisme sur route. Les informations somesthésiques étaient mieux utilisées par les vététistes qui pratiquaient le plus de VTT. Enfin, les réponses oculomotrices des vététistes étaient plus rapides que celles des routiers dans les épreuves d'anti-saccades.

V.4.1 – Rôle de l'environnement et de l'équipement dans le contrôle de l'équilibre des cyclistes

Une des priorités en cyclisme, à la fois sur route et en VTT, est d'assurer la meilleure propulsion, grâce à une adhérence optimale des pneumatiques au sol, avec la plus faible dépense énergétique. La posture, étant un élément clé de tous les systèmes perception/action, peut être considérée comme un appui principal de l'exploration de l'environnement en termes d'analyses perceptuelles et d'action motrice et peut aussi servir de support mécanique à l'action [Massion & Woollacott, 1996]. En cyclisme sur route, l'environnement est souvent stable et nécessite une régulation posturale lente et précise sur la bicyclette. Les routiers sont donc caractérisés par une certaine raideur sur leur machine permettant d'augmenter l'efficacité du pédalage et de diminuer la dépense énergétique. En revanche, en VTT, l'environnement est souvent instable et changeant [Gregory *et al.*, 2007] et requiert des réactions d'équilibre rapides, pouvant être moins précises. Ces réactions d'équilibre des vététistes permettent une grande exploration spatiale autour du système individu/bicyclette. Ainsi, la posture est instable mais relativement contrôlée pour assurer une adhérence permanente entre le terrain et les roues de la bicyclette.

En VTT et en cyclisme sur route, la stabilité de la bicyclette nécessite la combinaison des habiletés du cycliste et des propriétés physiques et mécaniques de la bicyclette (caractéristiques de la bicyclette, vitesse, forces gyroscopiques, *etc.*). Une bicyclette poussée et laissée libre va rester en équilibre, décrire une longue courbe et finalement tomber au bout de 20 secondes. En revanche, une bicyclette, qui n'a pas été poussée, tombera au bout de 2 secondes. La machine dispose de sa propre stabilité qui dépend de la force de propulsion. Ainsi, plus une bicyclette ira vite, plus il sera facile de l'utiliser [Jones, 1970]. Des forces

élevées d'équilibration et des habilités importantes d'équilibre sont davantage nécessaires à faible vitesse. Les vitesses faibles qui sont caractéristiques du VTT (cross-country) pourraient conditionner les cyclistes à faire plus confiance aux informations somesthésiques pour contrôler leur équilibre.

Les caractéristiques de la bicyclette et en particulier les caractéristiques des pneumatiques (section, chape, structure), qui permettent d'obtenir la meilleure adhérence avec la plus faible force de résistance, ont un effet sur l'équilibre en cyclisme sur route et davantage en VTT. Les répercussions des faibles contraintes d'équilibre en cyclisme sur route sur le choix des pneumatiques sont faibles et concernent principalement l'adhérence. En effet, les pneumatiques sont souvent les mêmes quelle que soit la surface de la route (qualité du revêtement). La principale modification est observée lorsque la route est humide et concerne la section des pneumatiques. Elle est liée à une diminution de la pression des pneumatiques permettant d'augmenter la largeur de la bande de roulement ce qui offre une meilleure adhérence et un meilleur équilibre. En VTT, le choix des pneumatiques, qui est lié aux importantes contraintes d'équilibre, dépend non seulement des caractéristiques du terrain mais aussi des préférences du vététiste. Ainsi, d'importantes sections de pneumatiques recouvertes de rares crampons volumineux sont généralement utilisées dans des conditions boueuses. Toutefois, certains vététistes préfèrent utiliser des sections plus petites. Dans les deux cas, la faible pression des pneumatiques permet d'absorber les bosses, d'obtenir une meilleure adhérence et par conséquent d'avoir un meilleur équilibre. En revanche, une petite section des pneumatiques associée à une pression élevée est souvent préférée dans des conditions sèches [Absalon *et al.*, 2006]. Les pneumatiques ont donc un effet important dans l'adhérence à la fois en cyclisme sur route et en VTT. Des choix inappropriés de pneumatiques peuvent avoir de lourdes conséquences sur l'équilibre en particulier en VTT.

V.4.2 – Rôle du système visuel dans le contrôle de l'équilibre des cyclistes

En général, les activités physiques augmentent l'efficacité de la posture résultant d'une augmentation de la sensibilité des capteurs sensoriels et du développement d'une hiérarchie sensorielle basée sur une préférence proprioceptive [Mesure *et al.*, 1997 ; Perrin *et al.*, 1998 ; Gauchard *et al.*, 1999]. En revanche, certaines activités physiques comme la danse classique permettent de développer une hiérarchie sensorielle offrant une plus grande contribution des informations visuelles dans le contrôle de l'équilibre [Perrin *et al.*, 2002].

Les résultats ont montré que le contrôle postural des routiers était meilleur que celui des vététistes en particulier quand les informations somatokinesthésiques étaient faussées. Ces résultats peuvent être expliqués par une meilleure utilisation des informations visuelles en cyclisme sur route. L'afférence visuelle, qui est une information sensorielle déterminante pour le maintien de la posture [Vuillerme *et al.*, 2001b], permet à la fois l'utilisation de repères extérieurs et l'estimation des déplacements du sujet et/ou de l'environnement [Berensci *et al.*, 2005].

En cyclisme sur route, la vision est une source prédominante d'informations pour le positionnement de la bicyclette par rapport aux autres coureurs et par rapport à l'environnement. La vision est d'autant plus efficace que ce type d'information sensorielle est peu perturbé dans ce type d'exercice. Les routiers assurent leur équilibre en regardant successivement le profil de la route, la roue arrière et les épaules du cycliste juste devant eux. De plus, en regardant loin devant, la vision permet d'anticiper et de programmer une réponse motrice adaptée aux particularités de la route. L'entraînement en cyclisme sur route des vététistes était corrélé à l'utilisation des informations visuelles. Par conséquent, l'entraînement en cyclisme sur route résulte non seulement pour les routiers mais aussi pour les vététistes dans une utilisation préférentielle de la vision pour réguler le contrôle postural et plus généralement l'action motrice.

Au niveau visuo-oculomoteur, les réponses des vététistes, dans les épreuves d'anti-saccades, étaient plus rapides que celles des routiers. Ces résultats sont en accord avec ceux du test d'organisation sensorielle qui montrent que les vététistes ont une préférence pour les informations proprioceptives. Étant donné l'absence de fixation fovéale sur la cible, on peut admettre que les épreuves d'anti-saccades stimulent essentiellement la vision périphérique. Cette vision périphérique est souvent considérée comme proprioceptive [Mazevet *et al.*, 2004]. Ainsi, les vététistes - observés comme étant plus proprioceptifs - présentent-ils des latences courtes dans les épreuves d'anti-saccades. Ce résultat peut aussi être expliqué par le fait que la rétine périphérique, en VTT, est principalement stimulée par les défilements latéraux et frontaux du paysage, ceci s'accompagnant d'une impression de vitesse qui augmente avec la proximité de la végétation. Les vététistes, surtout en descente, vont regarder un virage à l'avance afin de pouvoir produire une réponse motrice appropriée à la nature et au profil du terrain. Land et Lee [1994] ont montré que les conducteurs automobiles regardent le point tangent à l'intérieur des virages. Il est envisageable que les vététistes regardent le point tangent du virage, tant au moment de l'approche du virage que dans celui de son exécution, puis qu'ils cherchent par le regard de nouvelles informations sur le profil du terrain afin

d'adopter la trajectoire optimale. Morrillo *et al.* [2006] ont montré que la rapidité de la réponse oculomotrice des tireurs dans les épreuves de saccades et d'anti-saccades n'est pas due à une meilleure attention, mais plutôt à une préparation motrice plus rapide. Ainsi, la rapidité des réponses des vététistes dans les épreuves d'anti-saccades pourrait s'expliquer par une préparation motrice rapide, acquise par l'entraînement et les compétitions. Toutefois, le rôle de l'attention dans le contrôle postural étant aussi démontré [Woollacott & Shumway-Cook, 2002], il serait intéressant de tester l'équilibration de ces routiers et de ces vététistes dans des situations de double tâche (calcul mental ou test de mémoire par exemple) rendant le maintien de la posture plus difficile.

V.4.3 – Rôle du système vestibulaire dans le contrôle de l'équilibre des cyclistes

En VTT, les informations visuelles, vestibulaires et somatosensorielles sont souvent perturbées par la végétation et par les vibrations induites par le terrain (racines, boue, cailloux, ornières, *etc.*). Bien que l'utilisation de suspension limite ces vibrations [MacRae *et al.*, 2000 ; Nishii *et al.*, 2004] et que l'utilisation de lunettes protège les yeux, la vision en particulier demeure perturbée par la difficulté à utiliser le réflexe vestibulo-oculaire (oscillopsies) et la fonction visuo-oculomotrice. L'équilibre est donc souvent instable.

Dans cette étude, lorsque la vision était supprimée ou faussée, les performances posturales des routiers n'étaient pas inférieures à celles des vététistes. De plus, lorsque l'information vestibulaire était la seule information fiable, le contrôle postural des vététistes était similaire à celui des routiers. Le développement et l'utilisation de la fonction vestibulaire ne varie pas selon ces deux spécialités du cyclisme. Comme cela a été montré chez des gymnastes [Balter *et al.*, 2004a], les différentes stratégies posturales sont essentiellement acquises par l'entraînement moteur et non pas par les habiletés d'apprentissage ou par une sensibilité plus élevée du système vestibulaire.

En VTT, les vibrations peuvent altérer l'information vestibulaire. De plus, l'oreille interne est stimulée par des accélérations/décélérations répétées, qui peuvent générer des déplacements et/ou des dislocations des otoconies des organes otolithiques induisant les symptômes typiques du vertige positionnel paroxystique bénin [Vibert *et al.*, 2007]. Par ailleurs, les informations concernant l'instabilité posturale données par l'oreille interne, qui est au sommet du système individu/bicyclette et qui est perturbée par les vibrations (en particulier en VTT), ne sont pas suffisamment fiables et ne permettent pas une rapide mise en place d'une réponse motrice adaptée quand une chute a déjà commencé.

V.4.4 – Rôle du système somatokinesthésique dans le contrôle de l'équilibre des cyclistes

Le VTT, qui se pratique dans un environnement instable, n'induit pas une meilleure utilisation des informations somesthésiques que le cyclisme sur route. Néanmoins, chez les vététistes, plus la pratique de VTT est importante, plus les informations proprioceptives sont utilisées dans le contrôle postural.

La composante musculaire est un facteur important dans la régulation du contrôle postural. Ainsi, la force musculaire semble être liée à une stabilité posturale efficace chez les personnes âgées [Gauchard *et al.*, 1999] et chez les jeunes adultes [Angyán *et al.*, 2007]. De plus, Chapman *et al.* (2007) ont montré que le recrutement musculaire était fortement spécifique chez les cyclistes entraînés alors que ce recrutement était moins important chez les cyclistes novices. Le recrutement musculaire chez les cyclistes les plus entraînés résulte des adaptations neuromusculaires à la réalisation répétée du mouvement de pédalage à l'entraînement et en compétition. Le recrutement musculaire et la force musculaire, qui diffèrent selon le niveau de pratique, peuvent induire un usage différencié de l'information musculaire.

La proprioception est une information importante dans le contrôle de l'équilibre des judoka [Perrin *et al.*, 1998], des gymnastes [Vuillerme *et al.*, 2001a] et des danseurs [Golomer *et al.*, 1999 ; Golomer & Dupui, 2000]. De même, la proprioception semble être une importante source d'information des vététistes les plus entraînés. Les vététistes ne peuvent pas maîtriser l'utilisation des informations visuelles et vestibulaires et doivent donc se fier davantage aux informations proprioceptives. La proprioception, qui permet de percevoir la position et de réagir rapidement aux déstabilisations [Ledin & Odkvist, 1991 ; Bagesteiro *et al.*, 2006], pourrait ainsi être préférée par les vététistes qui pratiquent le plus de VTT pour contrôler et stabiliser la bicyclette. En effet, l'instabilité posturale induite par l'irrégularité de la surface d'évolution contraint les vététistes à choisir une réponse motrice appropriée et efficace.

La meilleure utilisation des informations proprioceptives dans le contrôle de l'équilibre des vététistes les plus entraînés peut aussi être liée à l'habitude des vibrations induites par le terrain. L'estimation de la longueur des muscles est perturbée par les vibrations pouvant donner des illusions kinesthésiques. Ainsi, la perception de la position des articulations est inexacte, car le système nerveux central surestime la longueur du muscle [Grappe, 2005]. La décharge du fuseau neuromusculaire est alors interprétée comme un allongement et par

conséquent un déplacement d'un membre [Goodwin *et al.*, 1972]. Chez les meilleurs vététistes, la force musculaire et l'habitation peuvent être les deux mécanismes principaux permettant un contrôle des informations perturbées par les vibrations. Premièrement, la force musculaire, maintenant l'articulation par les contractions musculaires, peut par conséquent limiter les vibrations musculaires. Dès lors les illusions kinesthésiques, induites par les vibrations, diminuent et les informations somatokinesthésiques deviennent fiables. Deuxièmement, Tjernström *et al.* [2002] ont indiqué qu'une adaptation et une habitation au niveau de la régulation du contrôle postural apparaissent et perdurent après une stimulation vibratoire longue et répétée. Ainsi, ces sollicitations pourraient conduire, chez les vététistes, à une habitation du système nerveux central à neutraliser les effets des vibrations induites par le terrain augmentant le poids de la proprioception. Cette explication peut être illustrée par les routiers qui participent à Paris-Roubaix et qui présentent des illusions kinesthésiques dues au manque d'habitude à rouler sur les pavés. Les sensations, ressenties durant la course, devraient être faussées par rapport à celles que les cyclistes sont habitués à percevoir sur les routes « classiques » qu'ils parcourent le reste de l'année [Grappe, 2005].

V.4.5 – Conclusion

Cette étude a montré que la pratique de certaines spécialités du cyclisme peut avoir un impact différencié sur le contrôle postural. Ainsi, l'organisation neurosensorielle des vététistes semble être différente de celle des routiers qui se caractérise par une utilisation préférentielle des informations visuelles. Cette utilisation préférentielle de la vision est associée à l'intensité de pratique du cyclisme sur route. En revanche, une meilleure utilisation des informations somesthésiques a été notée chez les vététistes les plus entraînés dans cette spécialité. Les différentes spécialités du cyclisme entraînent donc des spécificités d'équilibration, c'est-à-dire dans l'utilisation des informations neurosensorielles et dans les mécanismes de régulation posturale selon que l'entraînement est sur route ou en VTT.

VI – Deuxième étude : exercice et déshydratation : un rôle possible de l'oreille interne dans les troubles du contrôle de l'équilibre

*Ce travail a fait l'objet d'une publication internationale parue en 2010 dans **Journal of Electromyography and Kinesiology** 20:1196-202.*

VI.1 – Rappel

Généralement, l'exercice induit une fatigue centrale et périphérique qui diminue les performances motrices à travers des modifications métaboliques, structurales, fonctionnelles et comportementales. Ces altérations des performances motrices varient en fonction du groupe musculaire, du type de contraction musculaire et de l'intensité et la durée de l'exercice [Millet & Lepers, 2004]. Parmi les fonctions motrices, le contrôle postural est lui aussi altéré d'une façon transitoire par un exercice, qu'il soit global ou limité à certains groupes musculaires [Lepers *et al.*, 1997 ; Derave *et al.*, 1998 ; Nardone *et al.*, 1998 ; Gauchard *et al.*, 2002 ; Schieppati *et al.*, 2003 ; Ledin *et al.*, 2004 ; Bove *et al.*, 2007]. La déshydratation et l'hémoconcentration qui sont consécutifs à la sudation permettant la thermorégulation [Mallié *et al.*, 2002] et à l'augmentation de l'eau dans les compartiments musculaires [Nielsen *et al.*, 1986] peuvent contribuer à la fatigue centrale et périphérique. Les modifications de l'homéostasie consécutives à l'exercice pourraient altérer le contrôle postural par une baisse de la qualité de la réponse motrice à travers une limitation de la force, de la puissance et de l'endurance musculaire [Judelson *et al.*, 2007]. Toutefois, les instabilités posturales observées à la suite d'un exercice pourraient aussi être expliquées par des modifications métaboliques, consécutives à la déshydratation, pouvant intervenir à tous les niveaux de la régulation de l'équilibre. Le niveau vestibulaire, qui fournit la seule information dans laquelle des liquides interviennent dans les mécanismes de transduction sensorielle, pourrait être particulièrement perturbé par des modifications de l'homéostasie. Alors que les troubles musculaires sont traditionnellement incriminés dans les perturbations de l'équilibre à la suite d'un exercice prolongé, une modification du volume ou de la composition de l'endolymphe induite par la déshydratation pourrait ainsi être considérée comme un déterminant des troubles posturaux. Toutefois, les effets de la déshydratation sur le contrôle postural à la suite d'un exercice restent controversés avec des études présentant des résultats contradictoires [Derave *et al.*, 1998 ; Gauchard *et al.*, 2002 ; Patel *et al.*, 2007]. Un exercice modéré mais prolongé, effectué juste sous le seuil ventilatoire pour limiter l'acidose musculaire, pourrait limiter la contribution musculaire dans les troubles de l'équilibre et permettrait de mettre en lumière

d'autres facteurs potentiels. Une diminution de la sensibilité ou de l'utilisation d'une afférence sensorielle devrait conduire à une modification de la hiérarchie neurosensorielle [Perrin *et al.*, 2002 ; Lion *et al.*, 2009 ; Herpin *et al.*, 2010]. Cette étude visait à évaluer les effets d'une déshydratation induite par un exercice sur les stratégies sensori-motrices et en particulier l'utilisation de l'afférence vestibulaire.

VI.2 – Matériels et méthodes

VI.2.1 – Participants

Dix hommes, étudiants à la Faculté du Sport de Nancy, qui pratiquaient régulièrement des activités physiques et sportives à un niveau régional de compétition, ont participé à cette étude. Tous les participants étaient indemnes de pathologies du système nerveux central et ne présentaient aucun traumatisme de la tête, du tronc ou des membres inférieurs pouvant altérer la performance posturale. Ce protocole a bénéficié de la promotion du CHU de Nancy et a été accepté par le Comité de Protection des Personnes.

VI.2.2 – Épreuve d'effort

L'effort était produit sur une bicyclette ergométrique à frein électromagnétique. L'enregistrement informatisé de l'électrocardiogramme a été réalisé à l'aide d'un enregistreur multipiste, avec les 12 dérivations standard. La fréquence cardiaque était mesurée en permanence, l'électrocardiogramme étant enregistré au repos, à l'effort et pendant la période de récupération. La pression artérielle était mesurée par méthode sphygmomanométrique et auscultatoire, au repos, toutes les trois minutes, au maximum de l'effort, et pendant la période de récupération. La mesure des échanges gazeux était réalisée à l'aide d'un pneumotachographe, qui permet une analyse cycle par cycle de la consommation d'oxygène (VO_2), de la production de dioxyde de carbone (VCO_2), et du débit ventilatoire (VE) tout au long de l'épreuve. Un spiromètre intégré permet d'analyser la fonction pulmonaire.

Avant chaque épreuve une calibration automatique des analyseurs en O_2 et CO_2 était effectuée. Les participants respiraient par la bouche à travers un masque facial. Le premier temps de l'examen était la mesure des paramètres ventilatoires par spirométrie. Après une période d'échauffement de trois minutes à 20 Watts permettant la stabilisation des paramètres ventilatoires, la montée en charge se faisait par palier de 20 watt/min. Les participants

devaient pédaler à une fréquence de pédalage continue. L'épreuve pouvait être interrompue en fonction des critères définis par la Société Française de Cardiologie [Sellier *et al.*, 1997], mais également lorsque la VO_2 maximale (VO_{2Max}) pouvait être considérée comme atteinte : la VO_2 restant en plateau malgré l'augmentation de la charge ou le quotient respiratoire étant supérieur ou égal à 1,1 ou la fréquence cardiaque ayant atteint la valeur maximale théorique ($220 - l'âge$) [Astrand *et al.*, 1994].

L'épreuve d'effort et la mesure des échanges gazeux ont permis de relever les valeurs tests suivantes : fréquence cardiaque (battements.min⁻¹) (F_c), consommation d'oxygène (ml.min.kg⁻¹) (VO_2), et puissance développée (W). Pour la détermination du seuil ventilatoire tel qu'il a été défini par Wasserman *et al.* [1973], la méthode graphique de Beaver *et al.* [1986], appelée également méthode du « V-slope », a été utilisée. Selon cette méthode, le seuil ventilatoire est le point de rupture de la pente de la fonction exprimant la production de CO_2 (VCO_2) en fonction de la consommation d' O_2 (VO_2). Cette détermination est automatique par l'appareil de mesure des échanges gazeux et est corrigée si nécessaire visuellement par l'examineur. Le seuil est défini en fonction de la VO_2 correspondante (VO_{2SV}) ; il lui correspond une fréquence cardiaque appelée Fréquence seuil (F_{cSV}) et il survient à une puissance appelée Puissance seuil (W_{SV}). De plus, la consommation maximale d'oxygène était recueillie ainsi que la fréquence cardiaque maximale (F_{cMax}) et la puissance maximale (W_{Max}) qui y sont associées. Enfin, le pourcentage de la VO_{2SV} a également été calculé par rapport à la VO_{2Max} mesurée.

VI.2.3 – Exercice

Afin d'obtenir une déshydratation induite par exercice de type aérobie, un exercice de 45 minutes a été réalisé sur une bicyclette ergométrique à frein électromagnétique à une intensité légèrement inférieure au seuil ventilatoire, à une fréquence cardiaque d'exercice personnalisée ($F_{cexercice}$) déterminée par F_{cVS} moins 10 battements/min. Pendant l'exercice, l'absorption d'eau n'était pas permise. La puissance développée durant l'exercice ($W_{exercice}$) était individuellement ajustée pour conserver la $F_{cexercice}$ constante avec une fréquence de pédalage d'environ 80 rotations par minute.

VI.2.4 – Mesures biologiques

La diurèse, la perte de masse corporelle et l'hémoconcentration ont été utilisées comme marqueurs de la déshydratation. La diurèse, qui est le volume total des urines émises, a été calculée comme le volume des urines collectées après l'exercice divisé par le temps entre les deux mictions (c'est-à-dire avant et après l'exercice). Afin d'évaluer le degré de déshydratation, des échantillons sanguins (12 ml) ont été recueillis avant l'exercice et immédiatement après la première posturographie suivant l'exercice. Les concentrations de sodium (P_{Na^+}) et de protéines ($P_{protéines}$) dans le plasma, qui sont liées à l'hémoconcentration [Guyton & Hall, 2006], ont été déterminées.

VI.2.5 – Evaluation posturographique

Une cabine de posturographie dynamisée de type EquiTest[®] (Neurocom, Clackamas, OR) permettant de faire le Test d'Organisation Sensorielle a été utilisée pour réaliser les évaluations posturographiques présentées précédemment (§V.2.3. Evaluation posturographique, pp. 34-37). La procédure du TOS dure théoriquement 10 min en incluant le temps nécessaire pour rappeler les consignes avant chaque condition. Toutefois, comme le contrôle postural se normaliserait entre 6 et 15 min après l'arrêt d'un exercice [Bove *et al.*, 2007 ; Nardone *et al.*, 1998], le nombre d'essais par condition a été réduit à un au lieu de trois afin d'éviter d'avoir l'effet de la récupération sur les mesures post-exercice. Ainsi, le score d'équilibre global a été calculé en additionnant chaque score d'équilibre des conditions 1 et 2 et trois fois chaque score d'équilibre des conditions 3 à 6. Cette somme est ensuite divisée par 14.

VI.2.6 – Procédure

L'exercice a été réalisé dans le laboratoire « Equilibration et Performance Motrice », au Centre Hospitalier Universitaire de Nancy, dans des locaux habilités pour l'expérimentation (Autorisation de Lieu de Recherche), placés sous la direction du Professeur Philippe Perrin. Il était conseillé aux participants de prendre un léger petit-déjeuner, composé de deux tranches de pain avec du beurre et d'un verre d'eau (c'est-à-dire sans thé, ni café), deux heures avant leur arrivée au laboratoire. Ce type de petit-déjeuner ne modifie pas la fonction rénale [Mallié *et al.*, 2002]. Tous les exercices ont été faits le matin entre 9 heures et 12 heures, dans une

salle équipée et où la température était comprise entre 22 et 24°C et l'hygrométrie entre 48 et 50%.

Un test d'organisation sensorielle (TOS) a été réalisé avant l'exercice (pré-exercice) comme évaluation contrôle de l'équilibre. Avant la prise de poids précédant l'exercice, un recueil des urines était effectué, ainsi qu'un premier échantillon sanguin. Ensuite, l'exercice de 45 min était réalisé sur bicyclette ergométrique avec une intensité juste en dessous du seuil ventilatoire. Les mesures réalisées juste après l'exercice (post-exercice 1, PE₁) étaient l'enregistrement du poids, un test d'organisation sensorielle immédiatement suivi de prélèvements sanguin et urinaire. La plate-forme de posturographie dynamique (EquiTest®) était placée à moins de cinq mètres de la bicyclette ergométrique et le temps entre la fin de l'exercice et le début du TOS PE₁ était de moins d'une minute, incluant le temps requis pour l'enregistrement du poids. Enfin, une seconde mesure post-exercice (PE₂) du TOS était effectuée après une période de 20 min qui comprenait à la fois les premières mesures post-exercice (PE₁) et une phase de repos (Tableau X). L'absorption d'eau n'était pas autorisée durant les 45 min de l'exercice et les 20 min de repos suivant l'exercice.

Des indices de variation ($V_i = \text{valeurs en PE}_1 / \text{valeurs en pré-exercice}$) ont été calculés pour les données métaboliques et posturographiques. Pour les données métaboliques, l'augmentation de l'hémoconcentration était indiquée par des indices de variation élevés. En revanche, pour les données posturographiques, la dégradation du contrôle postural était indiquée par des indices de variation faibles.

VI.2.7 – Analyse statistique

Les résultats ont été exprimés par la moyenne et l'écart type (σ). La normalité de la distribution des données a été vérifiée d'une part via une méthode graphique et d'autre part via le test de Shapiro-Wilk. L'hétérogénéité globale des résultats a été ensuite évaluée par des tests ANOVA à mesures répétées. Lorsque les résultats de l'ANOVA à mesures répétées étaient significatifs, les comparaisons deux à deux étaient réalisées par un test t de Student pour échantillons appariés. Les différences ont été considérées comme significatives au seuil de $p \leq 0,05$ et à tendance significative au seuil de $p \leq 0,10$. Selon les trois comparaisons possibles, la correction de Bonferroni-Dunn a été appliquée aux comparaisons deux à deux. Les différences ont été alors considérées comme significatives au seuil de $p \leq 0,017$ et à tendance significative au seuil de $p \leq 0,033$. Enfin, le test de corrélation Bravais-Pearson a été utilisé pour vérifier les relations possibles entre les différents indices de variation calculés.

Tableau X – Cadre expérimental et périodes de mesures.

Session	Lieu	Chronologie	Mesures et recueil des données biologiques
Session 1	Service de Cardiologie	Epreuve d'effort	Consommation d'oxygène Fréquence cardiaque Puissance développée
Session 2	Laboratoire d'évaluation du contrôle postural	Pré-exercice	Test d'Organisation Sensorielle Urine Poids Echantillon sanguin
		Exercice	Fréquence cardiaque Puissance développée
		Post-exercice 1 (PE ₁)	Poids Test d'Organisation Sensorielle Urine Echantillon sanguin
		Repos	Aucune
		Post-exercice 2 (PE ₂)	Test d'Organisation Sensorielle

VI.3 – Résultats

Les données anthropométriques (âge, taille, poids, indice de masse corporelle (IMC), VO_{2Max} , FC_{Max} , W_{Max} , VO_{2SV} , FC_{SV} , W_{SV} , $FC_{exercice}$ et $W_{exercice}$) sont présentées dans le Tableau XI. La VO_{2Max} correspondait à 147,5% ($\pm 20,2\%$) des valeurs prédites [Wasserman *et al.*, 1987]. L'exercice a été réalisé à environ 60% de la VO_{2Max} de chaque participant.

En PE₁, cette étude a montré une augmentation significative de la protéinémie (pré-exercice : 75,60 ($\pm 4,22$) g.l⁻¹ ; PE₁ : 79,10 ($\pm 5,50$) g.l⁻¹ ; $t = -5,35$; $p < 0,001$) ($4,57 \pm 2,57\%$) et une diminution significative de la masse corporelle (pré-exercice : 76,18 ($\pm 9,19$) kg ; PE₁ : 75,30 ($\pm 9,14$) kg ; $t = -17,18$; $p < 0,001$) ($-1,16 \pm 0,21\%$), indiquant une déshydratation modérée qui est caractérisée par une faible diurèse ($0,45 \pm 0,22$ ml.min⁻¹). Par ailleurs, aucune variation de la natrémie n'a été observée (pré-exercice : 139,90 ($\pm 1,01$) mmol.l⁻¹ ; PE₁ : 140,00 ($\pm 1,15$) mmol.l⁻¹ ; $t = -0,26$; non significatif) (Figure 13).

Concernant les données posturographiques, une hétérogénéité significative a été observée pour C^{SE} ($F = 7,14$; $p = 0,005$), et pour les paramètres $C1^{SE}$ ($F = 5,23$; $p = 0,002$), $C5^{SE}$ ($F = 6,89$; $p = 0,006$) et $C6^{SE}$ ($F = 4,02$; $p = 0,036$). La diminution significative de C^{SE} ($t = 4,55$;

$p = 0,001$), observée en PE_1 , résultait principalement de la diminution significative des performances en $C5^{SE}$ ($t = 3,86$; $p = 0,004$), mais également de la diminution des performances en $C1^{SE}$ ($t = 2,75$; $p = 0,022$) et en $C6^{SE}$ ($t = 2,61$; $p = 0,028$). De plus, les performances posturales se sont normalisées en $C1^{SE}$ ($t = -3,28$; $p = 0,009$) et en $C5^{SE}$ ($t = -2,95$, $p = 0,016$) en PE_2 (Figure 14A). Pour les ratios, les résultats indiquaient une hétérogénéité qui était significative pour le R^{VEST} ($F = 4,64$; $p = 0,023$) et proche de la significativité pour le R^{PMAN} ($F = 2,97$, $p = 0,076$). Le R^{VEST} diminuait significativement en PE_1 ($t = 3,18$; $p = 0,011$). En revanche, aucune différence n'a pu être observée entre les résultats enregistrés en pré-exercice et ceux observés en PE_2 (Figure 14B).

Finalement, l'augmentation de la protéinémie induite par la déshydratation était corrélée avec l'importance de l'altération des performances posturales en particulier lorsque l'information vestibulaire était la seule afférence non perturbée (Tableau XII).

Tableau XI – Caractéristiques des participants exprimés par la moyenne et l'écart type (σ).

	Moyenne ($\pm \sigma$)
Age (ans)	23,02 ($\pm 2,45$)
Taille (cm)	178,70 ($\pm 9,03$)
Poids (kg)	76,18 ($\pm 9,19$)
IMC (kg.m^{-2})	23,81 ($\pm 1,89$)
VO_{2Max} ($\text{ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$)	51,76 ($\pm 9,93$)
FC_{Max} (battements.min ⁻¹)	179,30 ($\pm 15,96$)
W_{Max} (W)	274,80 ($\pm 27,54$)
VO_{2SV} ($\text{ml.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$)	32,64 ($\pm 9,40$)
VO_{SV} (% VO_{2Max})	62,50 ($\pm 8,25$)
FC_{SV} (battements.min ⁻¹)	145,30 ($\pm 26,48$)
W_{SV} (W)	173,10 ($\pm 26,64$)
$FC_{exercice}$ (battements.min ⁻¹)	135,30 ($\pm 26,48$)
$W_{exercice}$ (W)	166,70 ($\pm 14,94$)

IMC, indice de masse corporelle ; VO_{2Max} , consommation maximale d'oxygène ; FC_{Max} , fréquence cardiaque maximale ; W_{Max} , puissance maximale ; VO_{2SV} , consommation d'oxygène au seuil ventilatoire ; FC_{SV} , fréquence cardiaque au seuil ventilatoire ; W_{SV} , puissance développée au seuil ventilatoire ; $FC_{exercice}$, fréquence cardiaque utilisée pendant l'exercice ; $W_{exercice}$, puissance développée pendant l'exercice.

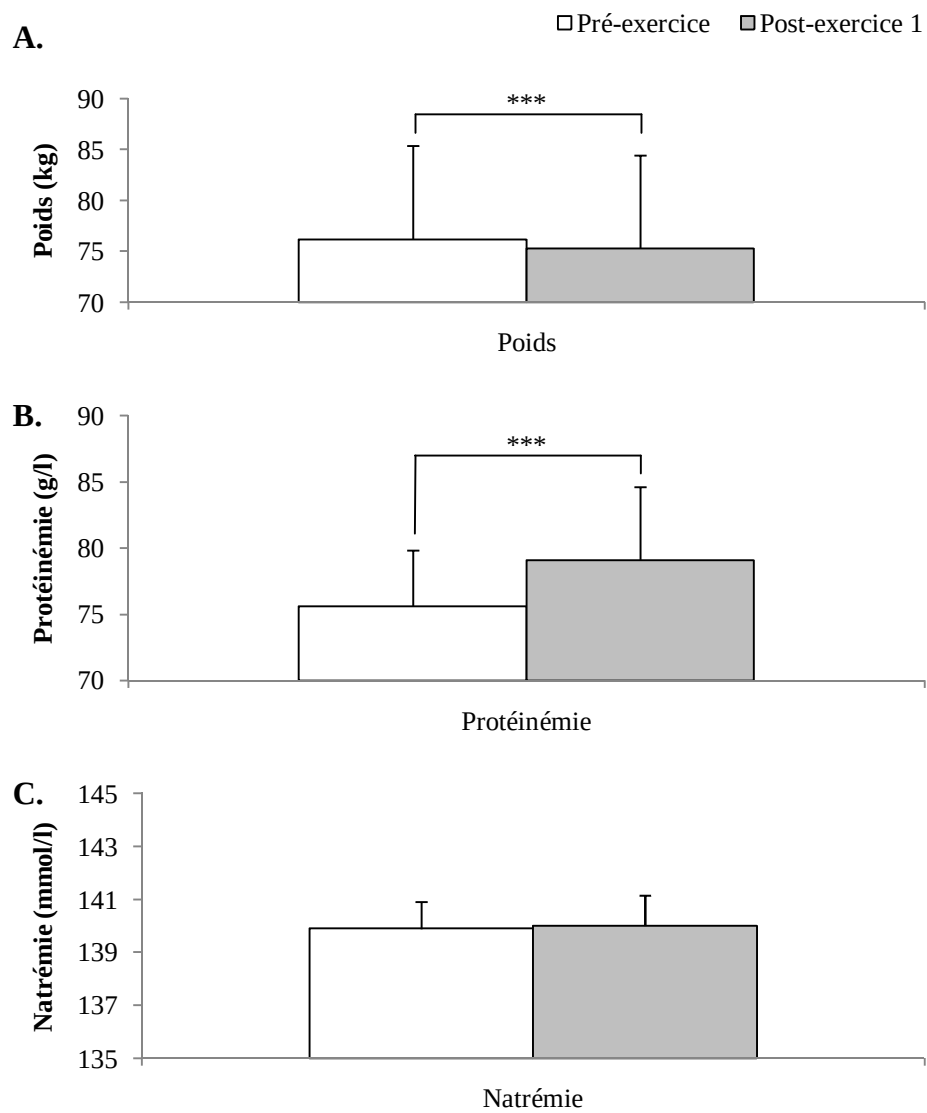


Figure 13 - Valeurs exprimées en moyenne (m) et écart-type (σ) pour le poids (partie A), la protéinémie (partie B) et la natrémie (partie C) observés en pré-exercice (barres blanches) et en post-exercice 1 (barres gris clair). Significativités statistiques utilisées : *** : $p \leq 0,001$

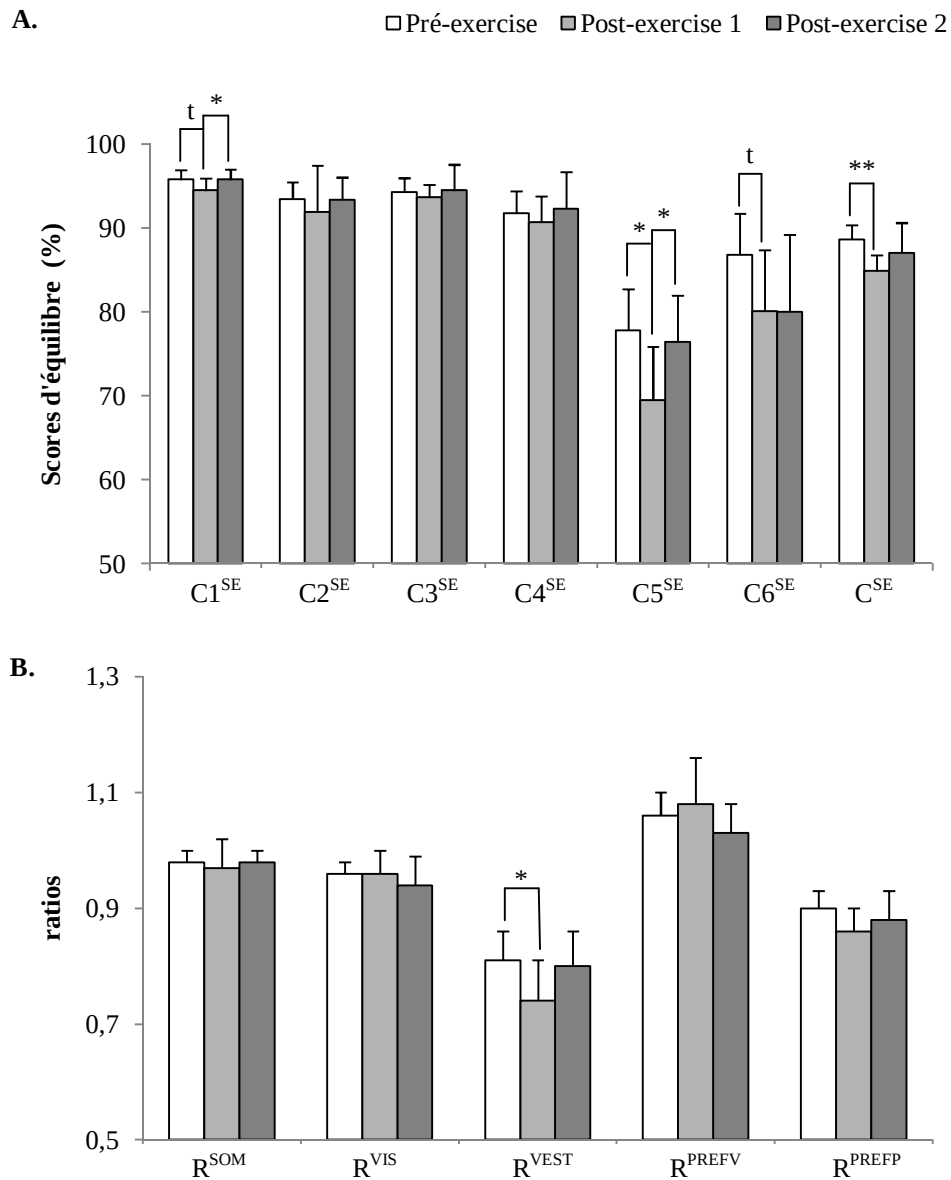


Figure 14 – Test d’organisation sensorielle : valeurs exprimées en moyenne (m) et écart-type (σ) pour les scores d’équilibre des six conditions (C1^{SE}, C2^{SE}, C3^{SE}, C4^{SE}, C5^{SE}, C6^{SE}), pour le score d’équilibre composite (C^{SE}) (partie A) et pour les différents ratios (R^{SOM}, R^{VIS}, R^{VEST}, R^{PREFV}, R^{PREFP}) (partie B) observés en pré-exercice (barres blanches), en post-exercice 1 (barres gris clair) et en post-exercice 2 (barres gris foncé). Significativités statistiques utilisées : t : $p \leq 0,033$; * : $p \leq 0,017$; ** : $p \leq 0,003$ (selon la correction de Bonferroni-Dunn).

Tableau XII - Test de corrélation de Bravais-Pearson entre les indices de variations de la protéinémie ($P_{\text{protéines}}$), des scores d'équilibre et des ratios (R^{SOM} , R^{VIS} , R^{VEST} , R^{PREFV} , R^{PREFP}) du Test d'Organisation Sensorielle. NS : non significatif.

	Test de corrélation de Bravais-Pearson
	valeur de r ; p
	$V_i P_{\text{protéines}}$
$V_i C1^{\text{SE}}$	$r = 0,29$; NS
$V_i C2^{\text{SE}}$	$r = 0,19$; NS
$V_i C3^{\text{SE}}$	$r = 0,41$; NS
$V_i C4^{\text{SE}}$	$r = -0,39$; NS
$V_i C^{\text{SE}}$	$r = -0,62$; $p = 0,057$
$V_i C6^{\text{SE}}$	$r = -0,01$; NS
$V_i C^{\text{SE}}$	$r = -0,38$; NS
$V_i R^{\text{SOM}}$	$r = -0,12$; NS
$V_i R^{\text{VIS}}$	$r = -0,44$; NS
$V_i R^{\text{VEST}}$	$r = -0,64$; $p = 0,045$
$V_i R^{\text{PREFV}}$	$r = 0,36$; NS
$V_i R^{\text{PREFP}}$	$r = -0,47$; NS

VI.4 – Discussion

Cette étude a montré qu'un exercice, effectué pendant 45 min sur une bicyclette ergométrique à une intensité juste en dessous du seuil ventilatoire et sans absorption d'eau, induisait une légère déshydratation qui était caractérisée par une perte de masse corporelle et par une augmentation de la protéinémie. De plus, une diminution du score d'équilibre global a été observée à la suite de l'exercice. Cette diminution résultait principalement de la diminution des performances posturales en $C5^{\text{SE}}$ mais également de la diminution en $C1^{\text{SE}}$ et en $C6^{\text{SE}}$. La diminution du R^{VEST} , indiquant une plus faible utilisation des informations vestibulaires, était corrélée avec le niveau de déshydratation (c'est-à-dire la protéinémie). Enfin, $C1^{\text{SE}}$ et $C5^{\text{SE}}$ se normalisaient en PE_2 .

VI.4.1 – Exercice, déshydratation et effecteur

Un effet d'apprentissage peut se produire à la suite des répétitions des évaluations posturographiques [Wrisley *et al.*, 2007 ; Leitner *et al.*, 2009]. La diminution des performances posturales suggère donc qu'il existe un effet de la fatigue en PE_1 . Le pédalage

est connu pour ne pas endommager les muscles [Millet & Lepers, 2004] et un exercice réalisé sous le seuil ventilatoire induit seulement une légère acidose musculaire. La fatigue musculaire pourrait expliquer partiellement les troubles de la posture en PE₁. La fatigue musculaire altère la performance motrice par une diminution de la puissance résultant d'un déclin à la fois de force et de vitesse [Allen *et al.*, 2008]. En PE₁, la réponse motrice permettant la stabilisation de la posture peut aussi être altérée par des altérations à d'autres niveaux de la régulation posturale, c'est-à-dire l'afférence sensorielle et l'intégration centrale des informations sensorielles. Alors que l'ingestion d'eau semble limiter les troubles neuromusculaires liés à la fatigue [Vallier *et al.*, 2005], la déshydratation pourrait faiblement altérer la fonction musculaire à travers des changements métaboliques et ioniques [Montain *et al.*, 1998] conduisant à une diminution des performances posturales en PE₁.

VI.4.2 – Exercice, déshydratation et intégration centrale de l'information

Dans cette étude, la perte modérée de masse corporelle (environ 1%) et l'intensité de l'exercice (environ 60% de la VO_{2Max}) semblent insuffisantes pour induire une perturbation significative de l'hémodynamique et donc de l'oxygénation cérébrale [Ide *et al.*, 1999 ; Fan *et al.*, 2008]. De plus, la déshydratation modérée, sans modification significative de la perception de soif, et l'exercice, ont de faibles conséquences sur les performances cognitives ou psychomotrices [Adam *et al.*, 2008]. Ainsi, les perturbations des performances posturales en PE₁ ne devraient pas être liées à une diminution de l'efficacité des processus centraux d'intégration des informations.

Pour chaque type d'exercice, il y a une adaptation, au niveau de l'intégration centrale, au modèle spécifique de stimulation proprioceptive, vestibulaire et visuelle. Si cette adaptation persiste pendant la période de repos après un exercice, une utilisation inappropriée des informations sensorielles peut se produire pouvant expliquer les troubles posturaux observés en post-exercice [Lepers *et al.*, 1997]. Comme il est suspecté dans le « mal du débarquement » [Moeller & Lempert, 2007], décrit essentiellement après une traversée à bord d'un bateau, ou dans quelques sports comme le lancer de disque [Perrin *et al.*, 2000] ou le patinage artistique [Tanguy *et al.*, 2008a], les stimulations sensorielles inhabituelles pourraient être enregistrées et utilisées temporairement par la mémoire comme une nouvelle référence sensorielle. De plus, les mouvements de la tête durant l'exercice pourraient également contribuer aux troubles posturaux observés après l'exercice. Néanmoins, le court temps de stimulation (45 min), chez des participants étant étudiants à la Faculté du Sport

(c'est-à-dire avec une expérience des stimulations inhabituelles ou des situations de conflit sensoriel), et les faibles mouvements de la tête produits sur une bicyclette ergométrique ne peuvent donc pas expliquer entièrement les troubles posturaux en PE₁.

VI.4.3 – Exercice, déshydratation et capteurs sensoriels

Une diminution de la sensibilité des capteurs sensoriels peut apparaître à la suite d'un exercice et d'une déshydratation. La fatigue pourrait modifier la précision des informations proprioceptives résultant d'une diminution de la sensibilité des fuseaux neuromusculaires dont les conséquences pourraient être des changements dans la régulation posturale [Gauchard *et al.*, 2002 ; Regueme *et al.*, 2007]. Tandis qu'une diminution de la sensibilité des récepteurs somesthésiques est possible dans le présent paradigme, une diminution de la sensibilité des récepteurs visuels semble être peu probable en raison de l'absence de données montrant une utilisation inappropriée des informations visuelles (pas de changement significatif du R^{VIS}). En outre, les performances posturales diminuaient en PE₁ particulièrement lorsque l'information vestibulaire était la seule afférence fiable (c'est-à-dire en C5^{SE}). Aussi, le ratio R^{VEST} , indiquant l'utilisation des informations vestibulaires, diminuait en PE₁ et son indice de variation était corrélé avec l'indice de variation de la protéinémie de sorte que plus la déshydratation était importante, plus l'utilisation des informations vestibulaires était faible. Une diminution de la sensibilité des récepteurs, induite par la déshydratation, pourrait expliquer la faible utilisation de l'afférence vestibulaire après un exercice. Bien qu'elle ne soit pas appréciée directement dans cette étude, une modification de l'homéostasie des liquides de l'oreille interne pourrait expliquer la dégradation de la performance posturale lorsque l'afférence vestibulaire était la seule information sensorielle fiable (faibles valeurs en C5^{SE} et faibles R^{VEST}). Les structures sensorielles de l'oreille interne sont soumises, comme toutes les structures mécano-sensibles immergées dans un liquide, à la pression intralabyrinthique qui s'exerce sur elles. Cette pression est elle-même influencée par les mécanismes qui régulent le volume et la composition électrochimique des compartiments liquidiens environnant l'oreille interne. Une déshydratation peut donc influencer la pression intralabyrinthique et modifier le poids de cette entrée sensorielle dans l'équilibration. Une modification de la composition, du volume ou de la pression du liquide endolymphatique peut générer une hypoacousie et/ou des vertiges [Salt, 2001 ; Couloigner *et al.*, 2004]. Dans la maladie de Menière, les épisodes de vertiges, l'hypoacousie et les acouphènes, qui résultent de l'augmentation de volume de l'endolymphe cochléo-vestibulaire (hydrops endolymphatique), sont diminués par une

déshydratation vestibulaire (induite par exemple par l'administration de glycérol ou de furosémide) qui baisse le volume endolymphatique et la pression intralabyrinthique [Stahle, 1984 ; Salt, 2001 ; Couloigner *et al.*, 2004].

VI.4.4 – Exercice, déshydratation et récupération

Les troubles posturaux se normalisaient après le repos, indiquant que l'exercice et la déshydratation induisaient des troubles de l'équilibre de courte durée. Bove *et al.* [2007] ont montré que l'amélioration des performances posturales commençait 6 min après la fin de l'exercice et était liée à la diminution de la consommation d'oxygène. De plus, Nardone *et al.* [1998] ont rapporté que la performance posturale se normalisait 15 min après la fin de la performance musculaire. La durée des perturbations posturales après un exercice est influencée par les caractéristiques de l'exercice. Durant un exercice prolongé, il y a une déshydratation et une hémococoncentration avec une augmentation de la protéinémie secondaire à la sudation thermorégulatrice [Mallié *et al.*, 2002] mais également à une augmentation de l'eau intramusculaire [Nielsen *et al.*, 1986]. La libération, pendant le repos, de l'eau accumulée dans les muscles pendant l'exercice pourrait donc participer à la restauration de l'homéostasie des fluides corporels, qui interviendrait également dans l'oreille interne, et améliorerait par conséquent la stabilité posturale.

Malgré le faible échantillon, certains effets ont pu être montrés. Alors qu'il n'était pas possible d'étudier les liquides de l'oreille interne dans cette étude, les stratégies posturales indiquent un possible rôle de l'appareil vestibulaire (scores moindres à C5 et au R^{VEST}) dans les troubles de l'équilibre observés après un exercice, prolongé et modéré, avec une légère déshydratation.

VI.4.5 – Conclusion

Les troubles temporaires du contrôle postural observés après un exercice modéré peuvent résulter, mise à part la fatigue musculaire, d'une diminution de la sensibilité de l'afférence vestibulaire. Cette dernière est elle-même sensible aux modifications du contenu des compartiments liquidiens pouvant être induits par la déshydratation. L'évaluation des conséquences de l'exercice et de la déshydratation sur le contrôle moteur pourrait être particulièrement utile dans les domaines des activités physiques et sportives, du travail et de la rééducation.

VII – Troisième étude : vertiges induits par la pratique du vélo tout terrain descente

*Ce travail a fait l'objet d'une communication orale (XXVI Bárány Society Meeting, Reykjavik, Islande) dont le résumé a été publié en 2010 dans **Journal of Vestibular Research** 20:211-212 et manuscrit soumis pour publication à une revue internationale.*

VII.1 – Rappel

L'Union Cycliste Internationale (UCI) exige que tous ses membres portent un casque rigide [Union Cycliste Internationale, 2010b]. De plus, l'UCI recommande, particulièrement en VTT descente, le port de protections du dos, de la nuque, des coudes, des genoux et des épaules [Union Cycliste Internationale, 2010c]. Toutefois, des blessures sont néanmoins observées à la fois en cyclisme sur route et en VTT [Jeys *et al.*, 2001 ; Mellion, 1991 ; Kronisch & Pfeiffer, 2002 ; Patel, 2004 ; Himmelreich *et al.*, 2007 ; Carmont, 2008 ; Kennedy, 2008]. De plus, le VTT descente, qui requiert d'importantes habiletés techniques pour négocier les successions de sections abruptes et cahoteuses, est caractérisé par un risque de blessure plus élevé qu'en VTT cross-country, qui requiert de plus faibles habiletés techniques mais des capacités physiques plus importantes pour négocier les montées et les descentes sur les chemins et les sentiers forestiers [Himmelreich *et al.*, 2007]. Les blessures (traumatismes crâniens ou dorsaux par exemple) sont généralement la conséquence de chutes [Kennedy, 2008]. Vibert *et al.* [2007] ont décrit quatre cas de patients ayant développé un vertige positionnel paroxystique bénin (VPPB) plusieurs heures après une pratique intensive de VTT sans traumatisme crânien. Les impacts vibratoires et les sauts ont été proposés comme facteurs étiologiques d'un VPPB, des déplacements et/ou des dislocations des otoconies utriculaires stimulant alors d'une façon erronée les accéléromètres angulaires de la tête durant ses mouvements (hypothèses de cupulolithiase [Schuknecht, 1969] ou de canalolithiase [Parnes & McClure, 1992] de l'oreille interne). Comme les vibrations et les sauts sont plus importants en VTT descente qu'en VTT cross-country, les symptômes vertigineux devraient être plus souvent observés chez les descendeurs que chez les routiers qui ne subissent pas ou peu de vibrations et de sauts dans leur pratique. Jusqu'à présent, aucune étude n'a évalué la fréquence de la survenue de vertiges et les relations entre ces deux types de pratique cycliste. Cette étude visait donc à évaluer la prévalence des vertiges après les compétitions ou les entraînements (descente ou cyclisme sur route), à identifier leurs possibles déterminants et à étudier leurs conséquences dans les activités de la vie quotidienne.

VII.2 – Matériels et méthodes

VII.2.1 – Participants

Cent onze descendeurs (102 hommes, 9 femmes ; âgés entre 16 et 41 ans) et 80 routiers (79 hommes, 1 femme ; âgés entre 17 et 51 ans) ont participé à cette étude. Les participants ont répondu à un questionnaire visant à apprécier la survenue de vertiges après les compétitions ou les entraînements, à identifier leurs déterminants et à étudier leurs conséquences dans la vie de tous les jours. Les sujets des deux groupes étaient de niveau international (Champions du Monde, Champions d'Europe), national (Champions Nationaux) et régional (Champions Régionaux). Les questionnaires furent distribués sur les lieux des compétitions : à Remiremont (Championnat de Lorraine de VTT descente 2009) et à La Bresse (2^{ème} manche de la Coupe de Monde de VTT descente 2009) pour le VTT descente, à Nancy (1^{ère} étape du Critérium du Dauphiné Libéré 2009), à La Bresse (3^{ème} étape du Tour de Lorraine 2009), à Remiremont (compétition de niveau Elite), à Saint-Amé, à Saint-Nabord, et à Saint-Etienne-lès-Remiremont (compétitions de niveau Régional) pour le cyclisme sur route.

VII.2.2 – Questionnaire

Les participants de cette étude ont donné leur consentement et toutes les données, dont l'âge et le sexe, étaient anonymes. Le questionnaire définissait le terme de « vertiges » comme une illusion de mouvements et décrivait différents types de symptômes : tanguer comme sur un bateau, tourner comme sur un carrousel, en marchant avoir le sentiment de marcher sur un matelas d'eau, en marchant avoir le sentiment de tomber dans un trou, avoir l'impression de tomber au fond du matelas en se couchant, avoir une sensation de lévitation au-dessus du lit. Les participants devaient estimer leur temps de pratique annuel de VTT et de cyclisme sur route. Le questionnaire interrogeait sur la survenue de vertiges après les compétitions ou les entraînements mais également durant les activités de tous les jours. Les participants devaient décrire les événements spécifiques de leur spécialité cycliste pouvant éventuellement être à l'origine des vertiges. Les chutes, l'épuisement, les brusques accélérations-décélérations, c'est-à-dire les expositions répétées aux vibrations intenses (par exemple : descentes des parcours très rocaillieux, bosselés, accidentés), les accélérations-décélérations linéaires (descentes très rapides), les accélérations-décélérations angulaires (enchaînements de plusieurs virages) et les sauts.

VII.2.3 – Analyse statistique

Les données qualitatives ont été exprimées par le nombre (n) et le pourcentage (%) et comparées par le test du χ^2 ou le test exact de Fisher selon les conditions d'application des tests. Les données quantitatives ont été exprimées par la moyenne et l'écart type (σ) et comparées par le test t de Student. La survenue de vertiges durant la vie de tous les jours a été comparée, à l'aide de tests du χ^2 , à la plus haute prévalence de vertiges (30%) décrite dans la littérature (étendue de la prévalence de vertiges chez l'adulte : 20 à 30% [Karatas, 2008; Kroenke & Price, 1993; Neuhauser *et al.*, 2008; Patrick & Peach, 1989; Yardley *et al.*, 1998]). Les différences ont été considérées comme significatives au seuil de $p \leq 0,05$.

VII.3 – Résultats

Le tableau XIII montre que les descendeurs étaient plus jeunes que les routiers (Descendeurs : 22,0 ans $\pm$ 5,4 ; Routiers : 28,6 ans $\pm$ 9,1 ; $t = 6,32$; $p < 0,001$). Les descendeurs pratiquaient principalement le VTT descente (Descendeurs : 315 heures $\pm$ 284 ; Routiers : 10 heures $\pm$ 28 ; $t = -9,57$; $p < 0,001$) alors que les routiers pratiquaient principalement le cyclisme sur route (Descendeurs : 49 heures $\pm$ 99 ; Routiers : 408 heures $\pm$ 216 ; $t = 15,41$; $p < 0,001$). Les descendeurs déclaraient avoir plus de vertiges après les compétitions ou les entraînements que les routiers (Descendeurs : 43,2% ($n = 48$) ; Routiers : 25,0% ($n = 20$) ; $\chi^2 = 6,03$; $p = 0,014$) (Figure 15).

Tableau XIII – Moyenne écart type (σ) de l'âge et des caractéristiques d'entraînement du groupe des descendeurs et du groupe des routiers.

	Descendeurs ($n = 111$) Moyenne ($\pm \sigma$)	Routiers ($n = 80$) Moyenne ($\pm \sigma$)	Test t de Student Descendeurs vs. Routiers Valeur de t ; p
Age (ans)	22,0 (5,4)	28,6 (9,1)	$t = 6,32$; $p < 0,001$
Entraînement de VTT (heures/an)	315 (284)	10 (28)	$t = -9,57$; $p < 0,001$
Entraînement de route (heures/an)	49 (99)	408 (216)	$t = 15,41$; $p < 0,001$

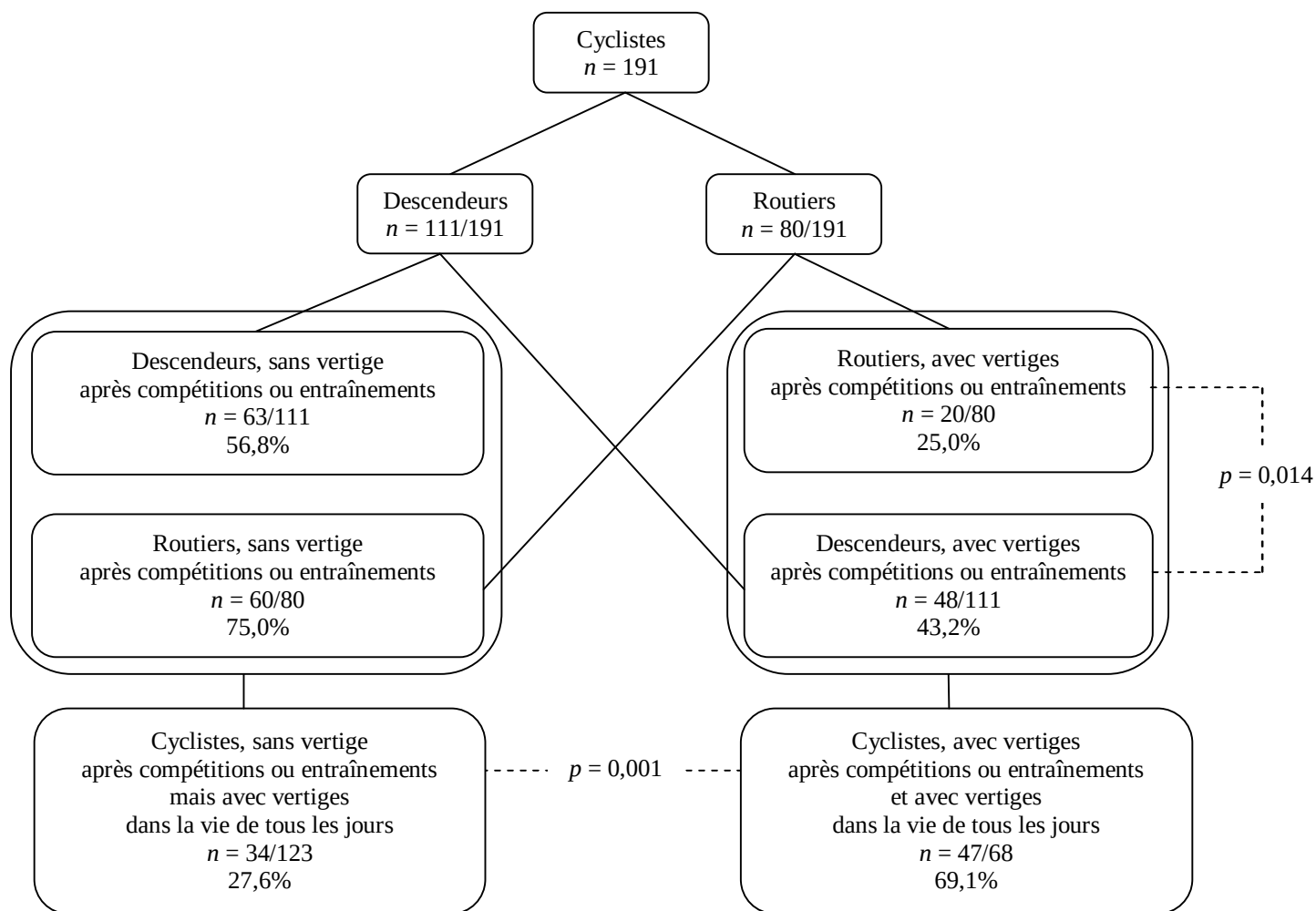


Figure 15 – Organigramme de l’étude. Prévalence des vertiges après compétitions ou entraînements et dans la vie de tous les jours chez les descendeurs et les routiers.

Parmi les cyclistes déclarant présenter des vertiges après les compétitions et les entraînements (48 descendeurs et 20 routiers), l’épuisement a été rapporté comme déterminant de la survenue de vertiges par 90,0% ($n = 18$) des routiers et par 29,2% ($n = 14$) des descendeurs (test exact de Fisher ; $p = 0,001$). Les chutes étaient rapportées comme déterminant de la survenue de vertiges par 15,0% ($n = 3$) des routiers et par 72,9% ($n = 35$) des vététistes (test exact de Fisher ; $p = 0,001$). Les brusques accélérations-décélérations étaient rapportées par 27,1% ($n = 13$) des descendeurs.

La prévalence de vertiges durant les activités de tous les jours était significativement plus élevée chez les descendeurs ($n = 52/111$; 46,9%) que la plus haute prévalence (30%) rapportée dans la littérature ($\chi^2 = 15,00$; $p < 0,001$). En revanche, ce n’est pas le cas chez les routiers ($n = 29/80$; 36,2%) ($\chi^2 = 1,40$; non significatif). De plus, 69,1% ($n = 47$) des cyclistes avec vertiges et 27,6% ($n = 34$) des cyclistes sans vertiges après la pratique de leur sport déclaraient avoir des vertiges durant les activités de la vie quotidienne ($\chi^2 = 10,82$; $p = 0,001$) (Figure 15).

VII.4 – Discussion

Cette étude a montré que les vertiges survenaient couramment après la pratique du cyclisme et, en particulier, en VTT descente. L'épuisement a été rapporté comme un déterminant important des vertiges en cyclisme sur route alors que les accélérations-décélérations brusques et les chutes ont été rapportées comme déterminants des vertiges en VTT descente. La prévalence des vertiges durant la vie de tous les jours était liée à la survenue des vertiges après les compétitions ou les entraînements et était particulièrement élevée chez les descendeurs.

La prévalence élevée des vertiges chez les descendeurs peut être expliquée par les conditions de la pratique cycliste. Les vibrations, les accélérations-décélérations, les sauts et les chutes sont plus fréquents chez les vététistes que chez les routiers. Néanmoins, deux mécanismes physiopathologiques peuvent expliquer les raisons des vertiges selon les spécialités cyclistes.

VII.4.1 – Mécanismes physiopathologiques des vertiges en cyclisme sur route

Les vertiges après les compétitions ou les entraînements rapportés par les routiers semblent être liés à l'intensité de l'effort physique. Une déshydratation est souvent observée dans ce type d'activité sportive. Cette déshydratation est connue pour générer d'importants changements de l'homéostasie. En cas de déshydratation, les modifications de volume et de compositions de l'endolymphe pourraient altérer l'afférence vestibulaire [Gauchard *et al.*, 2002 ; Lion *et al.*, 2010 ; Salt, 2001]. Un tel mécanisme pourrait être à l'origine des vertiges rapportés par les routiers. De même, il est possible que ces vertiges soient en lien avec des modifications de la perfusion cérébrale [Fan *et al.*, 2008 ; Ide *et al.*, 1999].

VII.4.2 – Mécanismes physiopathologiques des vertiges en VTT descente

La durée des descentes est très courte, souvent moins de 5 min. Aussi, l'épuisement et la déshydratation ne semblent pas être l'origine principale des vertiges à la suite de la pratique du VTT descente. De plus, les vertiges ne surviennent pas seulement à la suite des chutes, qui sont les décélérations linéaires les plus importantes et qui peuvent être la conséquence d'un saut mal réalisé. En effet, les brusques accélérations-décélérations (c'est-à-dire les vibrations, les accélérations-décélérations linéaires et angulaires, les sauts) sont également à l'origine des

vertiges des descendeurs. Les vibrations et les sauts, qui sont partiellement amortis par les suspensions de la bicyclette et par le corps du cycliste (incluant les membres supérieurs), peuvent perturber le réflexe vestibulo-oculaire et la fonction visuo-oculomotrice. Cette difficulté à la stabilisation du regard, à laquelle peuvent contribuer des oscillopsies induisant une instabilité, pourrait éventuellement être impliquée dans la survenue des chutes. Les vertiges eux-mêmes pourraient être induits par les impacts vibratoires et les sauts en déplaçant et/ou disloquant les otoconies des organes otolithiques, ce qui pourrait générer des stimulations erronées des canaux semi-circulaires [Vibert *et al.*, 2007]. Sur le plan biomécanique, durant un saut modéré, la tête subit une accélération négative proche de 1g juste avant l'atterrissage et une accélération positive supérieure à 2g lors de l'atterrissage [Redfield *et al.*, 2004]. Ainsi, une faible utilisation de l'entrée vestibulaire devrait être observée chez les descendeurs. Cependant, jusqu'à présent, aucune étude n'a évalué l'organisation neurosensorielle et l'appareil vestibulaire des descendeurs. L'évaluation neurosensorielle précédemment décrite d'un groupe de routiers et d'un groupe de vététistes spécialistes du cross-country n'a pas montré d'utilisation différenciée de l'afférence vestibulaire. En revanche, l'intensité de la pratique de VTT était liée à une utilisation élevée de la proprioception [Lion *et al.*, 2009]. Toutefois, les descendeurs sont soumis à des accélérations-décélérations plus intenses et les chutes sont plus fréquentes qu'en VTT cross-country. De futures recherches complémentaires du contrôle postural, de l'organisation neurosensorielle et de la fonction vestibulaire sont requises dans un groupe de descendeurs pour mieux comprendre la forte prévalence de vertiges après les compétitions ou les entraînements.

VII.4.3 – Prévalence des vertiges dans la vie de tous les jours

La relation entre la prévalence des vertiges après les compétitions ou les entraînements et celle durant les activités quotidiennes indique que les mécanismes responsables des vertiges après les compétitions ou les entraînements ont des effets persistants, particulièrement chez les descendeurs qui rapportent un pourcentage de vertiges dans la vie de tous les jours plus élevé que celui habituellement observé dans la population générale [Karatas, 2008 ; Kroenke & Price, 1993 ; Neuhauser *et al.*, 2008 ; Patrick & Peach, 1989 ; Yardley *et al.*, 1998].

VII.4.4 – Conclusion

Le VTT descente peut générer, par des lésions vestibulaires (déplacement et/ou dislocation des otoconies des organes otolithiques), des vertiges après les compétitions et les entraînements qui peuvent perdurer dans la vie de tous les jours. Les descendeurs, et les cyclistes en général, devraient porter des protections corporelles et en particulier des protections de la tête. Ils devraient pratiquer leur sport en fonction de leurs capacités (c'est-à-dire éviter de surestimer les capacités) et devraient utiliser du matériel adapté (cadre, suspensions, amortisseurs, roues, pneumatiques) permettant d'absorber les vibrations et les sauts. Le symptôme vertige devrait être mieux connu dans la communauté des descendeurs. Enfin, une exploration et un suivi oto-neurologiques pourraient être éventuellement proposés.

VIII – Discussion générale

L'ensemble de ces travaux avait pour objectif de vérifier les modalités d'utilisation des stratégies sensori-motrices en fonction du type d'exercice et des modifications de l'homéostasie et de vérifier la prévalence de vertiges, qui peuvent être associés à un dysfonctionnement de la fonction d'équilibration, dans des populations dans lesquelles les déterminants étaient très différents.

La contribution respective des afférences neurosensorielles dans le contrôle de l'équilibre peut varier en fonction de différents facteurs dont les qualités propres du sujet [Lacour *et al.*, 1997 ; El-Kahky *et al.*, 2000 ; Vouriot *et al.*, 2004], l'âge [Mirka & Black, 1990 ; Assaiante & Amblard, 1995 ; Perrin *et al.*, 1997] et même d'un instant à l'autre en fonction de la situation d'équilibre et de son adéquation à l'environnement [Lisbonis *et al.*, 1999]. L'exercice permet de modifier et d'optimiser les stratégies sensori-motrices, ce qui a généralement pour conséquence l'augmentation de la qualité du contrôle postural. Ainsi, chez les personnes âgées, la pratique d'activités physiques, qu'elles soient davantage bioénergétiques (cyclisme, natation, jogging) ou proprioceptives (gymnastique douce, yoga), permet au moins de maintenir la qualité du contrôle postural par la conservation des propriétés musculaires, assurant une contraction musculaire efficace, et par la conservation de réponses appropriées aux stimulations d'origines somato-sensorielles ou vestibulaires [Gauchard *et al.*, 1999 ; Perrin *et al.*, 1999 ; Gauchard *et al.*, 2001 ; Gauchard *et al.*, 2003a ; Gauchard *et al.*, 2003b ; Buatois *et al.*, 2007]. Les bénéfices de l'exercice et des activités physiques et sportives sur la fonction d'équilibration ne concernent pas exclusivement les personnes âgées. En effet, l'exercice permet également d'optimiser le contrôle postural des enfants, des adolescents et des adultes [Peltenburg *et al.*, 1982 ; Kioumourtzoglou *et al.*, 1997 ; Hugel *et al.*, 1998 ; Perrin *et al.*, 2002 ; Herpin *et al.*, 2010]. L'exercice assure un maintien voire un renforcement de la musculature nécessaire à la production d'une réponse motrice rapide et précise. L'entraînement a également un effet positif sur les adaptations sensori-motrices. Ainsi, il a été montré que la suppression de la vision durant une évaluation posturographique induisait une prolongation temporaire de la réponse motrice qui était alors produite lorsque les yeux étaient ouverts. Le temps de cette prolongation temporaire augmentait avec les répétitions de l'évaluation. Cette adaptation était d'autant plus rapide quand le sujet pratiquait régulièrement un exercice [Perrin *et al.*, 1998]. De plus, les stratégies sensori-motrices semblent être également modifiées par les différents types d'exercice. Il a été montré que la pratique du patinage sur glace modifiait à la fois les composantes canalaire et otolithiques des réflexes

vestibulaires [Tanguy *et al.*, 2008a, 2008b]. De plus, à l'instar des judoka dont les stratégies d'équilibration reposent principalement sur la proprioception [Perrin *et al.*, 2002], qui est utilisée pour l'équilibration sur le tatami et pour déséquilibrer un éventuel adversaire, les meilleurs vététistes utilisent leurs informations proprioceptives pour assurer l'équilibre du système individu/bicyclette. La proprioception permet d'avoir une réponse rapide aux déstabilisations. En revanche, les meilleurs routiers utilisent quant à eux les informations visuelles. Cependant, il n'est pas certain que l'exercice conditionne réellement l'utilisation de certaines stratégies sensori-motrices. Ainsi, la possibilité que la pratique physique du sportif puisse être conditionnée par ses dispositions physiologiques et sensorielles initiales ne doit pas être exclue. Dans ce cas, les meilleurs vététistes seraient des personnes ayant de bonnes prédispositions initiales à l'utilisation des informations proprioceptives permettant la réalisation de bonnes performances à VTT. De même, les meilleurs routiers seraient des personnes ayant de bonnes prédispositions initiales à l'utilisation des informations visuelles permettant la réalisation de bonnes performances en cyclisme sur route. Toutefois, les vététistes qui faisaient le plus de cyclisme sur route utilisaient d'une façon importante les informations visuelles dans leurs stratégies d'équilibration. Il semblerait que les stratégies sensori-motrices évolueraient et s'optimiseraient à long terme en fonction du type d'exercice et du niveau de pratique.

L'exercice, dont les effets positifs sur la fonction d'équilibration à long terme semblent être réels, est également une source d'altération de la fonction d'équilibration. En effet, immédiatement après l'arrêt de l'exercice, les altérations sont généralement temporaires. De plus, des lésions liées à l'exercice peuvent par ailleurs avoir des conséquences plus graves et durables sur la fonction d'équilibration.

Immédiatement après l'arrêt d'un exercice, la fonction d'équilibration est temporairement perturbée. Les mécanismes conduisant aux troubles de l'équilibre semblent différer en fonction du type d'exercice. En effet, les mécanismes physiopathologiques de troubles de l'équilibre observés après un exercice de type IronMan dont la durée est de 9 et 12 heures [Burdet & Rougier, 2004 ; Nagy *et al.*, 2004] sont vraisemblablement différents de ceux observés après deux séries de contractions de 5 min à 35% de la contraction musculaire maximale des muscles de la nuque [Beretta *et al.*, 2002]. Dans ce dernier cas, la fatigue des muscles de la nuque altère le contrôle postural en fournissant des informations anormales au système nerveux central [Beretta *et al.*, 2002]. Ces informations anormales résulteraient d'une modification du signal nerveux, pouvant être la conséquence de perturbations ioniques ou métaboliques (concentration élevée de potassium interstitiel ou apport d'oxygène insuffisant

induit par une diminution du débit sanguin), au niveau des terminaisons nerveuses libres, des fuseaux neuromusculaires ou des organes tendineux de Golgi [Gamet & Maton, 1989]. Dans le cas d'un exercice prolongé, les perturbations posturales peuvent également être induites par des altérations musculaires liées au mouvement lui-même ou à la déshydratation associée à l'exercice. Cette thèse a montré qu'une déshydratation, même faible, induite par un exercice prolongé diminuerait la sensibilité du capteur vestibulaire à travers des modifications de l'homéostasie de ses liquides. La libération, pendant le repos, de l'eau accumulée dans les muscles pendant l'exercice [Nielsen *et al.*, 1986] pourrait participer à la restauration de l'homéostasie des fluides corporels, qui interviendrait également dans l'oreille interne, et améliorerait par conséquent la stabilité posturale. Toutefois, en cas de forte déshydratation et d'exercice intense, d'autres mécanismes peuvent intervenir. En effet, en plus des altérations musculaires et vestibulaires, des perturbations de l'oxygénation cérébrale, induites par des modifications hémodynamiques, pourraient expliquer les troubles de la fonction d'équilibration à travers une diminution de l'efficacité de l'intégration centrale [Ide *et al.*, 1999 ; Fan *et al.*, 2008]. De plus, l'augmentation de la température corporelle, l'hyponatrémie et l'hypoglycémie, pouvant être liées à la déshydratation, contribueraient également aux troubles de l'équilibre voire aux malaises survenant à la suite d'exercices d'ultra-endurance [Holtzhausen & Noakes, 1997]. Un phénomène de vasoplégie, en particulier dans les membres inférieurs, pourrait aussi contribuer à la survenue d'hypotension orthostatique à la suite d'un exercice très prolongé [Anley *et al.*, 2010]. En effet, le temps de récupération à la suite d'une hypotension orthostatique survenant après un exercice d'ultra-endurance est identique selon qu'une importante réhydratation soit effectuée par voie intraveineuse ou que la position de Trendelenburg soit associée avec une faible hydratation par voie orale [Anley *et al.*, 2010]. Les troubles de la fonction d'équilibration à l'arrêt de l'exercice peuvent donc trouver leurs origines dans des mécanismes multiples qui sont fonction du type d'exercice, de son intensité et de sa durée.

L'exercice peut aussi être source de pathologies pouvant affecter durablement la fonction d'équilibration. Ainsi, cette thèse a montré que les fréquences de vertiges après des entraînements ou des compétitions et dans la vie de tous les jours sont particulièrement élevées chez des vététistes spécialistes de la descente. Les conditions de l'exercice, c'est-à-dire les brusques accélérations-décélérations (vibrations et chutes), semblent être directement liées à ces fréquences élevées. Il est alors nécessaire de trouver des solutions permettant de réduire les pathologies liées à l'exercice afin de conserver exclusivement ses effets bénéfiques. En VTT descente, la première des solutions serait de faire prendre conscience aux

descendeurs d'éviter de surestimer leurs capacités, ce qui permettrait de limiter le nombre de chutes. En compétition, les organisateurs des épreuves de VTT descente devraient réduire les difficultés techniques bien que la recherche d'événements spectaculaires soit une particularité de cette discipline. De plus, le développement de matériaux permettant de mieux absorber les chocs et les vibrations devrait être une priorité des fabricants de bicyclettes. Ces recommandations, qui semblent évidentes, ne doivent pas être exclusives à la pratique du VTT descente.

IX – Conclusion et perspectives

L'exercice, qui améliore globalement la fonction d'équilibration à long terme, induit des modifications des stratégies sensori-motrices selon les spécificités de cet exercice. Afin d'en tirer les meilleurs bénéfices sur la fonction d'équilibration, il est important de prendre en compte le type d'activité et d'adapter l'intensité de pratique en fonction des capacités du sujet. Par ailleurs, les conditions de l'exercice, en particulier un état satisfaisant d'hydratation avant, pendant et après l'exercice, l'utilisation d'un matériel adapté et l'adoption d'un comportement responsable permettront de limiter la survenue de troubles de l'équilibre et de pathologies pouvant altérer plus ou moins durablement la fonction d'équilibration. Les résultats de ce travail peuvent avoir un intérêt dans le milieu professionnel afin de réduire les accidents. Ainsi, la fatigue et les modifications de l'homéostasie induites par l'exercice peuvent avoir des conséquences importantes dans le cadre professionnel pouvant conduire à un risque important d'accidents.

Toutefois, ces conclusions posent de nouvelles questions. Ainsi, il serait intéressant de déterminer l'importance relative des différentes informations sensorielles et l'adaptation neurosensorielle aux stimulations liées à l'exercice, par une approche complémentaire, lors de réelles évolutions sur route et en VTT ou lors de situations expérimentales visant à perturber davantage la prise d'informations sensorielles. Parmi ces dernières, la stimulation galvanique vestibulaire qui permet de perturber fortement les informations vestibulaires, pourrait être envisagée. Balter *et al.* [2004a] ont ainsi montré, en appliquant des stimulations galvaniques, que des gymnastes n'avaient pas une sensibilité vestibulaire plus fine que celle de sujets témoins. Lors de ce test, le brouillage de la verticale gravitaire conduit les gymnastes à utiliser les informations proprioceptives pour s'équilibrer. Il serait également possible de recourir à une perturbation des informations vestibulaires et proprioceptives par vibrations, respectivement en regard de la mastoïde [Hamann & Schuster, 1999 ; Dumas *et al.*, 2008] et au niveau du triceps sural [Fransson *et al.*, 2004], cette stimulation pouvant être une voie intéressante d'exploration fonctionnelle des stratégies neurosensorielles de la fonction d'équilibration des vététistes et des routiers. De plus, les perturbations de l'homéostasie liées à la réalisation d'un exercice prolongé pourraient être confirmées par l'utilisation de techniques d'imagerie permettant, entre autres, la mesure du volume des liquides de l'oreille interne. Le rôle éventuel de l'hormone antidiurétique dans les troubles de l'équilibre suivant un exercice prolongé pourrait être étudié, en particulier au niveau de l'oreille interne. Le VTT descente, qui est un exercice peu décrit dans la littérature, pourrait être davantage caractérisé.

Aussi, l'utilisation couplée d'accéléromètres, d'un cardio-fréquencemètre, de la vidéo et d'un géo-positionnement par satellite lors de la réalisation d'une descente à VTT pourrait fournir des informations complémentaires, concernant en particulier les accélérations latérales au niveau de la tête, qui permettraient de mieux comprendre certaines pathologies associées à l'exercice et d'en prévenir la survenue. De plus, les effets à court et long terme de cet exercice, dans lequel les vibrations et les accélérations peuvent être intenses, pourraient être évalués par une étude posturographique.

Enfin, la connaissance sur les conséquences, quelles soient positives ou négatives, de l'exercice sur les stratégies sensori-motrices de la fonction d'équilibration pourrait être approfondie non seulement dans les activités physiques et sportives mais également pour améliorer les conditions de travail dans les activités professionnelles.

X – Références bibliographiques

- Absalon J, Cascua S, Dalouche A, eds.** VTT, s'initier et progresser. Paris : Amphora, 2006.
- Adam GE, Carter R 3rd, Cheuvront SN, Merullo DJ, Castellani JW, Lieberman HR, Sawka MN.** Hydration effects on cognitive performance during military tasks in temperate and cold environments. *Physiol Behav* 2008;93:748-56.
- Adam JJ, Huys R, van Loon EM, Kingma H, Paas FG.** Effects of spatial and symbolic precues on localization performance. *Psychol Res* 2000;64:66-80.
- Adrian ED, ed.** The physiological background of perception. Oxford: Clarendon Press, 1947.
- Aksoy S, Sennaroğlu L.** Benign paroxysmal positional vertigo in swimmers. *Kulak Burun Bogaz Ihtis Derg* 2007;17:307-10.
- Allen DG, Lamb GD, Westerblad H.** Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol Rev* 2008;88:287-332.
- Allum JHJ, Bloem BR, Carpenter MG, Hulliger M, Hadders-Algra M.** Proprioceptive control of posture: a review of new concepts. *Gait Posture* 1998;8:214-42.
- Allum JHJ, Pfaltz CR.** Visual and vestibular contributions to pitch sway stabilization in the ankle muscles of normal and patients with bilateral peripheral vestibular deficits. *Exp Brain Res* 1985;58:82-94.
- Amblard B, Assaiante C, Crémieux J, Marchand A.** From posture to gait: which sensory input for which function? In: Brandt Th, Paulus W, Bles W, Dieterich M, Krafczyk S, Straube A, eds. Disorders of posture and gait. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1990:168-76.
- Amblard B, Crémieux J, Marchand AR, Carblanc A.** Lateral orientation and stabilization of human stance: static versus dynamic visual cues. *Exp Brain Res* 1985;61:21-37.
- André-Deshays C, Revel M.** Rôle sensoriel de la plante du pied dans la perception du mouvement et le contrôle postural. *Méd Chir Pied* 1988;4:217-223.
- Angyán L, Téczely T, Angyán Z.** Factors affecting postural stability of healthy young adults. *Acta Physiol Hung* 2007;94:289-99.
- Anley C, Noakes T, Collins M, Schwellnus MP.** A comparison of two treatment protocols in the management of exercise-associated postural hypotension: a randomised clinical trial. *Br J Sports Med* 2010, doi:10.1136/bjsm.2010.071951.
- Assaiante C, Amblard B.** An ontogenetic model for the sensorimotor organization of balance control in humans. *Hum Mov Sci* 1995;14:13-43.

- Astrand PO, Rodahl K, Dahl HA, Stromme SB, eds.** Textbook of work physiology. Champaign: Human kinetics, 2003.
- Astrand PO, Rodahl K, Lacour JR, Duizabo D, eds.** Précis de physiologie de l'exercice musculaire. Paris : Masson, 1994.
- Bagesteiro LB, Sarlegna FR, Sainburg RL.** Differential influence of vision and proprioception on control of movement distance. *Exp Brain Res* 2006;171:358-70.
- Balter SG, Stokroos RJ, Akkermans E, Kingma H.** Habituation to galvanic vestibular stimulation for analysis of postural control abilities in gymnasts. *Neurosci Lett* 2004a;366:71-5.
- Balter SG, Stokroos RJ, De Jong I, Boumans R, Van de Laar M, Kingma H.** Background on methods of stimulation in galvanic-induced body sway in young healthy adults. *Acta Otolaryngol* 2004b;124:262-71.
- Balter SG, Stokroos RJ, Eterman RM, Paredis SA, Orbons J, Kingma H.** Habituation to galvanic vestibular stimulation. *Acta Otolaryngol* 2004c;124:941-5.
- Barmack NH, Nastos MA, Pettorosi VE.** The horizontal and vertical cervico-ocular reflexes of the rabbit. *Brain Res* 1981;22:261-78.
- Barnes BC, Cooper L, Kirkendall DT, McDermott TP, Jordan BD, Garrett WE Jr.** Concussion history in elite male and female soccer players. *Am J Sports Med* 1998;26:433-8.
- Beaver WL, Wasserman K, Whipp WJ.** A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol* 1986;60:2020-7.
- Berencsi A, Ishihara M, Imanaka K.** The functional role of central and peripheral vision in the control of posture. *Hum Mov Sci* 2005;24:689-909.
- Beretta MV, Bove M, Burrioni E, Diverio M, Facioli M, Nardone A, Schieppati M.** Neck muscle fatigue affects postural control. *Gait Posture* 2002;16:S227.
- Berthoz A, ed.** Le sens du mouvement. Paris : Odile Jacob, 1997.
- Berthoz A, Melvill Jones C, eds.** Adaptive mechanisms in gaze control. Amsterdam: Elsevier, 1985.
- Berthoz A, Pavard B, Young LR.** Perception of linear horizontal self-motion induced by peripheral vision (linear vection). Basic characteristics and visual-vestibular interactions. *Exp Brain Res* 1975;23:471-89.
- Berthoz A, Pozzo T.** Intermittent head stabilization during postural and locomotory tasks in humans. In: Amblard B, Berthoz A, Clarac F, eds. Posture and gait. Amsterdam: Excerpta Medica, 1988:189-98.

- Berthoz A.** Coopération et substitution entre les systèmes saccadique et les reflexes d'origine vestibulaire. Faut-il réviser la notion de réflexe ? *Rev Neurol* 1989;145:513-26.
- Berthoz A.** Reference frames for the perception and control of movement. In: Paillard J, ed. Brain and space. Oxford: Oxford University Press, 1991:81-111.
- Bird JH.** Orthopaedics. *J R Army Med Corps* 2004;150:191-9.
- Bizid R, Jully JL, Gonzalez G, François Y, Dupui P, Paillard T.** Effects of fatigue induced by neuromuscular electrical stimulation on postural control. *J Sci Med Sport* 2009;12:60-6.
- Black FO, Paloski WH, Doxey-Gasway DD, Reschke MF.** Vestibular plasticity following orbital spaceflight: recovery from postflight postural instability. *Acta Otolaryngol* 1995;520:450-4.
- Black FO, Wall C 3rd, Nashner LM.** Effects of visual and support surface orientation references upon postural control in vestibular deficient subjects. *Acta Otolaryngol* 1983;95:199-201.
- Bonnet C, Lestienne F, eds.** Percevoir et produire le mouvement. Paris : Armand Colin, 2003.
- Bosman J, Ten Tusscher MP, Kingma H.** The influence of visual input on the vestibulo-ocular reflex. *Doc Ophthalmol* 1999;99:83-92.
- Bove M, Faelli E, Tacchino A, Lofrano F, Cogo CE, Ruggeri P.** Postural control after a strenuous treadmill exercise. *Neurosci Lett* 2007;418:276-81.
- Brandt Th, Wenzel D, Dichgans J.** Die entwicklung der visuellen stabilisation des aufrechten standes beim kind: ein reifezeichen in der kinderneurologie. *Arch Psychiatr Nervenkr* 1976;223:1-13.
- Bressel E, Yonker JC, Kras J, Heath EM.** Comparison of static and dynamic balance in female collegiate soccer, basketball, and gymnastics athletes. *J Athl Train* 2007;42:42-6.
- Bronstein AM, Duckwell D.** Automatic control of postural sway by visual motion parallax. *Exp Brain Res* 1997;113:243-8.
- Bronstein AM, Hood JD, Gresty MA, Panagi C.** Visual control of balance in cerebellar and Parkinsonian syndromes. *Brain* 1990;113:767-70.
- Buatois S, Gauchard GC, Aubry C, Benetos A, Perrin PhP.** Current physical activity improves balance control during sensory conflicting conditions in older adults. *Int J Sports Med* 2007;28:53-8.

- Buchner DM, Cress ME, de Lateur BJ, Esselman PC, Margherita AJ, Price R, Wagner EH.** A comparison of the effects of three types of endurance training on balance and other fall risk factors in older adults. *Aging (Milano)* 1997;9:112-9.
- Burdet C, Rougier P.** Effects of utmost fatigue on undisturbed upright stance control. *Science Sports* 2004;19:308-16.
- Burton AW, Davis W.** Assessing balance in adapted physical education: fundamental concepts and applications. *Adapt Phys Act Quart* 1992;9:14-46.
- Campbell AJ, Robertson MC, Gardner MM, Norton RN, Tilyard MW, Buchner DM.** Randomised controlled trial of a general practice programme of home based exercise to prevent falls in the elderly women. *BMJ* 1997;315:1065-9.
- Carmont MR.** Mountain biking injuries: a review. *Br Med Bull* 2008;85:101-12.
- Caron O.** Effects of local fatigue of the lower limbs on postural control and postural stability in standing posture. *Neurosci Lett* 2003;340:83-6.
- Caron O.** Is there interaction between vision and local fatigue of the lower limbs on postural control and postural stability in human posture? *Neurosci Lett* 2004;363:18-21.
- Chapman AR, Vicenzino B, Blanch P, Hodges PW.** Patterns of leg muscle recruitment vary between novice and highly trained cyclists. *J Electromyogr Kinesiol* 2008;18:359-71.
- Chien CW, Hu MH, Tang PF, Sheu CG, Hsieh CL.** A comparison of psychometric properties of the Smart Balance Master System and the Postural Assessment Scale for Stroke in people who have had mild stroke. *Arch Phys Med Rehabil* 2007;88:374-80.
- Clément G, Gurfinkel VS, Lestienne F, Lipshitz MI, Popov KE.** Adaptation of postural control to weightlessness. *Exp Brain Res* 1984;57:61-72.
- Clément G, Rezzette D.** Motor behavior underlying the control of an upside-down vertical posture. *Exp Brain Res* 1985;59:478-84.
- Coco M, Di Corrado D, Calogero RA, Perciavalle V, Maci T, Perciavalle V.** Attentional processes and blood lactate levels. *Brain Res* 2009;1302:205-11.
- Cohen B.** The vestibulo-ocular reflex arc. In: Kornhuber HH, ed. Handbook of sensory physiology. Vestibular system. New York: Springer Verlag, 1974:477-540.
- Collet C, Paillard J, eds.** Mouvements et cerveau. Bruxelles : De Boeck, 2001.
- Corbeil P, Blouin JS, Begin F, Nougier V, Teasdale N.** Perturbation of the postural control system induced by muscular fatigue. *Gait Posture* 2003;18:92-100.
- Cordo PJ, Nashner LM.** Properties of postural adjustments associated with rapid arm movements. *J Neurophysiol* 1982;47:287-302.

- Couloigner V, Teixeira M, Sterkers O, Rask-Andersen H, Ferrary E.** Le sac endolymphatique: ses fonctions au sein de l'oreille interne. *Med Sci (Paris)* 2004;20:304-10.
- Crémieux J, Isableu B, Mesure S, Ohlmann Th.** Y a-t-il un lien entre la performance posturale et le degré de dépendance perceptive à l'égard du champ visuel ? *In* : Lacour M, Gagey PM, Weber B, eds. Posture et environnement. Montpellier : Sauramps Medical, 1997:141-152.
- Crémieux J, Mesure S.** Differential sensitivity to static visual cues in the control of postural equilibrium in man. *Percept Mot Skills* 1994;78:67-74.
- Crémieux J, Mesure S.** Equilibre postural statique et pratique de la danse ou du judo. *In* : Laurent M, Marini JF, Pfister R, Therme P, eds. Recherche en Activités Physiques et Sportives -3- Les Performances Motrices. Aix-Marseille : Actio, 1992:275-291.
- Crémieux J, Perrin PhP, Mesure S.** Posture, équilibre et activités physiques et sportive. *In* : Lamendin H, Courteix D, eds. Abrégés en biologie et pratique sportive. Paris: Masson, 1995:98-113.
- Crutchfield CA, Shumway-Cook A, Horak FB.** Balance and coordination training. *In*: Scully R, Barnes M, eds. Physical therapy. Baltimore: Lippincott, 1989:825-43.
- Damasio AR, ed.** Descartes' error. New York: Putman, 1994.
- Davidson BS, Madigan ML, Nussbaum MA.** Effects of lumbar extensor fatigue and fatigue rate on postural sway. *Eur J Appl Physiol* 2004;93:183-9.
- Davlin CD.** Dynamic balance in high level athletes. *Percept Mot Skills* 2004;98:1171-6.
- De Klein A.** Experimental physiology of the labyrinth. *J Laryngol Otol* 1923;38:646-63.
- Debu B, Woollacott MH.** Effects of gymnastics training on postural responses to stance perturbations. *J Mot Behav* 1988;20:273-300.
- Denis G, Vuillemin A, Perrin PhP.** Evaluation du rôle de la proprioception dans l'équilibration selon les activités physiques et sportives. *Ann Kinésithér* 1996;23:344-7.
- Derave W, De Clercq D, Bouckaert J, Pannier JL.** The influence of exercise and dehydration on postural stability. *Ergonomics* 1998;41:782-9.
- Derave W, Tombeux N, Cottyn J, Pannier JL, De Clercq D.** Treadmill exercise negatively affects visual contribution to static postural stability. *Int J Sports Med* 2002;23:44-9.
- Diard JP, Aubin F, May D, Michel M, Gouteyron JF.** Equitest et sujets de hautes performances. *Rev Laryngol Otol Rhinol (Bord)* 1997;118:307-10.
- Dichgans J, Held R, Young L, Brandt Th.** Moving visual scenes influence the apparent direction of gravity. *Science* 1972;178:1217-19.

- Dickin DC, Doan JB.** Postural stability in altered and unaltered sensory environments following fatiguing exercise of lower extremity joints. *Scand J Med Sci Sports* 2008;18:765-72.
- Diener HC, Dichgans J, Bacher M, Gompf B.** Quantification of postural sway in normals and patients with cerebellar disease. *Electroenceph Clin Neurophysiol* 1984a;24:134-42.
- Diener HC, Dichgans J, Gushlbauer B, Mau H.** The significance of proprioception on postural stabilisation as assessed by ischemia. *Brain Res* 1984b;296:103-9.
- Dietz V, Trippel M, Horstmann GA.** Significance of proprioceptive and vestibulospinal reflexes in the control of stance and gait. In: Patla AE, ed. Adaptability of human gait. Amsterdam: Elsevier, 1991:37-52.
- Duc S, Bertucci W, Pernin JN, Grappe F.** Muscular activity during uphill cycling: effect of slope, posture, hand grip position and constrained bicycle lateral sways. *J Electromyogr Kinesiol* 2008;18:116-27.
- Dumas G, Perrin PhP, Schmerber S.** Nystagmus induced by high frequency vibrations of the skull in total unilateral peripheral vestibular lesions. *Acta Otolaryngol* 2008;128:255-62.
- Eklom B.** External and internal factors influencing physical performance. *Med Sport Sci* 1987;26:90-7.
- El-Kahky AM, Kingma H, Dolmans M, de Jong I.** Balance control near the limit of stability in various sensory conditions in healthy subjects and patients suffering from vertigo or balance disorders: impact of sensory input on balance control. *Acta Otolaryngol (Stockh.)* 2000;120:508-16.
- Ezure K, Fukushima K, Schor RH, Wilson VJ.** Compartmentalization of the cervicocollic reflex in cat splenius muscle. *Exp Brain Res* 1983;51:397-404.
- Fan JL, Cotter JD, Lucas RA, Thomas K, Wilson L, Ainslie PN.** Human cardiorespiratory and cerebrovascular functions during severe passive hyperthermia: effects of mild hypohydration. *J Appl Physiol* 2008;105:433-45.
- Faria EW, Parker DL, Faria IE.** The science of cycling: physiology and training - part 1. *Sports Med* 2005;35:285-312.
- Fédération Française de Cyclisme.** <http://www.ffc.fr/> (page consultée le 28 septembre 2010).
- Fetter M.** Assessing vestibular function: which tests, when? *J Neurol* 2000;247:335-42.

- Ford-Smith CD, Wyman JF, Elswick Jr RK, Fernandez T, Newton RA.** Test-retest reliability of the sensory organization test in noninstitutionalized older adults. *Arch Phys Med Rehabil* 1995;76:77-81.
- Fox ZG, Mihalik JP, Blackburn JT, Battaglini CL, Guskiewicz KM.** Return of postural control to baseline after anaerobic and aerobic exercise protocols. *J Athl Train* 2008;43(5):456-63.
- Fransson PA, Kristinsdottir EK, Hafström A, Magnusson M, Johansson R.** Balance control and adaptation during vibratory perturbations in middle-aged and elderly humans. *Eur J Appl Physiol* 2004;91:595-603
- Furman JM.** Posturography: uses and limitations. *Baillieres Clin Neurol* 1994;3:501-13.
- Gagey PM, Weber B, eds.** Posturologie : régulation et dérèglements de la station debout. Paris : Masson, 1995.
- Gamet D, Maton B.** The fatigability of two agonistic muscles in human isometric voluntary submaximal contraction: an EMG study. I. Assessment of muscular fatigue by means of surface EMG. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1989;58:361-8.
- Gauchard GC, Gangloff P, Jeandel C, Perrin PhP.** Physical activity improves gaze and posture control in the elderly. *Neurosci Res* 2003a;45:409-17.
- Gauchard GC, Gangloff P, Vouriot A, Mallié JP, Perrin PhP.** Effects of exercise-induced fatigue with and without hydration on static postural control in adult human subjects. *Int J Neurosci* 2002;112:1191-206.
- Gauchard GC, Jeandel C, Perrin PhP.** Physical and sporting activities improve vestibular afferent usage and balance in elderly human subjects. *Gerontology* 2001;47:263-70.
- Gauchard GC, Jeandel C, Tessier A, Perrin PhP.** Beneficial effect of proprioceptive physical activities on balance control in elderly human subjects. *Neurosci Lett* 1999;273:81-4.
- Gauchard GC, Tessier A, Jeandel C, Perrin PhP.** Improved muscle strength and power in elderly exercising regularly. *Int J Sports Med* 2003b;24:71-4.
- Gauchard GC, Vançon G, Meyer P, Mainard D, Perrin PhP.** On the role of knee joint in balance control and postural strategies: effects of total knee replacement in elderly subjects with knee osteoarthritis. *Gait Posture* 2010;32:155-60.
- Gerbino PG, Griffin ED, Zurakowski D.** Comparison of standing balance between female collegiate dancers and soccer players. *Gait Posture* 2007;26:501-7.

- Ghilodes JC, Kavounoudias A, Roll R, Roll JP.** Orientation et régulation de la posture chez l'homme : deux fonctions de la proprioception musculaire ? *In* : Villeneuve Ph, ed. Pied, équilibre et posture. Paris : Frison-Roche, 1996:1-13.
- Gibson T.** Sports injuries. *Baillieres Clin Rheumatol* 1987;1:583-600.
- Golomer E, Crémieux J, Dupui P, Isableu B, Ohlmann T.** Visual contribution to self-induced body sway frequencies and visual perception of male professional dancers. *Neurosci Lett* 1999;267:189-92.
- Golomer E, Dupui P.** Spectral analysis of adult dancers' sways: sex and interaction vision-proprioception. *Int J Neurosci* 2000;105:15-26.
- Goodwin GM, McCloskey DI, Matthews PB.** Proprioceptive illusions induced by muscle vibration: contribution by muscle spindles to perception? *Science* 1972;175:1382-4.
- Gosselin G, Rassoulia H, Brown I.** Effects of neck extensor muscles fatigue on balance. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2004;19:473-9.
- Grappe F, Candau R, Busso T, Rouillon JD.** Effect of cycling position on ventilatory and metabolic variables. *Int J Sports Med* 1998;19:336-41.
- Grappe F, ed.** Cyclisme et optimisation de la performance. Bruxelles : De Boeck, 2005.
- Gregory J, Johns DP, Walls JT.** Relative vs. absolute physiological measures as predictors of mountain bike cross-country race performance. *J Strength Cond Res* 2007;21:17-22.
- Gribble PA, Hertel J, Denegar CR, Buckley WE.** The Effects of Fatigue and Chronic Ankle Instability on Dynamic Postural Control. *J Athl Train* 2004;39:321-329.
- Gribble PA, Hertel J.** Effect of lower-extremity muscle fatigue on postural control. *Arch Phys Med Rehabil* 2004;85:589-92.
- Guidetti G, Palano D, Molinari G, Galetti R, Monzani D.** Il ruolo della stabilometria computerizzata nella quantificazione oggettiva delle correlazioni tra disordini cranio-mandibolari e turbe dell'equilibrio. *Otolaringol* 1993;43:181-9.
- Gurfinkel VS, Debreva EE, Levik YS.** The role of internal model in the position perception and planning of arm movement. *Fiziol Cheloveka* 1986;12:769-76.
- Gurfinkel VS, Ivanenko YUP, Levik YUS, Babakova A.** Kinesthetic reference for human orthograde posture. *Neuroscience* 1995;68:229-43.
- Gurfinkel VS, Levik YS, Popov KE, Smetanin BN.** Body scheme in the control of postural activity. *In*: Gurfinkel VS, Ioffé ME, Massion J, Roll JP, eds. Stance and motion: facts and concepts. New York: Plenum Press, 1988:185-93.
- Gurfinkel VS, Levik YS.** Perceptual and automatic aspects of the postural body scheme. *In*: Paillard J, ed. Brain and space. Oxford: Oxford University Press, 1991:147-62.

- Gurfinkel VS, Lipshits MI, Popov KE.** Stabilization of body position as the main task of postural regulation. *Fiziol Cheloveka* 1981;7:1217-9.
- Guskiewicz KM, Ross SE, Marshall SW.** Postural stability and neuropsychological deficits after concussion in collegiate athletes. *J Athl Train* 2001;36:263-73.
- Guskiewicz KM.** Assessment of postural stability following sport-related concussion. *Curr Sports Med Rep* 2003;2:24-30.
- Guyton AC, Hall JE.** The Body fluid compartments: extracellular and intracellular fluids; interstitial fluid and edema. In: Guyton AC, Hall JE, eds. Textbook of medical physiology. Philadelphia: Elsevier Saunders, 2006.
- Hamann KF, Schuster EM.** Vibration-induced nystagmus - A sign of unilateral vestibular deficit. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec* 1999;61:74-9.
- Harkins KM, Mattacola CG, Uhl TL, Malone TR, McCrory JL.** Effects of 2 ankle fatigue models on the duration of postural stability dysfunction. *J Athl Train* 2005;40:191-4.
- Hashiba M.** Transient change in standing posture after linear treadmill locomotion. *Jpn J Physiol* 1998;48:499-504.
- Haußwirth C, Vallier JM, Lehenaff D, Brisswalter J, Smith D, Millet G, Dreano P.** Effect of two drafting modalities in cycling on running performance. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:485-92.
- Head H, ed.** Studies in neurology, vol.2. London: Hodder, Stoughton, 1920.
- Herdman SJ, Clendaniel RA, Mattox DE, Holliday MJ, Niparko JK.** Vestibular adaptation exercises and recovery: acute stage after acoustic neuroma resection. *Otolaryngol Head Neck Surg* 1995;113:77-87.
- Herpin G, Gauchard GC, Lion A, Collet P, Keller D, Perrin PhP.** Sensorimotor specificities in balance control of expert fencers and pistol shooters. *J Electromyogr Kinesiol* 2010; 20:162-9.
- Himmelreich H, Pralle H, Vogt L, Banzer W.** Mountainbikeverletzungen bei Leistungs- und Breitensportlern. *Sportverletz Sportschaden* 2007;21:180-4.
- Hlavacka F, Kriskova M, Horak FB.** Modifications of human postural response to leg muscle vibration by electrical vestibular stimulation. *Neurosci Lett* 1995;189:9-12.
- Holtzhausen LM, Noakes TD.** Collapsed ultraendurance athlete: proposed mechanisms and an approach to management. *Clin J Sport Med* 1997;7(4):292-301.
- Horak FB, Nashner LM, Diener HC.** Postural strategies associated with somatosensory and vestibular loss. *Exp Brain Res* 1990;82:167-77.

- Horak FB, Nashner LM.** Central programming of postural movements: adaptation to altered support surface configurations. *J Neurophysiol* 1986;55:1369-81.
- Horak FB, Shupert CL, Dietz V, Horstmann G.** Vestibular and somatosensory contributions to responses to head and body displacements in stance. *Exp Brain Res* 1994;100:93-106.
- Horak FB.** Effects of neurological disorders on postural movement strategies in the elderly. In: Vellas B, Toupet M, Rubenstein L, Albarède JL, Christen Y, eds. Falls, balance and gait disorders in the elderly. Paris: Elsevier Science, 1992:137-51.
- Horak FB.** Postural instability in Parkinson's disease: motor coordination and sensory organization. *Neurol Rep* 1988;12:54-55.
- Horstmann G, Dietz V.** The contribution of vestibular input to the stabilization of human posture: a new experimental approach. *Neurosci Lett* 1988;95:179-84.
- Hu MH, Woollacott MH.** Multi-sensory training of standing balance in older adults: II. Kinetic and electromyographic postural responses. *J Gerontol* 1994;49:M69-M71.
- Hugel F, Cadopi M, Kohler F, Perrin PhP.** Postural control of ballet dancers: a specific use of visual input for artistic purposes. *Int J Sports Med* 1999;20:86-92.
- Ide K, Horn A, Secher NH.** Cerebral metabolic response to submaximal exercise. *J Appl Physiol* 1999;87:1604-8.
- Impellizzeri FM, Marcora SM, Rampinini E, Mognoni P, Sassi A.** Correlations between physiological variables and performance in high level cross country off road cyclists. *Br J Sports Med* 2005;39:747-51.
- Impellizzeri FM, Marcora SM.** The physiology of mountain biking. *Sports Med* 2007;37:59-71.
- Jeys LM, Cribb G, Toms AD, Hay SM.** Mountain biking injuries in rural England. *Br J Sports Med* 2001;35:197-9.
- Jones DEH.** The stability of the bicycle. *Phys Today* 1970;23:34-40.
- Joyce CJ, Perrin DH, Arnold BL, Granata KP, Gansneder BM, Gieck JH.** Dorsiflexor and plantar flexor muscle fatigue decrease postural control. *J Athl Train* 2001;36:S-32.
- Judelson DA, Maresh CM, Anderson JM, Armstrong LE, Casa DJ, Kraemer WJ, Volek JS.** Hydration and muscular performance: does fluid balance affect strength, power and high-intensity endurance? *Sports Med* 2007;37:907-21.
- Karatas M.** Central vertigo and dizziness: epidemiology, differential diagnosis, and common causes. *Neurologist* 2008;14:355-64.

- Kavounoudias A, Roll R, Roll JP, Gilhodes JC.** Sensibilité tactile plantaire et contrôle postural. *In* : M Lacour (Ed) : Posture et équilibre. Montpellier : Sauramps Médical, 1999;25-39.
- Kavounoudias A, Roll R, Roll JP.** Foot sole and ankle muscle inputs contribute jointly to human erect posture regulation. *J Physiol* 2001;532:869-78.
- Kennedy J.** Neurologic injuries in cycling and bike riding. *Neurol Clin* 2008;26:271-9.
- Kennedy J.** Neurologic injuries in cycling and bike riding. *Phys Med Rehabil Clin N Am* 2009;20:241-8.
- Kioumourtoglou E, Derri V, Mertzaniidou O, Tzetzis G.** Experience with perceptual and motor skills in rhythmic gymnastics. *Percept Mot Skills* 1997;84:1363-72.
- Kobayashi Y, Inoue Y, Isa T.** Pedunculo-pontine control of visually guided saccades. *Prog Brain Res* 2004;143:439-45.
- Kroenke K, Price RK.** Symptoms in the community. Prevalence, classification, and psychiatric comorbidity. *Arch Intern Med* 1993;153:2474-80.
- Kronisch RL, Pfeiffer RP.** Mountain biking injuries: an update. *Sports Med* 2002;32:523-37.
- Lacour M, Barthélémy J, Borel L, Magnan J, Xerri C, Chays A, Ouaknine M.** Sensory strategies in human postural control before and after unilateral vestibular neurotomy. *Exp Brain Res* 1997;115:300-10.
- Lacour M, Borel L, Barthélémy J, Harley F, Xerri C.** Dynamic properties of the vertical otolith neck reflexes in the alert cat. *Exp Brain Res* 1987;65:559-68.
- Lacour M, Borel L.** Vestibular control of posture and gait. *Arch Ital Biol* 1993;131:81-104.
- Lacquaniti F, le Taillanter M, Lopiano L, Maioli C.** The control of limb geometry in cat posture. *J Physiol (Lond)* 1990;426:177-92.
- Land MF, Lee DN.** Where we look when we steer. *Nature* 1994;369:742-4.
- Ledin T, Fransson PA, Magnusson M.** Effects of postural disturbances with fatigued triceps surae muscles or with 20% additional body weight. *Gait Posture* 2004;19:184-93.
- Ledin T, Odkvist LM.** Visual influence on postural reactions to sudden antero-posterior support surface movements. *Acta Otolaryngol (Stockh.)* 1991;111:813-9.
- Lee DN, Lishman JR.** Visual proprioceptive control of stance. *J Hum Mov Stud* 1975;1:87-95.
- Lee H, Martin DT, Anson JM, Grundy D, Hahn AG.** Physiological characteristics of successful mountain bikers and professional road cyclists. *J Sports Sci* 2002;20:1001-8.

- Leitner C, Mair P, Paul B, Wick F, Mittermaier C, Sycha T, Ebenbichler G.** Reliability of posturographic measurements in the assessment of impaired sensorimotor function in chronic low back pain. *J Electromyogr Kinesiol* 2009;19:380-90.
- Lepers R, Bigard AX, Diard JP, Gouteyron JF, Guezennec CY.** Posture control after prolonged exercise. *Eur J Appl Physiol* 1997;76:55-61.
- Lestienne F, Soechting J, Berthoz A.** Postural readjustment induced by linear motion of visual scenes. *Exp Brain Res* 1977;28:363-84.
- Lestienne FG, Gurfinkel VS.** Postural control in weightlessness: a dual process underlying adaptation to an unusual environment. *Trends Neurosci* 1988;11:359-63.
- Lion A, Bosser G, Gauchard GC, Djaballah K, Mallié JP, Perrin PhP.** Exercise and dehydration: a possible role of inner ear in balance control disorder. *J Electromyogr Kinesiol* 2010;20:1196-202.
- Lion A, Gauchard GC, Deviterne D, Perrin PhP.** Differentiated influence of off-road and on-road cycling practice on balance control and the related-neurosensory organization. *J Electromyogr Kinesiol* 2009;19:623-30.
- Lisbonis JM, Zeitoun A, Robin P.** Comment tester les différentes entrées sensorielles responsables de la fonction d'équilibration d'un sujet sur multitest-équilibre ? *In* : Lacour M, ed. Posture et équilibre. Montpellier : Sauramps Médical, 1999:107-112.
- Lloyd DPC.** Principles of spinal reflex activity. *In* : Fulton JF, ed. A textbook of physiology. Philadelphia : WB Saunders, 1950:78-109.
- Lord SR, Castell S.** Effect of exercise on balance, strength and reaction time in older people. *Austr Physiother* 1994;40:83-8.
- Lund S, Broberg C.** Effects of different head positions on postural sway in man induced by a reproducible vestibular error signal. *Acta Physiol Scand* 1983;117:307-9.
- MacRae HS-H, Hise KJ, Allen PJ.** Effects of front and dual suspension mountain bike systems on uphill cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32:1276-80.
- MacRae HS-H.** Physiology of mountain biking. *In*: Burke ER, ed. High-tech cycling. Champaign: Human Kinetics, 2003:289-321.
- Madigan ML, Davidson BS, Nussbaum MA.** Postural sway and joint kinematics during quiet standing are affected by lumbar extensor fatigue. *Hum Mov Sci* 2006;25:788-99.
- Magnus R, ed.** Körperstellung. Berlin: Springer, 1924.
- Magnusson M, Enböm H, Johansson R, Wiklund J.** Significance of pressor input from the human feet in anterior-posterior postural control. *Acta Otolaryngol* 1990a;110:182-188.

- Magnusson M, Enböm H, Johansson R, Wiklund J.** Significance of pressor input from the human feet in lateral postural control. *Acta Otolaryngol* 1990b;110:321-7.
- Mallié JP, Ait-Djafer Z, Saunders C, Pierrat A, Caira MV, Courroy O, Panescu V, Perrin PhP.** Renal handling of salt and water in humans during exercise with or without hydration. *Eur J Appl Physiol* 2002;86:196-202.
- Martin JP, ed.** The basal ganglia and posture. London: Pitman, 1967.
- Massion J, Viallet F.** Posture, coordination, movement. *Rev Neurol* 1990;146:536-42.
- Massion J, Woollacott MH.** Posture and equilibrium. In: Bronstein AM, Brandt T, Woollacott MH, eds. Clinical disorders of balance, posture and gait. London: Arnold, 1996:1-18.
- Massion J.** Positionnement de la tête et du tronc, équilibre et mouvement. In : Pélissier J, Brun V, Enjalbert M, eds. Posture, équilibration et médecine de rééducation. Paris : Masson, 1993:24-32.
- Massion J.** Postural control system. *Curr Opin Neurobiol* 1994;4:877-87.
- Massion J.** Postural control systems in developmental perspective. *Neurosci Biobehav Rev* 1998;22:465-72.
- Mauritz KH, Dichgans J, Hufschmidt A.** Quantitative analysis of stance in late cortical cerebellar atrophy of the anterior lobe and other forms of cerebellar ataxia. *Brain* 1979;102:461-482.
- Mauritz KH, Dietz V.** Characteristics of postural instability induced by ischemic blocking leg afferents. *Exp Brain Res* 1980;38:117-9.
- Mazevet D, Pradat-Diehl P, Katz R.** Physiologie et physiopathologie de la proprioception. In : Rodineau J, Ribinik P, eds. Proprioception : actualités 2004. Paris : Springer Verlag, 2004:23-34.
- McIntosh AS.** Rugby injuries. *Med Sport Sci* 2005;49:120-39.
- Mellion MB.** Common cycling injuries. Management and prevention. *Sports Med* 1991;11:52-70.
- Mello RG, Oliveira LF, Nadal J.** Anticipation mechanism in body sway control and effect of muscle fatigue. *J Electromyogr Kinesiol* 2007;17:739-46.
- Mesure S, Amblard B, Crémieux J.** Effect of physical training on head-hip co-ordinated movements during unperturbed stance. *Neuroreport* 1997;8:3507-12.
- Mesure S, Bonnet M, Crémieux J.** L'entraînement sportif peut-il influencer le contrôle postural statique ? *Sci Mot* 1994;21:39-47.

- Mesure S, Crémieux J, Amblard B.** Les effets de l'entraînement sur les stratégies d'ancrage de la tête. *In* : Gagey PM, Weber B, eds. Posturologie. Régulation et dérèglements de la station debout. Masson, Paris, 1995a:33-47.
- Mesure S, Crémieux J, Amblard B.** Les stratégies et performances posturales sensorimotrices : effet de l'entraînement. *Ann Kinésithér* 1995b;22:151-63.
- Mesure S, Crémieux J.** Contrôle de l'équilibre postural et effet de l'entraînement sportif. *Cinésiol* 1992;31:228-34.
- Meyer C, Gauchard GC, Deviterne D, Perrin PhP.** Cognitive task fulfilment may decrease gaze control performances. *Physiol Behav* 2007;92:861-6.
- Millet GY, Lepers R.** Alterations of neuromuscular function after prolonged running, cycling and skiing exercises. *Sports Med* 2004;34:105-16.
- Mirka A, Black FO.** Clinical applications of dynamic posturography for evaluating sensory integration of vestibular dysfunction. *Neurol Clin* 1990;8:351-9.
- Mittelstaedt H.** Interaction of eye-, head-, and trunk-bound information in spatial perception and control. *J Vestib Res* 1997;7:283-302.
- Mittelstaedt H.** Somatic graviception. *Biol Psychol* 1996;42:53-74
- Moeller L, Lempert T.** Mal de débarquement: pseudo-hallucinations from vestibular memory? *J Neurol* 2007;254:813-5.
- Montain SJ, Smith SA, Mattot RP, Zientara GP, Jolesz FA, Sawka MN.** Hypohydration effects on skeletal muscle performance and metabolism: a ³¹P-MRS study. *J Appl Physiol* 1998;84:1889-94.
- Morrillo M, Di Russo F, Pitzalis S, Spinelli D.** Latency of prosaccades and antisaccades in professional shooters. *Med Sci Sports Exerc* 2006;38:388-94.
- Mujika I, Padilla S.** Physiological and performance characteristics of male professional road cyclists. *Sports Med* 2001;31:479-87.
- Munoz DP, Everling S.** Look away: the anti-saccade task and the voluntary control of eye movement. *Nat Rev Neurosci* 2004;5:218-28.
- Nagy E, Toth K, Janositz G, Kovacs G, Feher-Kiss A, Angyan L, Horvath G.** Postural control in athletes participating in an ironman triathlon. *Eur J Appl Physiol* 2004;92(4-5):407-13.
- Napier SM, Baker RS, Sanford DG, Easterbrook M.** Eye injuries in athletics and recreation. *Surv Ophthalmol* 1996;41:229-44.
- Nardone A, Tarantola J, Galante M, Schieppati M.** Time course of stabilometric changes after a strenuous treadmill exercise. *Arch Phys Med Rehabil* 1998;79:920-24.

- Nardone A, Tarantola J, Giordano A, Schieppati M.** Fatigue effects on body balance. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1997;105:309-20.
- Nashner LM, McCollum G.** The organization of human postural movements: a formal basis and experimental synthesis. *Behav Brain Sci* 1985;8:135-72.
- Nashner LM, Peters JF.** Dynamic posturography in the diagnosis and management of dizziness and balance disorders. *Neurol Clin* 1990;8:331-49.
- Nashner LM, Woollacott M.** The organization of rapid postural adjustments of standing humans: an experimental-conceptual model. *In: Talbott RE, Humphrey DR, eds. Posture and movement.* New York: Raven Press, 1979:243-57.
- Nashner LM.** Computerized dynamic posturography. *In: Jacobson GP, Newman CW, Kartush JM, eds. Handbook of balance function testing.* London: Thomson Learning, 1997:280-307.
- Nashner LM.** Fixed patterns or rapid postural responses among leg muscles during stance. *Exp Brain Res* 1977;30:13-24.
- Neuhauser HK, Radtke A, von Brevern M, Lezius F, Feldmann M, Lempert T.** Burden of dizziness and vertigo in the community. *Arch Intern Med* 2008;168:2118-24.
- Nielsen B, Sjøgaard G, Ugelvig J, Knudsen B, Dohlmann B.** Fluid balance in exercise dehydration and rehydration with different glucose-electrolyte drinks. *Eur J Appl Physiol* 1986;55:318-25.
- Nishii T, Umemura Y, Kitagawa K.** Full suspension mountain bike improves off-road cycling performance. *J Sports Med Phys Fitness* 2004;44:356-60.
- Noé F, Amarantini D, Paillard T.** How experienced alpine-skiers cope with restrictions of ankle degrees-of-freedom when wearing ski-boots in postural exercises. *J Electromyogr Kinesiol* 2009;19:341-6.
- Noé F, Paillard T.** Is postural control affected by expertise in alpine skiing? *Br J Sports Med* 2005;39:835-7.
- Norré ME.** Posture in otoneurology. *Acta Otorhinolaryngol Belg* 1990;44:55-64.
- Ochsendorf DT, Mattacola CG, Arnold BL.** Effect of Orthotics on Postural Sway After Fatigue of the Plantar Flexors and Dorsiflexors. *J Athl Train* 2000;35:26-30.
- Okubo J, Watanabe I, Baron JB.** Study on influence of the plantar mechanoreceptor on body sways. *Agressologie* 1980;21:61-9.
- Paillard A, Denise P, Barraud PA, Roux A, Cian C.** The elevator illusion results from the combination of body orientation and egocentric perception. *Neurosci Lett* 2009;464:156-9.

- Paillard J.** Motor and representation framing in space. *In: Paillard J, ed. Brain and space.* Oxford: Oxford University Press, 1991:163-82.
- Paillard T, Montoya R, Dupui P.** Postural adaptations specific to preferred throwing techniques practiced by competition-level judoists. *J Electromyogr Kinesiol* 2007;17:241-4.
- Paillard T, Noé F, Rivière T, Marion V, Montoya R, Dupui P.** Postural performance and strategy in the unipedal stance of soccer players at different levels of competition. *J Athl Train* 2006;41:172-6.
- Paillard T, Noé F.** Effect of expertise and visual contribution on postural control in soccer. *Scand J Med Sci Sports* 2006;16:345-8.
- Parnes LS, McClure JA.** Free-floating endolymph particles: a new operative finding during posterior semicircular canal occlusion. *Laryngoscope* 1992;102:988-92.
- Patel AV, Mihalik JP, Notebaert AJ, Guskiewicz KM, Prentice WE.** Neuropsychological performance, postural stability, and symptoms after dehydration. *J Athl Train* 2007;42:66-75.
- Patel ND.** Mountain bike injuries and clipless pedals: a review of three cases. *Br J Sports Med* 2004;38:340-1.
- Patrick DL, Peach H, eds.** Disablement in the community. Oxford: Oxford University Press, 1989.
- Peltenburg AL, Erich WB, Bernink MJ, Huisveld IA.** Selection of talented female gymnasts, aged 8 to 11, on the basis of motor abilities with special reference to balance: a retrospective study. *Int J Sports Med* 1982;3:37-42.
- Pendergrass TL, Moore JH, Gerber JP.** Postural control after a 2-mile run. *Mil Med* 2003;168:896-903.
- Pérennou D, Amblard B.** La posture et l'équilibre. *J Réadapt Méd* 2001;21:19-29
- Perrin C, ed.** L'homme et ses espaces. Nancy : Presses Universitaires de Nancy, 1991.
- Perrin PhP, Béné MC, Perrin C, Durupt D.** Ankle trauma significantly impairs posture control: a study in basketball players and controls. *Int J Sports Med* 1997;18:387-92.
- Perrin PhP, Deviterne D, Hugel F, Perrot C.** Judo, better than dance, develops sensorimotor adaptabilities involved in balance control. *Gait Posture* 2002;15:187-94.
- Perrin PhP, Gauchard GC, Perrot C, Jeandel C.** Effects of physical and sporting activities on balance control in elderly people. *Br J Sports Med* 1999;33:121-6.
- Perrin PhP, Lestienne F, eds.** Mécanismes de l'équilibration humaine : Exploration fonctionnelle, application au sport et à la rééducation. Paris : Masson, 1994.

- Perrin PhP, Perrin C, Boura M, Uffholtz H, Conraux C.** Posturographie statique et dynamique. Application à une population de jeunes sportifs. *Ann Oto-Laryngol (Paris)* 1989;106:463-71.
- Perrin PhP, Perrin C, Courant Ph, Béné MC, Durupt D.** Posture in basketball players. *Acta Otorhinolaryngol Belg* 1991a;45:341-7.
- Perrin PhP, Perrin C.** Protocole d'appréciation de l'équilibration selon les disciplines sportives. In: Cesarini A, Alpini D, eds. *Disturbi dell'equilibrio in medicina del lavoro e medicina sportiva*. Springer Verlag, 1993:153-165.
- Perrin PhP, Perrot C, Deviterne D, Ragaru B, Kingma H.** Dizziness in discus throwers is related to motion sickness generated while spinning. *Acta Otolaryngol (Stockh.)* 2000;120:390-5.
- Perrin PhP, Schneider D, Deviterne D, Perrot C, Constantinescu L.** Training improves the adaptation to changing visual conditions in maintaining human posture control in a test of sinusoidal oscillation of the support. *Neurosci Lett* 1998;245:155-8.
- Perrin PhP, Vitte E, Pozzo T.** Equilibration dans les sports acrobatiques. *Cinésiologie* 1991b;30:277-85.
- Perrin PhP.** Rôle des activités physiques et sportives dans la maturation de la fonction d'équilibration chez l'enfant et chez l'adolescent. In : Clanet C, Collard M, Conraux C, Freyss G, Häusler R, Legent F, Morgon AH, Perrin C, Sans A, Sauvage JP, Toupet M, eds. *Vertiges 95*. Paris : Arnette Blackwell, 1996:97-109.
- Perrot C, Deviterne D, Perrin PhP.** Influence of training on postural and motor control in a combative sport. *J Hum Mov Stud* 1998;35:119-36.
- Perrot C, Moes R, Vançon G, Perrin PhP.** Rôle des afférences visuelles dans le contrôle postural chez les pratiquants de Boxe Française. *Arch Phys Biochem* 1996;104:624.
- Perrot C, Mur JM, Mainard D, Barrault D, Perrin PhP.** Influence of trauma induced by judo practice on postural control. *Scand J Med Sci Sports* 2000;10:292-7.
- Peterson CL, Ferrara MS, Mrazik M, Piland S, Elliott R.** Evaluation of neuropsychological domain scores and postural stability following cerebral concussion in sports. *Clin J Sport Med* 2003;13:230-7.
- Pierrot-Deseilligny C, Milea D, Muri RM.** Eye movement control by the cerebral cortex. *Curr Opin Neurol* 2004;17:17-25.
- Pierrot-Deseilligny C.** Contrôle du regard. 3. Déficits neurologiques. *Med Sci* 2004;20:357-62.

- Rademaker GGJ, ed.** Das stehen: statische reactionen, gleichwichtsreaktionen und muskeltonus unter besondere berucksichtigung ihres verhaltens bei kleinhirnlosen tieren. Berlin: Springer, 1931.
- Ramsdell KM, Mattacola CG, Uhl TL, McCrory JL, Malone TR.** Effects of two ankle fatigue models on the duration of postural stability dysfunction. *J Athl Train* 2001;36:S-33.
- Redfield RC, Self B, Fredrickson B, Kinard A.** Motion measurements in the jumping of a mountain bike. *Biomed Sci Instrum* 2004;40:43-50.
- Regueme SC, Barthèlemy J, Gauthier GM, Nicol C.** Changes in illusory ankle movements induced by tendon vibrations during the delayed recovery phase of stretch-shortening cycle fatigue: an indirect study of muscle spindle sensitivity modifications. *Brain Res* 2007;1185:129-35.
- Rezette D, Amblard B.** Orientation versus motion visual cues to control sensorimotor skills in some acrobatic leaps. *Hum Mov Sci* 1985;4:297-306.
- Robert G, Gueguen N, Avogadro P, Mouchnino L.** Anticipatory balance control is affected by loadless training experiences. *Hum Mov Sci* 2004;23:169-83.
- Roberts TDM, ed.** Neurophysiology of postural mechanisms. London: Butterworths, 1979.
- Roll JP, Roll R.** From eye to foot. A proprioceptive chain involved in postural control. In: Amblard B, Berthoz A, Clarac F, eds. Posture and gait: development, adaptation and modulation. Amsterdam: Elsevier Science, 1988:95-104.
- Roll JP, Vedel JP, Roll R.** Eye, head and skeletal muscle spindle feedback in the elaboration of body references. *Prog Brain Res* 1989;80:113-23.
- Roll R, Gilhodes JC, Roll JP, Popov K, Charade O, Gurfinkel VS.** Proprioceptive information processing in weightlessness. *Exp Brain Res* 1998;122:393-402.
- Roques CF, Lafont C, Marque P, Chatain M, Le Vour'ch P.** Pseudo-vertiges vestibulaires et pathologie de la colonne cervicale. In : Dupont Ph, ed. Les troubles de l'équilibre. Paris : Frison-Roche, 1992:73-80.
- Rozsasi A, Sigg O, Keck T.** Persistent inner ear injury after diving. *Otol Neurotol* 2003;24:195-200.
- Salavati M, Moghadam M, Ebrahimi I, Arab AM.** Changes in postural stability with fatigue of lower extremity frontal and sagittal plane movers. *Gait Posture* 2007;26:214-8.
- Salt AN.** Regulation of endolymphatic fluid volume. *Ann NY Acad Sci* 2001;942:306-12.
- Schieppati M, Nardone A, Schmid M.** Neck muscle fatigue affects postural control in man. *Neuroscience* 2003;121:277-85.

- Schuknecht HF.** Cupulolithiasis. *Arch Otolaryngol* 1969;90:765-78.
- Sellier P, Monpere C, Broustet JP.** Recommandations de la société française de cardiologie concernant la pratique des épreuves d'effort chez l'adulte en cardiologie. *Arch Mal Coeur* 1997;90:77-91.
- Sesboüé B, Guincestre JY.** Muscular fatigue. *Ann Readapt Med Phys* 2006;49:257-64.
- Sherrington C, ed.** The integrative action of the nervous system, 2nd ed. New Haven: Yale University Press, 1947.
- Sherrington C, ed.** The integrative action of the nervous system. New Haven: Yale University Press, 1906.
- Sibel G, Irolla E, Lallemant JG.** Electronystagmographie. In : Péliissier J, BrunV, Enjalbert M, eds. Posture, équilibration et médecine de rééducation. Paris : Masson, 1993:63-70.
- Smetacek V, Mechsner F.** Making sense. *Nature*. 2004;432:21.
- Soetiching JF, Berthoz A.** Dynamic role of vision in the control posture in man. *Exp Brain Res* 1979;36:551-61.
- Speers RA, Paloski WH, Kuo AD.** Multivariate changes in coordination of postural control following spaceflight. *J Biomech* 1998;31:883-9.
- Stahle J.** Medical treatment of fluctuant hearing loss in Meniere's disease. *Am J Otol* 1984;5:529-33.
- Tagushi K.** Spectral analysis of the movement of the centre of gravity in vertiginous and ataxic patients. *Agressologie*, 1978;19B:69-70.
- Takahashi M, Igarashi M, Homick JL.** Effect of otolith end organ ablation on horizontal optokinetic nystagmus in the squirrel monkey. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec* 1977;39:74-81.
- Tanguy SG, Quarck GM, Etard OM, Gauthier AF, Denise P.** Are otolithic inputs interpreted better in figure skaters? *Neuroreport* 2008a;19:565-8.
- Tanguy SG, Quarck GM, Etard OM, Gauthier AF, Denise P.** Vestibulo-ocular reflex and motion sickness in figure skaters. *Eur J Appl Physiol* 2008b;104:1031-7.
- Thoumie P, Do MC.** Changes in motor activity and biomechanics during balance recovery following cutaneous and muscular deafferentation. *Exp Brain Res* 1996;110:289-97.
- Tjernström F, Fransson PA, Hafström A, Magnusson M.** Adaptation of postural control to perturbations – a process that initiates long-term motor memory. *Gait Posture* 2002;15:75-82.

- Trousselard M, Barraud PA, Nougier V, Raphel C, Cian C.** Contribution of tactile and interoceptive cues to the perception of the direction of gravity. *Brain Res Cogn Brain Res* 2004;20:355-62.
- Union Cycliste Internationale.** <http://www.uci.ch/> (page consultée le 28 septembre 2010), 2010a.
- Union Cycliste Internationale.** UCI Constitution and Regulations. Part I: General organisation of cycling as a sport. 2010b;E0710:1-82.
- Union Cycliste Internationale.** UCI Constitution and Regulations. Part IV: Mountain Bike Races. 2010c;E0109:1-66.
- Vallier JM, Grego F, Basset F, Lepers R, Bernard T, Brisswalter J.** Effect of fluid ingestion on neuromuscular function during prolonged cycling exercise. *Br J Sports Med* 2005; 39(4):e17.
- Vibert D, Redfield RC, Häusler R.** Benign paroxysmal positional vertigo in mountain bikers. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 2007;116:887-90.
- Vitte E, Lazennec JY, Pharaboz C, Freyss G.** Equitest et pathologie du rachis cervical. *Rev Méd Orthop* 1991;25:3-7.
- Vitte E.** Vertiges : clinique et explorations. In : Dupont Ph, ed. Les troubles de l'équilibre. Paris : Frison-Roche, 1992:27-43.
- Vouriot A, Gauchard GC, Chau N, Benamghar L, Lepori ML, Mur JM, Perrin PhP.** Sensorial organisation favouring higher visual contribution is a risk factor of falls in an occupational setting. *Neurosci Res* 2004;48:239-47.
- Vuillerme N, Anziani B, Rougier P.** Trunk extensor muscles fatigue affects undisturbed postural control in young healthy adults. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2007;22:489-94.
- Vuillerme N, Danion F, Forestier N, Nougier V.** Postural sway under muscle vibration and muscle fatigue in humans. *Neurosci Lett* 2002a;333:131-5.
- Vuillerme N, Danion F, Marin L, Boyadjian A, Prieur JM, Weise I, Nougier V.** The effect of expertise in gymnastics on postural control. *Neurosci Lett* 2001a;303:83-6.
- Vuillerme N, Forestier N, Nougier V.** Attentional demands and postural sway: the effect of the calf muscles fatigue. *Med Sci Sports Exerc* 2002b;34:1907-12.
- Vuillerme N, Hintzy F.** Effects of a 200 W-15 min cycling exercise on postural control during quiet standing in healthy young adults. *Eur J Appl Physiol* 2007;100:169-75
- Vuillerme N, Nougier V, Prieur JM.** Can vision compensate for a lower limbs muscular fatigue for controlling posture in humans? *Neurosci Lett* 2001b;308:103-6.

- Vuillerme N, Pinsault N, Vaillant J.** Postural control during quiet standing following cervical muscular fatigue: effects of changes in sensory inputs. *Neurosci Lett* 2005;378:135-9.
- Vuillerme N, Pinsault N.** Re-weighting of somatosensory inputs from the foot and the ankle for controlling posture during quiet standing following trunk extensor muscles fatigue. *Exp Brain Res* 2007;183:323-7.
- Wardak C, Duhamel JR.** Contrôle du regard. 1. Le rôle du cortex pariétal. *Med Sci* 2004;20:89-97.
- Warner SE, Shaw JM, Dalsky GP.** Bone mineral density of competitive male mountain and road cyclists. *Bone* 2002;30:281-6.
- Wasserman K, Hansen J, Sue D, Whipp B.** Normal values. In: Wasserman K, Hansen J, Sue D, Whipp B, eds. *Principles of Exercise Testing and Interpretation*. Philadelphia: Lea and Fibiger, 1987:72-85.
- Wasserman KB, Whipp BJ, Kayal SN, Beaver WL.** Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol* 1973;36:236-43.
- Wilber RL, Zawadzki KM, Kearney JT, Shannon MP, Disalvo D.** Physiological profiles of elite off-road and road cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 1997;29:1090-4.
- Wilkins JC, Valovich McLeod TC, Perrin DH, Gansneder BM.** Performance on the Balance Error Scoring System Decreases After Fatigue. *J Athl Train* 2004;39:156-161.
- Wolfson L, Whipple R, Derby C, Judge J, King M, Amerman P, Schmidt J, Smyers D.** Balance and strength training in older adults: intervention gains and Tai Chi maintenance. *J Am Geriatr Soc* 1996;44:498-506.
- Woollacott MH, Shumway-Cook A.** Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research. *Gait Posture* 2002;16:1-14.
- Wrisley DM, Stephens MJ, Mosley S, Wojnowski A, Duffy J, Burkard R.** Learning effects of repetitive administrations of the Sensory Organization Test in healthy young adults. *Arch Phys Med Rehabil* 2007;88:1049-54.
- Wu GE, Chiang JH.** The significance of somatosensory stimulations to the human foot in the control of postural reflexes. *Exp Brain Res* 1997;114:163-9.
- Yardley L, Owen N, Nazareth I, Luxon L.** Prevalence and presentation of dizziness in a general practice community sample of working age people. *Br J Gen Pract* 1998;48:1131-5.
- Young LR.** Pursuit eye movements. What is being pursued? In: Beker R, Berthoz A, eds. *Control of gaze by brainstem neurons*. Amsterdam: Elsevier, 1977:29-36.

Zanetti C, Schieppati M. Quiet stance control is affected by prior treadmill but not overground locomotion. *Eur J Appl Physiol* 2007;100:331-9.

Zemková E, Hamar D. The effect of 6-week combined agility-balance training on neuromuscular performance in basketball players. *J Sports Med Phys Fitness* 2010;50:262-7.

XI – Annexes

Annexe 1 : Journal of Electromyography and Kinesiology 2009;19:623-630

Differentiated influence of off-road and on-road cycling practice on balance control and the related-neurosensory organization

Alexis Lion^a, Gérome C. Gauchard^{a,b}, Dominique Deviterne^a, Philippe P. Perrin^{a,b,c,*}

^a Nancy-University, Henri Poincaré University, Balance Control and Motor Performance, UFR STAPS, 54600 Villers-lès-Nancy, France

^b National Institute for Health and Medical Research (INSERM), ERI 11, Faculty of Medicine, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

^c Department of ENT, University Hospital of Nancy, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

Received 1 October 2007; received in revised form 17 March 2008; accepted 20 March 2008

Abstract

This study aimed to determine the sensorimotor strategies privileged by mountain bikers (MTB) and road cyclists (RC) for balance control. Twenty-four MTB and 24 RC (off-road Olympics, world, continental and national champions, Tour-de-France participants, on-road world cup race winner) volunteered to answer a questionnaire about the characteristics of cycling practice and perform a sensory organization test, aiming to evaluate balance control in 6 different sensory situations based upon visual and support surface perturbations (C1^{ES} to C6^{ES}). RC balance performances were better than those of MTB both during quiet stance eyes opened (C1^{ES}, $p = 0.011$) and when only somatosensory information is disrupted (C4^{ES}, $p = 0.039$), highlighting a higher use of vision to control balance in RC. Moreover, a positive correlation was shown in the whole population (MTB + RC) between the visual ratio ($R^{VIS} = C4^{ES}/C1^{ES}$) and the proportion of riding distance of on-road cycling ($\rho = 0.28$, $p = 0.054$). In MTB, the use of proprioception (somatosensory ratio: $R^{SOM} = C2^{ES(eyes\ closed)}/C1^{ES}$) was increased by a higher intensity of off-road cycling ($\rho = 0.49$, $p = 0.018$) and that of vision (R^{VIS}) by a higher intensity of on-road cycling ($\rho = 0.41$, $p = 0.048$). The difference in sensory organization between MTB and RC could be explained by adaptive processes elaborated from environmental stimulations and technical specificities of these disciplines. © 2008 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Balance control; Sensory organization; On-road cycling; Off-road cycling; Posturography

1. Introduction

Postural control is a complex sensorimotor function allowing body space orientation and posture stabilization (Massion, 1994), which requires the central processing of sensory information from the visual, the vestibular and the somatokinesthetic systems, in order to organize an adequate motor response aiming at gaze and posture stabilization according to the expected task and to the cognitive and environmental contexts. The capacity to use information varying from one subject to another, neurosensory specific-

ities can be observed, especially with the practice of physical and sporting activities, both in terms of type and level of practice and their related pathologies (Hugel et al., 1999; Guskiewicz et al., 2001; Perrin et al., 2002; Davlin, 2004; Paillard et al., 2007). In this respect, judoka use better somatokinesthetic information than dancers who rely more on visual information (Hugel et al., 1999; Perrin et al., 2002). Moreover, generally, the higher the level of practice is, the more appropriate the sensory organization is, and so the higher the postural performance (Vuillerme et al., 2001a; Paillard et al., 2006). Nevertheless, for certain disciplines like skiing, the repetitive wearing of specific equipment, such as ski boots, could lead to a related modification of sensory organization in elite skiers and decrease postural performance when balance control evaluation is performed in a barefooted condition (Noé and Paillard, 2005).

* Corresponding author. Address: Nancy-University, Henri Poincaré University, Balance Control and Motor Performance, UFR STAPS, 54600 Villers-lès-Nancy, France. Tel.: +33 383 682 929; fax: +33 383 154 647.

E-mail address: philippe.perrin@staps.uhp-nancy.fr (P.P. Perrin).

Studies about cycling – off-road or on-road – are numerous, but mainly concern energetic capacities and their repercussions on performance. In this respect, it has been shown that mountain bikers (MTB) and road cyclists (RC) developed differently not only the energetic capacities (Wilber et al., 1997; Lee et al., 2002) but also the bone characteristics (Warner et al., 2002). Aerobic metabolism explained only 40 % of the variance of off-road cycling performances between MTB, other physiological and technical factors being implicated in off-road cycling performances among elite MTB (Impellizzeri et al., 2005). Moreover, mountain bikers produced higher power outputs relative to body mass than road cyclists at maximal exercise, at lactate threshold and during a 30 min time-trial, indicating high power-to-weight characteristics (Lee et al., 2002). Furthermore, maintaining an appropriate posture on bike seems to be a fundamental base to ensure the highest performances (Grappe, 2005; Duc et al., 2008). It consists in adapting the body position in relation to the bike position to assure optimal propulsion and steering and to avoid falling. This individual/bike system adaptation has to take into account the environment, which is quite stable for RC and always unstable for MTB. In this respect, these technical and environmental differences of the individual/bike/environment settings between off-road and on-road cycling should lead to a different central processing of sensory information and induce specific motor responses. Indeed, constant change of gaze, in the distance and ahead on the track to select the best path in off-road cycling and on the road and/or on the cyclists in front to avoid falls in on-road cycling, and exploration of the surrounds, which is larger in MTB than in RC, are specific behaviors requiring particular motor learning processes, especially in terms of balance regulation. In addition, individual/bike system equilibrium depends also on the speed with repercussions on the stability of the system according to, among others, the gyroscopic forces (Jones, 1970), leading to less important balance constraints in RC than in MTB. Nevertheless, to our knowledge, no study has examined equilibrium skills neither in MTB nor in RC. In this respect, according to the high equilibrium constraints, MTB should rely more on somesthetic information to find a rapid and adapted motor response to the balance instability induced by the environment, whereas RC, on account of a lesser balance need, should rely more on vision to anticipate the following motor movement. Thus, this study aimed to understand the specific variations in terms of sensory-motor postural strategies and related-neurosensory organization of these two cycling specialties, i.e. off-road and on-road cycling.

2. Methods

2.1. Participants

This study was conducted in the Nancy University Hospital (in north-eastern France) on female and male RC and MTB who practice their sport regularly in competitions. All the participants

gave informed consent before data collection and the tests were carried out in the balance laboratory of the University Hospital of Nancy, France (Ministry of Health agreement for research) in accordance with the current ethical laws of France. All the subjects were licensed at the French cycling federation. Every participant was free from any known pathology of the central nervous system or showed any orthopedic disorders either of the trunk or the lower limbs that could affect postural performance. Twenty-four MTB (4 women and 20 men, 7 years of practice) and 24 male RC (8 years of practice) both involved in international (off-road Olympics, world and continental champions, participants in the Tour de France, on-road junior world cup race winner), national (off-road and on-road national champions) and regional levels participated in the study.

2.2. Questionnaire

All the cyclists filled in a questionnaire intended to evaluate the body characteristics (age, weight, height) and the intensity of off-road and on-road practice. The yearly riding distance (in kilometers) and the yearly riding time (in hours) were the essential information. The proportion of riding distance on-road compared to the total riding distance was calculated: $\%D = D_{onR} / (D_{onR} + D_{offR})$, where D_{onR} and D_{offR} are the yearly on-road and off-road riding distance, respectively. Moreover, the proportion of riding time on-road compared to the total riding time was calculated: $\%T = T_{onR} / (T_{onR} + T_{offR})$, where T_{onR} and T_{offR} are the yearly on-road and off-road riding time, respectively. $\%D$ and $\%T$ are used to estimate the proportion of on-road training on the total riding training especially for MTB.

2.3. Balance control evaluation

All the subjects were tested on a computerized dynamic posturography platform (EquiTest®, Clackamas, OR). The Sensory Organization Test (SOT) evaluates the subject's ability to make effective use of visual, vestibular and somatosensory inputs and to suppress sensory information that is inappropriate. To give inadequate information, somatosensory and visual cues are disrupted using a technique commonly referred to as sway-referenced. This technique involves tilting the support surface and/or the visual surround to directly follow the subject's anterior-posterior center of gravity (CoG) sway (Nashner and Peters, 1990).

Computerized dynamic posturography provides functional information regarding how well an individual can use balance and an indication of the importance of a patient's balance disturbance on activities of daily living (Furman, 1994). To be useful, all balance measuring tools must be scientifically sound in terms of three basic psychometric properties: reliability, responsiveness (sensitivity of change), and predictive validity (Chien et al., 2007). In terms of reliability, most of the equilibrium scores on SOT present a fair to good reliability, over a two-day period in healthy young adults (Wrisley et al., 2007) and a one-week period in non-institutionalized healthy older adults (Ford-Smith et al., 1995). In the same way, high test-retest reliability over a 2-week period was found for CES in patients with chronic stroke (Chien et al., 2007). On the other hand, in patients with chronic low back pain, the results of intra- and long-term inter-session reliability of SOT measures showed a significant learning effect, that might limit the clinical application in rehabilitation everyday practice (Leitner et al., 2007; Wrisley et al., 2007). Nevertheless, SOT has been

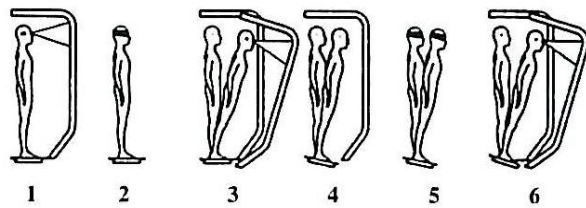


Fig. 1. The six conditions of the SOT (EquiTest®, Clackamas, OR). Conditions 1–3 were performed on a fixed platform with eyes opened, eyes closed, and vision sway-referenced (moving panorama). Conditions 4–6 were performed on a sway-referenced platform (moving platform) with eyes open, eyes closed and vision sway-referenced (moving panorama).

recognized as a reliable tool for identifying subjects with enhanced equilibrium skills, especially when it is performed once only for each participant, as in the present study (Diard et al., 1997).

The SOT is composed of six conditions (Fig. 1). The first two conditions provide a basic measurement of the subject's stability; the support is fixed and the subject's eyes are opened (C1) or closed (C2). In condition 3 (C3), the support surface remains fixed while the subject stands, eyes open, within a sway-referenced visual surround. For conditions 4–6, the somatosensory information is systematically disrupted (sway-referenced) and the vision is fixed (C4), absent (C5) and sway-referenced (C6), respectively. The subject's task is to maintain an upright stance during the three 20 s trials of each condition with as little postural sway as possible and without moving the feet. The subjects wore a harness which was attached to the ceiling to prevent injury in the case of a fall. When the subject required the assistance of this harness or took a step, the test was rated as a fall.

The equilibrium score (ES) was calculated by comparing the subject's anterior–posterior (AP) sway during each 20 s SOT trial to the maximal theoretical sway limits of stability (8.5° anteriorly and 4° posteriorly). A score of 100 represents no sway, while 0 indicates sway that exceeds the limit of stability, resulting in a fall. A composite equilibrium score (C^{ES}) was calculated by independently averaging the scores for conditions 1 and 2, then adding them to the equilibrium scores from each trial of sensory conditions 3–6, and finally dividing this sum by the total number of trials. In order to identify the significance of each sensory system influencing postural control, the ratios of $C2^{ES}/C1^{ES}$ (R^{SOM}), $C4^{ES}/C1^{ES}$ (R^{VIS}) and $C5^{ES}/C1^{ES}$ (R^{VEST}) were interpreted as

reflecting the somatosensory, visual and vestibular functions, respectively. The effect of altering visual preference (R^{PREF}) on postural stability was also determined by calculating the ratio of $(C3^{ES} + C6^{ES})/(C2^{ES} + C5^{ES})$ (Nashner and Peters, 1990; Nashner, 1997).

2.4. Statistical analysis

Results were expressed as median, first quartile (Q_1) and third quartile (Q_3). Comparisons between the two groups (MTB and RC) were produced using a non-parametric Mann & Whitney test (U, independent group comparison test) on account of the relatively small sample size. The correlations between intensity of practice and SOT performance were produced using Spearman's rank correlation test (ρ , rank correlation) in the entire group (MTB + RC) and in the MTB group. A probability level of $p \leq 0.05$ was used as an indicator of significance for all the analyses.

3. Results

No statistically significant differences were observed between MTB and RC groups for age, height and weight parameters, as well as body mass index (Table 1).

Table 2 presents training characteristics both for MTB and RC. MTB practiced both off-road and on-road cycling whereas RC practiced only on-road cycling. Moreover, the intensity of road training of MTB is lower than that of RC, statistical differences being observed between the two

Table 1

Median values, associated with the first (Q_1) and third (Q_3) quartiles, of the age, height, weight and body mass index (BMI) in mountain bikers (MTB) and road cyclists (RC)

	MTB ($n = 24$) median (Q_1, Q_3)	RC ($n = 24$) median (Q_1, Q_3)	U Mann & Whitney MTB vs. RC z-value, p
Age (years)	20.5 (17.6, 24.5)	22.1 (18.6, 27.4)	$z = -1.57$, NS
Height (m)	1.77 (1.73, 1.80)	1.80 (1.76, 1.84)	$z = -1.91$, NS
Weight (kg)	63.0 (61.0, 69.5)	68.5 (64.0, 73.5)	$z = -1.79$, NS
BMI (kg m^{-2})	21.0 (19.8, 21.6)	21.1 (19.6, 22.4)	$z = -0.86$, NS

NS = non-significant.

Table 2

Median values, associated with the first (Q_1) and third (Q_3) quartiles, of the different parameters of off-road (offR) and on-road (onR) cycling training observed in mountain bikers (MTB) and road cyclists (RC)

	MTB + RC ($n = 48$) median (Q_1, Q_3)	MTB ($n = 24$) median (Q_1, Q_3)	RC ($n = 24$) median (Q_1, Q_3)	U Mann & Whitney MTB vs. RC z-value, p
Off-road cycling				
Distance (km/year)	1500 (0, 3000)	3000 (1900, 4750)	0 (0, 0)	$z = -6.13$, $p < 0.001$
Time (h/year)	58 (0, 200)	200 (100, 300)	0 (0, 0)	$z = -6.13$, $p < 0.001$
On-road cycling				
Distance (km/year)	8000 (4500, 12000)	4500 (2000, 7500)	12000 (8250, 15000)	$z = -4.29$, $p < 0.001$
Time (hours/year)	255 (150, 400)	172 (73, 255)	392 (260, 500)	$z = -4.52$, $p < 0.001$
Ratios				
% D^a	0.89 (0.60, 1.00)	0.60 (0.33, 0.78)	1.00 (1.00, 1.00)	$z = -6.13$, $p < 0.001$
% T^b	0.87 (0.48, 1.00)	0.48 (0.17, 0.67)	1.00 (1.00, 1.00)	$z = -6.13$, $p < 0.001$

^a % $D = D_{\text{onR}} / (D_{\text{onR}} + D_{\text{offR}})$.

^b % $T = T_{\text{onR}} / (T_{\text{onR}} + T_{\text{offR}})$.

Table 3

Median values, associated with the first (Q_1) and third (Q_3) quartiles, of the equilibrium scores for the six conditions ($C1^{ES}$, $C2^{ES}$, $C3^{ES}$, $C4^{ES}$, $C5^{ES}$ and $C6^{ES}$) and the composite equilibrium score (C^{ES}) of the sensory organization test, and of the different ratios (R^{SOM} , R^{VIS} , R^{VEST} and R^{PREF}) observed in mountain bikers (MTB) and road cyclists (RC)

	MTB ($n = 24$) median (Q_1, Q_3)	RC ($n = 24$) median (Q_1, Q_3)	U Mann & Whitney MTB vs. RC z-value, p
$C1^{ES}$	95.00 (94.33, 95.75)	95.67 (95.00, 96.33)	$z = -2.51, p = 0.011$
$C2^{ES}$	92.58 (91.66, 93.66)	93.25 (92.50, 94.17)	$z = -1.81, NS$
$C3^{ES}$	93.16 (91.00, 94.50)	93.50 (92.00, 95.00)	$z = -1.03, NS$
$C4^{ES}$	89.66 (86.66, 91.33)	91.16 (89.16, 92.83)	$z = -2.05, p = 0.039$
$C5^{ES}$	71.50 (60.66, 74.66)	71.16 (66.33, 73.67)	$z = -0.48, NS$
$C6^{ES}$	78.66 (71.83, 81.66)	80.50 (70.33, 83.83)	$z = -0.85, NS$
C^{ES}	83.50 (80.00, 86.00)	85.50 (83.00, 87.00)	$z = -1.60, NS$
R^{SOM}	0.97 (0.96, 0.99)	0.97 (0.96, 0.99)	$z = -0.22, NS$
R^{VIS}	0.95 (0.91, 0.96)	0.95 (0.94, 0.97)	$z = -1.14, NS$
R^{VEST}	0.75 (0.65, 0.79)	0.74 (0.69, 0.78)	$z = -0.28, NS$
R^{PREF}	1.05 (1.01, 1.07)	1.05 (1.02, 1.08)	$z = -0.27, NS$

NS = non-significant.

groups for the distance ($z = -4.29, p < 0.001$) and time ($z = -4.52, p < 0.001$) parameters.

Table 3 shows the results observed for the SOT. The postural performances of RC were higher than those of MTB, statistically significant differences being observed for $C1^{ES}$ ($z = -2.51, p = 0.011$) and $C4^{ES}$ ($z = -2.05, p = 0.039$) only.

Furthermore, the rank's correlations of the entire group between postural performances and cycling intensity showed that the greater the off-road practice is, the lower are the postural performances in $C1^{ES}$ and $C4^{ES}$. Off-road training intensity (distance and time training) was negatively correlated to $C1^{ES}$ and $C4^{ES}$. Moreover, the proportion of on-road training to total training ($\%D$ and $\%T$) was positively correlated to $C1^{ES}$ and $C4^{ES}$ (Table 4).

Thus, Table 4 shows that the proportion of on-road distance was positively correlated to R^{VIS} . For the correlations in the MTB group only, the longer the off-road distance, the higher the R^{SOM} . Moreover, on-road distance was positively correlated to R^{VIS} .

4. Discussion

This study showed that postural performances of RC were higher than those of MTB in $C1^{ES}$ and $C4^{ES}$. Moreover, balance-related visual information is better used by RC and MTB, who practiced the most on-road cycling. Somesthetic information is better used in MTB, who practiced the most off-road cycling.

4.1. Role of environment and equipment on cyclists balance control

One of the priorities of cycling, both in off-road and on-road cycling, is to ensure the highest propulsion by the best grip on the ground, and with the least energetic expenditure. Posture being a key component of all perception/action systems, it can be considered as a primary support for the exploration of the surrounding space in terms of

perceptual analysis and motor action and can also serve as a mechanical support for action (Massion and Woollacott, 1996). In on-road cycling, the environment is quite stable and therefore allows slow but accurate postural regulation on the bike. Posture is therefore steady and thus permits an increase in pedaling efficiency and a decrease in energy expenditure. On the other hand, in off-road cycling, the environment is often unstable and changing (Gregory et al., 2007) and therefore requiring fast but less precise balance reactions, allowing more spatial exploration around the individual/bike system. Then posture is unsteady but relatively controlled to ensure a permanent grip between ground and bike's wheels.

In off-road and on-road cycling, the bicycle stability arises from rider's skill, physical and mechanical properties of the bike (bike features, speed, gyroscopic forces, etc.). A bicycle pushed and released riderless will stay up on its own, travelling in a long curve and finally collapsing after 20 s, compared to the 2 s it would take if static. Clearly, the machine has a large measure of self-stability. In this respect, the faster a bicycle moves the easier it is to ride (Jones, 1970). Thus, higher balance forces and higher balance skills are required to maintain balance at low speed than at high speed. In this way, low speed, which is more common in off-road than in on-road cycling, could lead to that the cyclists rely much more on somesthetic information to control balance.

The bike features, and especially tire features (size, tread and structure), which lead to have the best grip with the lowest resistance force, have an effect on balance in on-road cycling and much more in mountain biking. The repercussions, of the low balance constraints in on-road cycling, on tires choice are minor and concern mainly the grip. In this way, the tires are often the same whatever the road surface is. The mainly modification on tire size is related to a lower tire inflation, increasing the tread and allowing a better grip and equilibrium, observed when the road surface is wet. In off-road cycling, the choice of tires, linked to the high balance constraints, depends not

Table 4

Spearman's rank correlation coefficient between the different parameters of off-road and on-road cycling training and the equilibrium scores for two conditions (C1^{ES} and C4^{ES}), only for MTB + RC group, and the SOT sensory ratios (R^{SOM} , R^{VIS} and R^{VEST}) in the MTB + RC group ($n = 48$) or in the MTB group ($n = 24$)

	Spearman's rank correlation; ρ -value, p					
	D_{offR}	T_{offR}	D_{onR}	T_{onR}	$\%D^a$	$\%T^b$
<i>MTB + RC group</i>						
C1 ^{ES}	$\rho = -0.36, p = 0.012$	$\rho = -0.37, p = 0.012$	$\rho = 0.19, \text{NS}$	$\rho = 0.21, \text{NS}$	$\rho = 0.35, p = 0.017$	$\rho = 0.35, p = 0.015$
C4 ^{ES}	$\rho = -0.31, p = 0.035$	$\rho = -0.33, p = 0.022$	$\rho = 0.27, \text{NS}$	$\rho = 0.22, \text{NS}$	$\rho = 0.38, p = 0.009$	$\rho = 0.36, p = 0.012$
R^{SOM}	$\rho = 0.06, \text{NS}$	$\rho = 0.02, \text{NS}$	$\rho = 0.10, \text{NS}$	$\rho = 0.12, \text{NS}$	$\rho = -0.01, \text{NS}$	$\rho = 0.07, \text{NS}$
R^{VIS}	$\rho = -0.17, \text{NS}$	$\rho = -0.21, \text{NS}$	$\rho = 0.25, \text{NS}$	$\rho = 0.17, \text{NS}$	$\rho = 0.28, p = 0.054$	$\rho = 0.26, \text{NS}$
R^{VEST}	$\rho = 0.03, \text{NS}$	$\rho = 0.01, \text{NS}$	$\rho = 0.18, \text{NS}$	$\rho = 0.22, \text{NS}$	$\rho = 0.06, \text{NS}$	$\rho = 0.07, \text{NS}$
<i>MTB group</i>						
R^{SOM}	$\rho = 0.49, p = 0.018$	$\rho = 0.34, \text{NS}$	$\rho = -0.09, \text{NS}$	$\rho = -0.12, \text{NS}$	$\rho = -0.29, \text{NS}$	$\rho = -0.26, \text{NS}$
R^{VIS}	$\rho = 0.09, \text{NS}$	$\rho = -0.03, \text{NS}$	$\rho = 0.41, p = 0.048$	$\rho = 0.25, \text{NS}$	$\rho = 0.30, \text{NS}$	$\rho = 0.20, \text{NS}$
R^{VEST}	$\rho = 0.13, \text{NS}$	$\rho = 0.05, \text{NS}$	$\rho = 0.27, \text{NS}$	$\rho = 0.34, \text{NS}$	$\rho = 0.18, \text{NS}$	$\rho = 0.20, \text{NS}$

NS = non-significant.

^a $\%D = D_{\text{onR}} / (D_{\text{onR}} + D_{\text{offR}})$.

^b $\%T = T_{\text{onR}} / (T_{\text{onR}} + T_{\text{offR}})$.

only on the ground characteristics but also on the preferences of the riders. In this way, big tire size with few bulky studs is generally used in muddy conditions, although some riders prefer use small tire size. In both cases, low tire inflation allows bump's absorption, better grip and balance. In opposite, small tire size with high tire inflation is often used in dried conditions (Absalon et al., 2006). The tires have an important effect on grip in on- and off-road cycling, and inappropriate tires choices can have dramatically effect on balance especially for MTB.

4.2. Role of visual system on balance control

In general, physical activities improve postural efficiency, which results from the different sensors becoming more sensitive and from the development of a sensory hierarchy regarding proprioceptive preference (Mesure et al., 1997; Perrin et al., 1998; Gauchard et al., 1999). On the other hand, certain physical activities like classical dance are related to a sensory hierarchy leading to a higher contribution of visual information to control balance (Perrin et al., 2002).

The results show that the postural control of RC was better than that of MTB, especially when the somatokinesthetic information was disrupted, that could be explained by a better use of visual information in RC. Visual afferent, which is a determining sensory information for maintaining equilibrium (Vuillerme et al., 2001b), allows both the use of external landmarks and the estimation of the displacements of the subject and/or the environment (Berencsi et al., 2005).

In on-road cycling, vision is a predominant information source for positioning the bike in relation to other cyclists and to the environment, and its efficiency is even more important since there is little disturbance of this type of information during exercise. Thus, cyclists ensure balance by watching the profile of the road, the back wheel and the shoulders of the cyclists in front of them. In addition, by looking far forward, vision leads to anticipate and pro-

gram the adapted motor response to the following part to ride. Moreover, the more on-road training MTB did, the greater is the use of visual input. Hence, on-road cycling training, both for RC and MTB, results in the preferential use of visual information to ensure postural control and more generally motor action.

4.3. Role of vestibular system on balance control

In off-road cycling, vision, vestibular and somatosensory information is more often disturbed by the vegetation and the vibrations induced by the ground surface (roots, mud, stones, ruts, etc.). Although the use of suspension may limit these vibrations (MacRae et al., 2000; Nishii et al., 2004) and the use of glasses may protect the eyes, the vision in particular is still disturbed depending on the difficulty in using vestibulo-ocular reflex (oscillopsia) and visuo-oculomotor function, and equilibrium is therefore unstable.

In this study, when vision was suppressed or disrupted, the postural performances of RC were no worse than those of MTB. Moreover, when vestibular information was the only reliable information, the postural control of MTB and of RC was similar. The development and use of the vestibular function do not vary according to cycling specificity. As shown in gymnasts (Balter et al., 2004), the different postural strategies are primarily achieved through motor training and not by learning abilities or a higher sensitivity of the vestibular system.

In mountain biking, the vibrations could alter the vestibular information. Moreover, the vestibule is solicited by repeated acceleration-deceleration events, which might generate displacement and/or dislocation of otoconia from the otolithic organs, inducing the typical symptoms of benign paroxysmal positional vertigo (Vibert et al., 2007). Furthermore, the information concerning the balance instability given by the vestibule, which is on the top of the individual/bike system and which is impaired by the vibrations (especially in mountain biking), are not reliable

and cannot lead to an adapted motor response when an eventually fall has strongly begun.

4.4. Role of somatokinesthetic system and motor effector on balance control

Surprisingly, off-road cycling training, which is performed in an unstable environment, does not lead to a better usage of somesthetic cues. Nevertheless, in MTB, the more the off-road practice is, the greater is the use of proprioceptive information.

Muscular component is an important factor leading balance control. In this way, muscular strength seems to be related with good balance stability in elderly (Gauchard et al., 1999) and healthy young adults (Angyán et al., 2007). Furthermore, Chapman et al. (2007) have shown that muscle recruitment is highly skilled in highly trained cyclists and less refined in novice cyclists. More skilled muscle recruitment in highly trained cyclists is likely a result of neuromuscular adaptations due to repeated performance of the cycling movement in training and competition. Then, muscle recruitment and muscular strength, which might be different between novice and highly trained riders, could induce a different usage of muscular information.

As has already been shown in judoka (Perrin et al., 1998, 2002), gymnasts (Vuillerme et al., 2001a) and dancers (Golomer et al., 1999; Golomer and Dupui, 2000), proprioception is an important source of information in MTB who practice more intensively. MTB do not master the use of visual and vestibular information and have to rely more on proprioceptive information. The proprioceptive preference of those who practice more off-road cycling could also be related to the importance of perceiving the bike's position and of reacting quickly (Ledin and Odkvist, 1991; Bagesteiro et al., 2006). Indeed, the postural instability induced by the irregularity of ground surface constrains MTB to choose rapidly the most appropriate and efficient motor response.

The better use of proprioceptive information in balance control for the more trained MTB could be also linked to the habituation of the vibrations induced by the ground surface. The estimation of muscle length is impaired by the vibrations and could induce kinesthetic illusions. Thus, the perception of the position of the articulation is wrong, because the central nervous system overestimates the length of the muscle (Grappe, 2005), in this way the spindle discharge is interpreted as muscle lengthening and limb displacement (Goodwin et al., 1972). The muscular strength and the habituation could be the two main mechanisms leading a control of impaired information induced by the vibrations in best MTB. Firstly, the muscular strength, bolding the articulation by muscular contractions, could as a consequence limit the muscular vibrations. Thus, the kinesthetic illusions, induced by vibrations, decrease and the somatokinesthetic information could be reliable. Secondly, Tjernström et al. (2002) indicated that adaptation and habituation of postural control to vibratory perturbations

appeared and remained after a sufficiently long and repeated stimulation. In this way, these solicitations could lead, in MTB, to a habituation of the central nervous system to neutralize the effect of ground's vibrations and to enhance proprioception. This explanation can be illustrated by the RC participating at Paris–Roubaix race (in Northern France), who yield kinesthetic illusions due to a lack of habituation of riding on paving stones. Thus, the sensations, felt during this race, should be distorted in regard of those that they are habituated to perceive on classical road the rest of the year (Grappe, 2005).

5. Conclusion

In conclusion, this study has shown that the practice of certain cycling specialties can have a differential impact on balance control. In this way, neurosensory organization in MTB seems to be different from that of RC, the latter being characterized by preferential usage of visual information, that is particularly highlighted for individuals practicing mostly on-road cycling. On the other hand, a better use of somesthetic information has been noted for the MTB, who trained off-road for the most of the time. Thus, cycling practice leads to balance specificities, i.e. differences in neurosensory information use and postural regulation mechanisms, according to whether training is on-road or off-road.

References

- Absalon J, Cascua S, Dalouche A. VTT, s'initier et progresser. Paris: Amphora; 2006.
- Angyán L, Téczely T, Angyán Z. Factors affecting postural stability of healthy young adults. *Acta Physiol Hung* 2007;94:289–99.
- Bagesteiro LB, Sarlegna FR, Sainburg RL. Differential influence of vision and proprioception on control of movement distance. *Exp Brain Res* 2006;171:358–70.
- Balter SG, Stokroos RJ, Akkermans E, Kingma H. Habituation to galvanic vestibular stimulation for analysis of postural control abilities in gymnasts. *Neurosci Lett* 2004;366:71–5.
- Berenesi A, Ishihara M, Imanaka K. The functional role of central and peripheral vision in the control of posture. *Hum Mov Sci* 2005;24:689–909.
- Chapman AR, Vicenzino B, Blanch P, Hodges PW. Patterns of leg muscle recruitment vary between novice and highly trained cyclists. *J Electromyogr Kinesiol* 2008;18:359–71.
- Chien CW, Hu MH, Tang PF, Sheu CG, Hsieh CL. A comparison of psychometric properties of the Smart Balance Master System and the Postural Assessment Scale for Stroke in people who have had mild stroke. *Arch Phys Med Rehabil* 2007;88:374–80.
- Davlin CD. Dynamic balance in high level athletes. *Percept Mot Skills* 2004;98:1171–6.
- Diard JP, Aubin F, May D, Michel M, Gouteyron JF. Equitest et sujets de hautes performances. *Rev Laryngol Otol Rhinol (Bord)* 1997;118:307–10.
- Duc S, Bertucci W, Pernin JN, Grappe F. Muscular activity during uphill cycling: effect of slope, posture, hand grip position and constrained bicycle lateral sways. *J Electromyogr Kinesiol* 2008;18:116–27.
- Ford-Smith CD, Wyman JF, Elswick Jr RK, Fernandez T, Newton RA. Test-retest reliability of the sensory organization test in noninstitutionalized older adults. *Arch Phys Med Rehabil* 1995;76:77–81.
- Furman JM. Posturography: uses and limitations. *Baillieres Clin Neurol* 1994;3:501–13.

- Gauchard GC, Jeandel C, Tessier A, Perrin PhP. Beneficial effect of proprioceptive physical activities on balance control in elderly human subjects. *Neurosci Lett* 1999;273:81–4.
- Golomer E, Crémieux J, Dupui P, Isableu B, Ohlmann T. Visual contribution to self-induced body sway frequencies and visual perception of male professional dancers. *Neurosci Lett* 1999;267:189–92.
- Golomer E, Dupui P. Spectral analysis of adult dancers' sways: sex and interaction vision-proprioception. *Int J Neurosci* 2000;105:15–26.
- Goodwin GM, McCloskey DI, Matthews PB. Proprioceptive illusions induced by muscle vibration: contribution by muscle spindles to perception? *Science* 1972;175:1382–4.
- Grappe F. Cyclisme et optimisation de la performance. Brussels: De Boeck; 2005.
- Gregory J, Johns DP, Walls JT. Relative vs. absolute physiological measures as predictors of mountain bike cross-country race performance. *J Strength Cond Res* 2007;21:17–22.
- Guskiewicz KM, Ross SE, Marshall SW. Postural stability and neuropsychological deficits after concussion in collegiate athletes. *J Athl Train* 2001;36:263–73.
- Hugel F, Cadopi M, Kohler F, Perrin PhP. Postural control of ballet dancers: a specific use of visual input for artistic purposes. *Int J Sports Med* 1999;20:86–92.
- Impellizzeri FM, Marcora SM, Rampinini E, Mogroni P, Sassi A. Correlations between physiological variables and performance in high level cross country off road cyclists. *Br J Sports Med* 2005;39:747–51.
- Jones DEH. The stability of the bicycle. *Phys Today* 1970;23:34–40.
- Ledin T, Odkvist LM. Visual influence on postural reactions to sudden antero-posterior support surface movements. *Acta Otolaryngol* 1991;111:813–9.
- Lee H, Martin DT, Anson JM, Grundy D, Hahn AG. Physiological characteristics of successful mountain bikers and professional road cyclists. *J Sports Sci* 2002;20:1001–8.
- Leitner C, Mair P, Paul B, Wick F, Mittermaier C, Sycha T, et al. Reliability of posturographic measurements in the assessment of impaired sensorimotor function in chronic low back pain. *J Electromyogr Kinesiol* 2009;19:380–90.
- MacRae HS-H, Hise KJ, Allen PJ. Effects of front and dual suspension mountain bike systems on uphill cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32:1276–80.
- Massion J. Postural control system. *Curr Opin Neurobiol* 1994;4:877–87.
- Massion J, Woollacott MH. Posture and equilibrium. In: Bronstein AM, Brandt T, Woollacott MH, editors. *Clinical disorders of balance, posture and gait*. London: Arnold; 1996. p. 1–18.
- Mesure S, Amblard B, Crémieux J. Effect of physical training on head-hip co-ordinated movements during unperturbed stance. *Neuroreport* 1997;8:3507–12.
- Nashner LM. Computerized dynamic posturography. In: Jacobson GP, Newman CW, Kartush JM, editors. *Handbook of balance function testing*. London: Thomson Learning; 1997. p. 280–307.
- Nashner LM, Peters JF. Dynamic posturography in the diagnosis and management of dizziness and balance disorders. *Neurol Clin* 1990;8:331–49.
- Nishii T, Umemura Y, Kitagawa K. Full suspension mountain bike improves off-road cycling performance. *J Sports Med Phys Fitness* 2004;44:356–60.
- Noé F, Paillard T. Is postural control affected by expertise in alpine skiing? *Br J Sports Med* 2005;39:835–7.
- Paillard T, Montoya R, Dupui P. Postural adaptations specific to preferred throwing techniques practiced by competition-level judoists. *J Electromyogr Kinesiol* 2007;17:241–4.
- Paillard T, Noé F, Rivière T, Marion V, Montoya R, Dupui P. Postural performance and strategy in the unipedal stance of soccer players at different levels of competition. *J Athl Train* 2006;41:172–6.
- Perrin PhP, Deviterne D, Hugel F, Perrot C. Judo, better than dance, develops sensorimotor adaptabilities involved in balance control. *Gait Posture* 2002;15:187–94.
- Perrin PhP, Schneider D, Deviterne D, Perrot C, Constantinescu L. Training improves the adaptation to changing visual conditions in maintaining human posture control in a test of sinusoidal oscillation of the support. *Neurosci Lett* 1998;245:155–8.
- Tjernström F, Fransson PA, Hafström A, Magnusson M. Adaptation of postural control to perturbations – a process that initiates long-term motor memory. *Gait Posture* 2002;15:75–82.
- Vibert D, Redfield RC, Häusler R. Benign paroxysmal positional vertigo in mountain bikers. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 2007;116:887–90.
- Vuillermé N, Danion F, Marin L, Boyadjian A, Prieur JM, Weise I, et al. The effect of expertise in gymnastics on postural control. *Neurosci Lett* 2001a;303:83–6.
- Vuillermé N, Nougier V, Prieur JM. Can vision compensate for a lower limbs muscular fatigue for controlling posture in humans? *Neurosci Lett* 2001b;308:103–6.
- Warner SE, Shaw JM, Dalsky GP. Bone mineral density of competitive male mountain and road cyclists. *Bone* 2002;30:281–6.
- Wilber RL, Zawadzki KM, Kearney JT, Shannon MP, Disalvo D. Physiological profiles of elite off-road and road cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 1997;29:1090–4.
- Wisley DM, Stephens MJ, Mosley S, Wojnowski A, Duffy J, Burkard R. Learning effects of repetitive administrations of the Sensory Organization Test in healthy young adults. *Arch Phys Med Rehabil* 2007;88:1049–54.



practiced road cycling at a national level of competition.



Health and Medical Research (INSERM) and is actually Associate Professor in the Faculty of Sport Sciences, Nancy-University, France. He is currently Treasurer of the European Society for Clinical Evaluation of Balance Disorders.



of Lorraine, Nancy-University, University Henri Poincaré, France.

Alexis Lion obtained a Licence degree in Sport Sciences in 2004 and a Master in Bioengineering-Biomechanics in 2006, and is currently Ph.D. student at Nancy-University, Henri Poincaré University (East of France). He is affiliated to the Balance Control and Motor Performance laboratory and to the National Institute for Health and Medical Research (INSERM). His research topics concern the postural control in relation with physical and sporting activities, muscular exercise and metabolic disorders. He

Jérôme Gauchard is a Doctor in Neurosciences from the University Henri Poincaré, Nancy 1. He received his Ph.D. degree in 2000 and his Habilitation in 2007. His research topics concern the neurophysiology of balance and gaze control, especially in relation to physical and sporting activities, osteo-articular and oto-neurological pathologies, cognitive processes and neurotoxicity. He has published thirty-four international papers in peer reviewed periodicals. He is affiliated to the National Institute for Health and Medical Research (INSERM) and is actually Associate Professor in the Faculty of Sport Sciences, Nancy-University, France. He is currently Treasurer of the European Society for Clinical Evaluation of Balance Disorders.

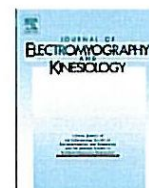
Dominique Deviterne is Doctor in Neurosciences. He received his Ph.D. degree in Neurobiology of behaviour in the Henri Poincaré University of Nancy in 1981, and is Assistant Professor in Psychology of learning and education since 1992. He has published 32 international papers in peer reviewed periodicals. His research topics concern cognitive processes and contexts of learning and particularly motor learning. He is actually assistant director at the academic institute of formation of the teachers



Philippe Perrin, MD, Ph.D., is Professor at Nancy University and physician in Oto-Rhino-Laryngology at the University Hospital. His research topics concern the modifications of balance control strategies according to the physical and sporting activities practised, ageing, pathologies (otoneurological, central nervous system, osteo-articular, etc.), and rehabilitation programs. He is head of the Balance Control and Motor Performance laboratory at the University Hospital and is affiliated to the National Institute for Health and Medical Research (INSERM) at the Faculty of Medicine. He has published more than 100 papers in

international peer reviewed journals. He is responsible for the Master Ergonomics, Biomechanics, Motricity, Occupational Physiology (Faculty of Medicine) and for the Exercise physiology course in the Licence degree in Sport Sciences (Faculty of Sport Sciences). He was General Secretary of the *Société de Physiologie* (2003–07) and currently is President of the European Society for Clinical Evaluation of Balance Disorders and General Secretary of the *Société Internationale d'Oto-Neurologie*.

Annexe 2 : Journal of Electromyography and Kinesiology 2010;20:1196-1202



Exercise and dehydration: A possible role of inner ear in balance control disorder

Alexis Lion^{a,b}, Gilles Bosser^{a,b,c}, Gérome C. Gauchard^{a,b}, Karim Djaballah^d, Jean-Pierre Mallié^e, Philippe P. Perrin^{a,b,f,*}

^a Balance Control and Motor Performance (EPM), UFR STAPS, Henri Poincaré University, Nancy-University, 54600 Villers-lès-Nancy, France

^b National Institute for Health and Medical Research (INSERM), UMR 954, Faculty of Medicine, 54505 Vandœuvre-lès-Nancy, France

^c Department of Cardiac Rehabilitation, Regional Institute for Rehabilitation (IRR), University Hospital, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

^d Department of Cardiology, University Hospital, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

^e Experimental Nephrology Laboratory, Faculty of Medicine, Henri Poincaré University, Nancy-University, 54505 Vandœuvre-lès-Nancy, France

^f Department of Oto-Rhino-Laryngology, University Hospital, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 March 2010

Received in revised form 1 June 2010

Accepted 23 July 2010

Keywords:

Sensory organization

Posturography

Vestibular system

Exercise

Dehydration

ABSTRACT

To study the effect of exercise and dehydration on the postural sensory-motor strategies, 10 sportsmen performed a 45 min-exercise on a cycle ergometer at intensity just below the ventilatory threshold without fluid intake. They performed, before, immediately and 20 min after exercise, a sensory organization test to evaluate balance control in six different sensory situations, that combine three visual conditions (eyes open, eyes closed and sway-referenced visual surround motion) with two platform conditions (stable platform, sway-referenced platform motion). Blood samples were collected before and after exercise. Exercise induced a mild dehydration, characterized by body mass loss and increase in proteinemia. Postural performances decreased immediately after exercise, mainly in the standard situation (eyes open, stable visual surround and platform) and when only the vestibular cue was reliable (eyes closed and sway-referenced platform). Moreover, the decreased use of vestibular input was correlated with the dehydration level. Finally, postural performances normalized 20 min after exercise. Even though muscular fatigue could explain the decrease in postural performances, vestibular fluid modifications may also be involved by its influence on the intralabyrinthine homeostasis, lowering thus the contribution of vestibular information on balance control.

© 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Body equilibration is a complex sensorimotor function allowing body orientation in space and posture stabilization. Central processing of sensory information from visual, vestibular and

somatokinesthetic systems is required to organize an adequate motor response aiming at gaze and posture stabilization according to the expected task and to the cognitive and environmental contexts (Massion, 1994).

Generally, prolonged exercise leads to central and peripheral fatigue, decreasing motor performances through metabolic (e.g. interleukin-6 production), structural (e.g. cellular membrane leakage), functional and behavioural modifications, which vary according to the muscular group, the type of contraction involved, the exercise duration and intensity (Millet and Lepers, 2004). Among motor functions, postural control has been described to be transiently altered after exercise whatever its type, i.e. global (Bove et al., 2007; Derave et al., 1998; Gauchard et al., 2002; Lepers et al., 1997; Nardone et al., 1998) or limited to some muscle groups, like those of the neck or the lower limbs (Ledin et al., 2004; Schieppati et al., 2003). Among factors explaining central and peripheral fatigue, dehydration and its related-hemoconcentration can result from thermoregulatory sweating (Mallié et al., 2002) but also from increase in muscle water content evidenced by studies of muscular biopsies of the *vastus lateralis* (Nielsen et al., 1986). These homeostatic changes play a significant role in

Abbreviations: AP, anterior–posterior; BMI, body mass index; CoG, center of gravity; CoP, center of foot pressure; C1–C6, conditions 1–6 of the sensory organization test; C1^{ES}–C6^{ES}, equilibrium score of conditions 1–6; C^{ES}, composite equilibrium score; ES, equilibrium score; HR, heart rate; HR_{exercise}, heart rate used during exercise; HR_{VT}, heart rate at ventilatory threshold; HR_{max}, maximal heart rate; PE₁, post-exercise 1; PE₂, post-exercise 2; P_{Na⁺}, plasma sodium; PO, power output; PO_{exercise}, power output developed during exercise; PO_{VT}, power output at ventilatory threshold; PPO, peak power output; P_{proteins}, plasma proteins; R^{PMAN}, altered proprioceptive information management; R^{REF}, visual preference ratio; R^{SOM}, somatosensory ratio; R^{VEST}, vestibular ratio; R^{VIS}, visual ratio; SD, standard deviation; SOT, sensory organization test; SR, sway-referenced; V_i, variation index; VO₂, oxygen uptake; VO_{2VT}, oxygen uptake at ventilatory threshold; VO_{2max}, maximum oxygen uptake; VT, ventilatory threshold.

* Corresponding author at: Equilibration et Performance Motrice, UFR STAPS, Nancy Université, Université Henri Poincaré, 30 rue du Jardin Botanique, 54600 Villers-lès-Nancy, France. Tel.: +33 383 682 929; fax: +33 383 154 647.

E-mail address: Philippe.Perrin@staps.uhp-nancy.fr (P.P. Perrin).

1050-6411/\$ - see front matter © 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved.

doi:10.1016/j.jelekin.2010.07.016

the limitation of strength, power and high-intensity endurance in athletes, as well as in military and industrial personnel (Judelson et al., 2007). On the other hand, the effects of dehydration on post-exercise postural control remain disputed with studies showing conflicting results on postural instability according to the presence/absence of dehydration (Derave et al., 1998; Gauchard et al., 2002; Patel et al., 2007).

Nevertheless, balance instability observed after exercise could be also explained by dehydration-induced metabolic modifications occurring at each level of postural control regulation, especially at vestibular level, which is the only information in which liquids intervene in the sensory transduction mechanisms. Therefore, at peripheral level, while muscular dysfunctions are traditionally incriminated in postural impairment induced by a prolonged exercise, a modification of endolymph volume and composition related to dehydration could also be a contributing factor. Indeed, a moderate but prolonged exercise, just below the ventilatory threshold (VT) to avoid muscular acidosis, could limit the muscular contribution in balance disorders and allows to highlight other potential factors like neurosensory postural organization. A decrease of one afferent input should lead to a modification of the neurosensory hierarchy (Herpin et al., 2010; Lion et al., 2009; Perrin et al., 2002). This study aimed to evaluate the effect of exercise-related dehydration on postural sensory-motor strategies, in particular the use of vestibular input.

2. Methods

2.1. Participants

Ten males, studying at the Faculty of Sport of Nancy, who regularly practice physical and sporting activities at regional competition level, participated in this study. Each participant had no history of psychiatric or neurological disorders, or showed any orthopaedic disorders either of the trunk or the lower limbs that could affect postural performance. This protocol was accepted by the *Comité de Protection des Personnes*. All the participants gave written informed consent before data collection, in accordance with the current ethical laws of France.

2.2. Exercise stress test

The oxygen uptake (VO_2), heart rate (HR) and power output (PO) were determined at peak ($\text{VO}_{2\text{max}}$, HR_{max} and PPO) and ventilatory threshold ($\text{VO}_{2\text{VT}}$, HR_{VT} and PO_{VT}) by an incremental cycling exercise. The ventilatory threshold (VT) was determined using the V-slope method (Beaver et al., 1986). This exercise stress test, performed on a standard electromagnetically braked cycle ergometer (Cardiology Department, University Hospital of Nancy, France), began with a brief warm-up at 20 W for 3 min after which the power output was increased by increments of 20 W every minute until exhaustion.

2.3. Exercise and biological measurements

To obtain an exercise-related dehydration, an aerobic exercise of 45 min immediately below the ventilatory threshold was chosen and performed on a standard electromagnetically braked cycle ergometer at a personal heart rate exercise ($\text{HR}_{\text{exercise}}$) determined by HR_{VT} minus 10 beats/min. During the exercise, fluid intake was not permitted. The power output developed during exercise ($\text{PO}_{\text{exercise}}$) was individually adjusted to keep the $\text{HR}_{\text{exercise}}$ constant with a pedalling rate of approximately 80 rotations per minute. Diuresis, body mass loss and hemoconcentration were used as markers of dehydration. Diuresis was calculated as the volume of

urine collected after exercise divided by the time between the two micturitions (i.e. before and after exercise). To evaluate the degree of dehydration, blood samples (12 ml) were collected before exercise and immediately after the first post-exercise posturography. Plasma sodium (P_{Na^+}) and proteins ($\text{P}_{\text{proteins}}$), which are related to hemoconcentration (Guyton and Hall, 2006), were determined.

2.4. Balance control evaluation

EquiTest® computerized dynamic posturography (Neurocom, Clackamas, OR), which provides functional information regarding balance and its disturbances (Furman, 1994), uses a dual platform which consists of two footplates connected by a pin joint. The two footplates are supported by four force transducers (strain gauges) mounted symmetrically on a supporting centre plate. Force data were sampled at 100 Hz and stored on a PC using a 12-bit A/D converter. A fifth transducer is bracketed to the centre plate directly beneath the pin joint. The centre transducer measures shear forces along the Y axis, in the plane parallel to the floor. The other transducers measure vertical forces applied to the dual platform. The data are filtered using a second order Butterworth with 0 phase shift. The computer calculates the center of foot pressure (CoP) and the vertical component of the centre of gravity (CoG), using the subject's height entered by the operator. The force transducers are placed such that when a subject stands with ankles centred over the stripe on the dual platform, with feet an equal distance laterally from the centre line (Y axis), CoG is located directly above the intersection of the X and Y axes (position called electrical zero position, which serves as a reference point for the calculation of sway angles). The programme uses a small angle approximation to $\arcsin x$, which is accurate to 0.5% in the range of angles encountered.

The sensory organization test (SOT) consists in recording the centre of foot pressure and interprets the results as a use of various sensory inputs. To give inadequate information, somatosensory and visual cues are disrupted by using a technique commonly referred to as sway-referenced, which involves tilting the support surface and/or the visual surround to directly follow the anterior-posterior (AP) sways of the subject's centre of gravity (CoG). The subject's task is to maintain an upright stance with as little postural sway as possible during the 20 s trials in six conditions (Table 1). The first two conditions provide a basic measurement of the subject's stability and do not induce any sensory conflict: the support surface is fixed and the subject's eyes are open (condition 1, C1) or closed (condition 2, C2). In condition 3 (C3), the support remains fixed while the subject stands, eyes open, within a sway-referenced visual surround. In conditions 4–6, somatosensory information is systematically disrupted (sway-referenced) and vision is fixed (C4), absent (C5) and sway-referenced (C6), respectively. In C3 and C4, a sensory conflict is induced, but relatively easy to solve according to a ratio between the number of disrupted information and the number of reliable information (one disrupted cue for two reliable cues). The sensory conflict is more difficult to solve in C5 and C6 (one disrupted cue for one reliable cue, vision being absent in condition 5; two disrupted cues for one reliable cue in condition 6). Rest between each trial being approximately 10 s to recall the next stimulation modalities, the SOT procedure theoretically lasts about ten minutes. Improvement of postural control has been described to begin within about six to 15 min after the end of exercise (Bove et al., 2007; Nardone et al., 1998). In order to avoid the effects of recovery on the post-exercise measurement, the number of trials per condition was reduced to one instead of three. The participants were requested to stand upright and barefoot on the platform, remaining as stable as possible, breathing normally, and with their arms at their sides, and were in-

Table 1

Sensory organization test – determination of the six conditions and significance of sensory ratios: SR, sway-referenced (Black et al., 1995; Gauchard et al., 2010; Herdman et al., 1995; Herpin et al., 2010; Lion et al., 2009; Nashner, 1997).

Sensory organization test		
Name	Situation	Sensory consequences
Conditions		
Condition 1 (C1)	Eyes open, fixed support	–
Condition 2 (C2)	Eyes closed, fixed support	Vision absent
Condition 3 (C3)	SR surround, fixed support	Altered vision
Condition 4 (C4)	Eyes open, SR support	Altered proprioception
Condition 5 (C5)	Eyes closed, SR support	Vision absent, altered proprioception
Condition 6 (C6)	SR surround, SR support	Altered vision and proprioception
Name	Pair	Significance
Ratios		
Somatosensory (R^{SOM})	C2/C1	Question: does sway increase when visual cues are removed? Low scores: poor use of somatosensory references
Visual (R^{VIS})	C4/C1	Question: does sway increase when somatosensory cues are inaccurate? Low scores: poor use of visual references
Vestibular (R^{VEST})	C5/C1	Question: does sway increase when visual cues are removed and somatosensory cues are inaccurate? Low scores: poor use of vestibular cues or vestibular cues unavailable
Visual preference (R^{PREF})	(C3 + C6)/(C5 + C2)	Question: do inaccurate visual cues result in increased sway compared to no visual cues? Low scores: reliance on visual cues even inaccurate
Altered proprioceptive information management (R^{PMAN})	(C4 + C5 + C6)/(C1 + C2 + C3)	Question: do inaccurate somatosensory cues result in increased sway compared to accurate somatosensory cues? Low scores: poor compensation for disruptions in selected sensory inputs

structured to look straight ahead at a picture located on the visual surround. To protect against falls, an operator stood within reaching distance of the subject who wore a safety harness connected to the ceiling by two suspension straps in all the test conditions.

An equilibrium score (ES) was calculated by comparing the subject's anterior–posterior sway during each 20 s SOT trial to the maximal theoretical sway limits of stability, which is based on the individual's height and size of the base of support. It represents an angle (8.5° anteriorly and 4.0° posteriorly) at which the person can lean in any direction before the centre of gravity would move beyond a point that allows him/her to remain upright (i.e., point of falling). The following formula was used to calculate the ES: $[12.5 - ((\theta_{max} - \theta_{min})/12.5)] \times 100$, where θ_{max} indicates the greatest AP CoG sway angle displayed by the subject while θ_{min} indicates the lowest AP CoG sway angle. Lower sways lead to a higher ES, indicating a better balance control performance (a score of 100 represents no sway, while 0 indicates sway that exceeds the limit of stability, resulting in a fall). Equilibrium scores (ES) were calculated for every condition: the ES were $C1^{ES}$ in condition 1, $C2^{ES}$ in condition 2, $C3^{ES}$ in condition 3, $C4^{ES}$ in condition 4, $C5^{ES}$ in condition 5, and $C6^{ES}$ in condition 6. Composite equilibrium score (C^{ES}) was calculated to evaluate global balance performances. It was calculated by adding every ES from conditions 1 and 2 and three times every ES from sensory conditions 3–6, and finally dividing that sum by the total number of trials, that would smooth the data across all conditions. By increasing the contribution of C3–C6 scores in the formula, C^{ES} is effectively weighted to the more difficult conditions and characterizes the overall level of balance control performance, i.e. coupling both simple and complex postural tasks (without and with sensory conflicts). Moreover, each ES was adjusted to $C1^{ES}$ to identify the significance of each sensory system influencing postural control, allowing the determination of the use of somesthetic (R^{SOM}), visual (R^{VIS}) and vestibular (R^{VEST}) information, as well as the ability to rely on vision even if inadequate

(R^{PREF}) and the ability to manage altered proprioceptive inputs (R^{PMAN}) (Table 1) (see (Black et al., 1995; Gauchard et al., 2010; Herdman et al., 1995; Herpin et al., 2010; Lion et al., 2009; Nashner, 1997) for details).

However, to be useful, all balance measuring tools must be scientifically sound in terms of three basic psychometric properties: reliability, responsiveness (sensitivity of change), and predictive validity (Chien et al., 2007). Among them, test–retest reliability of the composite (reliability coefficient = 0.67) and equilibrium score (range, 0.35–0.79) was fair to good over a two-day period in healthy young adults (Wrisley et al., 2007). Moreover, SOT has been recognized as a reliable tool for identifying subjects with enhanced equilibrium skills (Diard et al., 1997).

2.5. Procedure

The exercise was carried out in the Balance Laboratory (accredited for research by the Ministry of Health). A light breakfast (two slices of bread with butter and a glass of water) without tea or coffee was taken 2 h before arrival at the laboratory. Such a breakfast does not change kidney function (Mallié et al., 2002). All exercises were done in the morning between 9 and 12 a.m. in a specially equipped room (temperature 22–24 °C, hygrometry 48–50%). A pre-exercise SOT was recorded as a control measurement of equilibrium. Before the pre-exercise weight measurement, participants passed urine and a blood sample was collected. Then followed a 45 min-exercise on cycle ergometer just below ventilatory threshold. Post-exercise 1 (PE_1) measurements consisted in weight and SOT recordings immediately followed by collection of blood and urinary samples. The computerized dynamic posturography platform was located at less than 5 m beside the cycle ergometer, and the time between the end of the exercise and the beginning of the PE_1 SOT was less than 1 min, including the time required for weight measurement. Post-exercise 2 (PE_2) SOT was recorded

after a period of 20 min, comprising both PE₁ measurements and a rest (Table 2). Fluid intake was not allowed during exercise and rest. Variation indexes ($V_i = PE_i$ values/pre-exercise values) were calculated for metabolic and posturographic data. For metabolic data, hemoconcentration increase is reflected by elevated V_i . For posturographic data, degradation of balance control is reflected by low V_i .

2.6. Statistical analysis

Results were expressed as mean and standard deviation (SD). Normal distribution of data was verified using both a graphic method and Shapiro–Wilk analyses. Results were then evaluated using one-way repeated measures ANOVA (F , overall heterogeneity). If results of one-way repeated measures ANOVA showed significance, comparisons 2 by 2 of the groups were produced using a paired-samples t -test (t , pair-wise comparisons). Statistically significant differences were accepted for a probability level of $p \leq 0.05$ and borderline significance for a probability level of $p \leq 0.10$. The Bonferroni–Dunn procedure was applied to pair-wise comparisons by adjusting “family-wise alpha” to a significance level of $p \leq 0.05/3 = 0.017$ in accordance with the three possible comparisons, borderline significance being defined to a level of $p \leq 0.010/3 = 0.033$. Finally, Bravais–Pearson correlation coefficient, r , was used to test the link between the different variation indexes.

3. Results

Anthropometric data (age, height, weight, body mass index (BMI), VO_{2max} , HR_{max} , PPO, VO_{2VT} , HR_{VT} , PO_{VT} , $HR_{exercise}$ and $PO_{exercise}$) are presented in Table 3. The VO_{2max} corresponds to 147.5% ($\pm 20.2\%$) of predicted values (Wasserman et al., 1987). Exercise was performed at approximately 60% of individual VO_{2max} of each subject.

In PE₁, this study has shown a significant increase of proteinemia (pre-exercise: $75.60 (\pm 4.22) g l^{-1}$, PE₁: $79.10 (\pm 5.50) g l^{-1}$, $t = -5.35$, $p < 0.001$) ($4.57 \pm 2.57\%$) and significant decrease of body mass (pre-exercise: $76.18 (\pm 9.19) kg$, PE₁: $75.30 (\pm 9.14) kg$, $t = -17.18$, $p < 0.001$) ($-1.16 \pm 0.21\%$), reflecting a mild dehydration, which is furthermore characterized by low diuresis ($0.45 \pm 0.22 ml min^{-1}$). On the other hand, no variation of P_{Na^+} was observed (pre-exercise: $139.90 (\pm 1.01) mmol l^{-1}$, PE₁: $140.00 (\pm 1.15) mmol l^{-1}$, $t = -0.26$, non-significant).

Table 2
Experimental design and measurement periods.

Session	Location	Chronological procedure	Measurements and biological data collections
Session 1	Cardiology department	Exercise stress test	Oxygen uptake Heart rate Power output
Session 2	Balance control evaluation laboratory	Pre-exercise	Sensory organization test Urine Weight Blood collection
		Exercise	Heart rate Power output
		Post-exercise 1 (PE ₁)	Weight Sensory organization test Urine Blood collection
		Rest	None
		Post-exercise 2 (PE ₂)	Sensory organization test

Table 3

Characteristics of the participants, expressed by mean values associated with standard deviations (SD).

	Mean ($\pm$ SD)
Age (years)	23.02 (± 2.45)
Height (cm)	178.70 (± 9.03)
Weight (kg)	76.18 (± 9.19)
BMI ($kg m^{-2}$)	23.81 (± 1.89)
VO_{2max} ($l min^{-1} kg^{-1}$)	51.76 (± 9.93)
HR_{max} (beats min^{-1})	179.30 (± 15.96)
PPO (W)	274.80 (± 27.54)
VO_{2VT} ($l min^{-1} kg^{-1}$)	32.64 (± 9.40)
VO_{2VT} (% VO_{2max})	62.50 (± 8.25)
HR_{VT} (beats min^{-1})	135.30 (± 26.48)
PO_{VT} (W)	173.10 (± 26.64)
$HR_{exercise}$ (beats min^{-1})	135.30 (± 26.48)
$PO_{exercise}$ (W)	166.70 (± 14.94)

BMI, body mass index; VO_{2max} , maximum oxygen uptake; HR_{max} , maximal heart rate; PPO, peak power output; VO_{2VT} , oxygen uptake at ventilatory threshold; HR_{VT} , heart rate at ventilatory threshold; PO_{VT} , power output at ventilatory threshold; $HR_{exercise}$, heart rate used during exercise; $PO_{exercise}$, power output developed during exercise.

Concerning posturographic data, a significant heterogeneity was observed for C^{ES} ($F = 7.14$, $p = 0.005$), and for $C1^{ES}$ ($F = 5.23$, $p = 0.002$), $C5^{ES}$ ($F = 6.89$, $p = 0.006$) and $C6^{ES}$ ($F = 4.02$, $p = 0.036$) parameters. The significant decrease in C^{ES} ($t = 4.55$, $p = 0.001$), observed in PE₁, mainly resulted from significant decrease in $C5^{ES}$ ($t = 3.86$, $p = 0.004$), but also from decrease in $C1^{ES}$ ($t = 2.75$, $p = 0.022$) and $C6^{ES}$ ($t = 2.61$, $p = 0.028$). Furthermore, postural performances normalized for $C1^{ES}$ ($t = -3.28$, $p = 0.009$) and $C5^{ES}$ ($t = -2.95$, $p = 0.016$) in PE₂ (Fig. 1a). Concerning ratios, the results observed indicated a heterogeneity which was significant for R^{VEST} ($F = 4.64$, $p = 0.023$) and close to significance for R^{PMAN} ($F = 2.97$, $p = 0.076$). R^{VEST} decreased significantly in PE₁ ($t = 3.18$, $p = 0.011$); on the other hand, no difference was observed between pre-exercise and PE₂ (Fig. 1b).

Finally, the dehydration-related increase in proteinemia was correlated with the importance of the balance control impairment, especially when the vestibular input was the sole unperturbed afference (Table 4).

4. Discussion

This study showed that exercise, performed during 45 min on a cycle ergometer at an intensity just below the ventilatory threshold and without fluid intake, induced a mild PE₁ dehydration, which was characterized by a body mass loss and an increased proteinemia. Moreover, a decrease in C^{ES} was observed, resulting from lower $C5^{ES}$ mainly, but also from lower $C1^{ES}$ and $C6^{ES}$. The decrease in R^{VEST} , reflecting a lower use of vestibular information, was correlated with the dehydration level (i.e. proteinemia). Both $C1^{ES}$ and $C5^{ES}$ normalized in PE₂.

A learning effect may occur as a result of the repetitions of the posturographic evaluations (Wrisley et al., 2007; Leitner et al., 2009). The decrease in postural performance suggests therefore a fatigue effect in PE₁. Cycling exercise is known to induce limited muscle damages (Millet and Lepers, 2004) and exercise performed below the ventilatory threshold induces mild muscular acidosis, so muscular fatigue could explain postural disorders in PE₁. Muscular fatigue impairs motor performance by a decrease of power resulting from a decline in both force and velocity (Allen et al., 2008). In PE₁, the motor output to stabilize posture may also be altered by other factors of postural regulation, i.e. sensory inputs and central information processing. Whereas fluid ingestion seems to limit fatigue-related neuromuscular disorders (Vallier et al., 2005), dehydration could slightly alter muscular function through metabolic

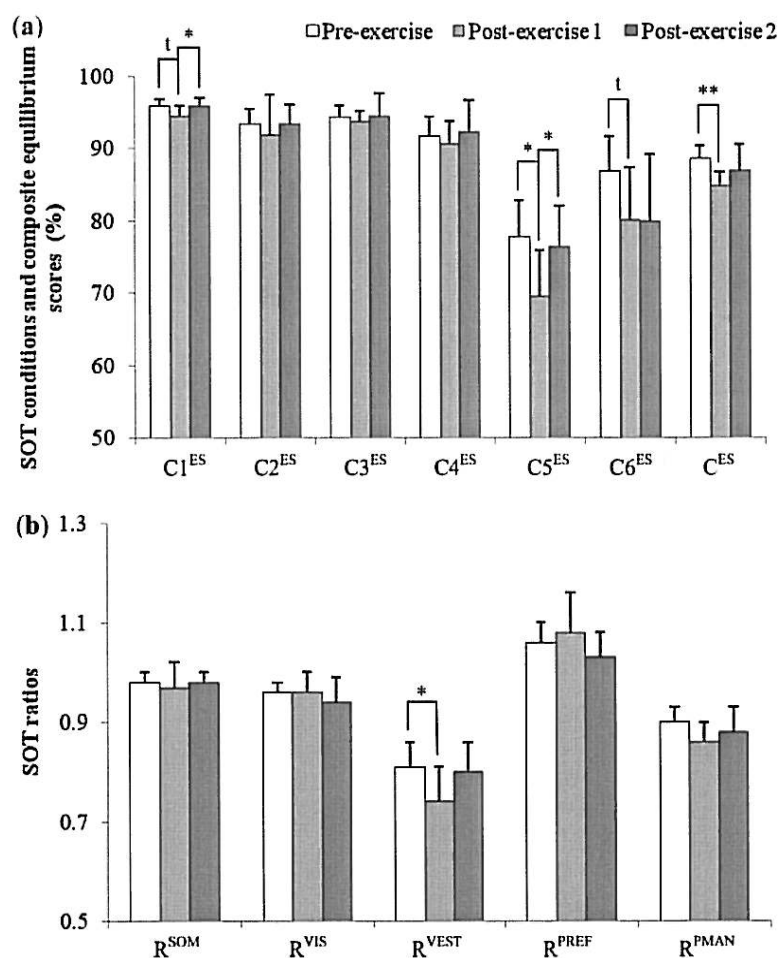


Fig. 1. Sensory organization test – mean values and standard deviations of the equilibrium scores (ES, in%) for the six conditions (C1^{ES}, C2^{ES}, C3^{ES}, C4^{ES}, C5^{ES} and C6^{ES}) and the composite equilibrium score (C^{ES}) (graph a) and for the different ratios (R^{SOM}, R^{VIS}, R^{VEST}, R^{PREF} and R^{PMAN}) (graph b) observed for pre-exercise (white bars), post-exercise 1 (light grey bars) and post-exercise 2 (dark grey bars). † $p \leq 0.033$, * $p \leq 0.017$, ** $p \leq 0.003$ (after Bonferroni–Dunn correction).

Table 4

Bravais–Pearson correlation coefficients between variation indexes (V_i = PE₁ values/pre-exercise values) of proteinemia (P_{proteins}), equilibrium scores and SOT sensory ratios (R^{SOM}, R^{VIS}, R^{VEST}, R^{PREF}, R^{PMAN}).

	Bravais–Pearson correlation test; r -value, p
V_i P_{proteins}	
V_i C1 ^{ES}	$r = 0.29$, NS
V_i C2 ^{ES}	$r = 0.19$, NS
V_i C3 ^{ES}	$r = 0.41$, NS
V_i C4 ^{ES}	$r = -0.39$, NS
V_i C5 ^{ES}	$r = -0.62$, $p = 0.057$
V_i C6 ^{ES}	$r = -0.01$, NS
V_i C ^{ES}	$r = -0.38$, NS
V_i R ^{SOM}	$r = -0.12$, NS
V_i R ^{VIS}	$r = -0.44$, NS
V_i R ^{VEST}	$r = -0.64$, $p = 0.045$
V_i R ^{PREF}	$r = 0.36$, NS
V_i R ^{PMAN}	$r = -0.47$, NS

NS = non-significant.

and ionic changes (Montain et al., 1998) leading to a decrease in postural performances in PE₁.

In our study, the moderate body mass decrease (~1%) and exercise intensity (~60% of individual $\text{VO}_{2\text{max}}$) seem to be insufficient to induce significant perturbation of hemodynamics and thus of cerebral oxygenation (Fan et al., 2008; Ide et al., 1999). Moreover, moderate dehydration, without significant modification of thirst perception, and exercise have little effect on cognitive or

psychomotor performance (Adam et al., 2008). Thus, the PE₁ postural performances impairment should not be related to a decreased efficiency in central information processing.

For each type of exercise, there is an adaptation at the level of the central information processing to the specific pattern of proprioceptive, vestibular and visual stimulation. If this adaptation persists during the resting period after exercise, an inappropriate use of the sensory information may occur which could explain the post-exercise balance control disorders (Lepers et al., 1997). As it was presumed in the “Mal De Debarquement” disease (Moeller and Lempert, 2007), described essentially after a travelling on boats, or in some sports such as discus throwing (Perrin et al., 2000) or figure skating (Tanguy et al., 2008), the unusual sensory stimulations could be recorded and used temporarily by the memory as a new sensory reference. In addition, head movements during the exercise could also contribute to post-exercise balance disorders. Nevertheless, low stimulation time (only 45 min), in participants being students at the Faculty of Sport (with experience of unusual stimulations or sensory conflicting situations), and limited head motions in ergometer cycling cannot therefore fully explain balance disorders in PE₁.

Following exercise and its related dehydration, a decrease in sensitivity of sensory receptors could occur. Fatigue could modify the accuracy of proprioceptive information, resulting from a decreased sensitivity of the muscle spindle leading to change in postural regulation (Gauchard et al., 2002; Regueme et al., 2007). Whereas a decrease in somesthetic receptor sensitivity is possible

in our paradigm, a decrease in visual receptor sensitivity seems unlikely as our data did not show an inappropriate use of visual cues (no significant change of R^{VIS}). Furthermore, postural performances decreased in PE_1 particularly when the vestibular input was the only reliable afference (i.e. $C5^{ES}$). As a result, R^{VEST} ratio, indicating use of vestibular cues, decreased in PE_1 and its V_i was also correlated to $V_i P_{proteins}$, indicating that the more the dehydration was important, the more vestibular use decreased. A decrease of receptor sensibility, induced by dehydration, could explain the reduced use of vestibular input after exercise. Although it was not directly measured in our study, modification in inner ear liquid homeostasis might explain vestibular impairment (low $C5^{ES}$ values and R^{VEST} ratio). Like all displacement-sensitive structures immersed into fluids, the inner ear's sensory structures are influenced by intralabyrinthine pressures. These pressures depend on the mechanisms regulating volumes and electrochemical composition of the liquid compartments surrounding the inner ear. Dehydration might alter intralabyrinthine fluid composition and modify the contribution of this sensory input in balance control. A modification of the composition, volume or pressure of endolymphatic liquid may induce hearing loss and/or vertigo (Couloigner et al., 2004; Salt, 2001). In Menière's disease, episodes of vertigo, sensorineural hearing loss and tinnitus, which result from the increase in volume of the cochlea-vestibular endolymph (endolymphatic hydrops), are reduced by vestibular dehydration (e.g. induced by administration of glycerol or furosemide) that decreases the endolymphatic volume and the inner ear pressure (Couloigner et al., 2004; Salt, 2001; Stahle, 1984).

Postural impairments recovered after rest, indicating a short-lasting effect of postural impairments induced by exercise and its related dehydration. Bove et al. (2007) showed that postural control improvement begins 6 min after the end of exercise and is related to the decrease of oxygen uptake. In addition, Nardone et al. (1998) reported that the postural performances normalize about 15 min after the end of the muscular performance. The duration of the post-exercise postural imbalance period may be influenced by the characteristics of the exercise. During prolonged exercise, there is a dehydration and hemoconcentration with an increase of proteinemia secondary to thermoregulatory sweating (Mallié et al., 2002) but also to an increase of muscle water content (Nielsen et al., 1986). The release, at rest, of the water accumulated during exercise in the muscles could thus participate to the recovery of body fluid homeostasis, which also involves the inner ear, and therefore improve postural stability.

Despite of our small sample size some effects could be shown. Although it is not possible to study the inner ear fluids in the present setting, the posturographic behaviour (i.e. $C5$ and R^{VEST}) indicates a possible role of the vestibular system in disturbances of the postural control following prolonged moderate exercise with mild dehydration.

The transient impairment of balance control observed after a moderate exercise could result, apart from muscular fatigue, from a decrease in responsiveness of the vestibular afferent, which is sensitive to fluid compartment modifications possibly induced by dehydration. The evaluation of the consequences of exercise and dehydration on motor control could be helpful in athletics, recreational, occupational and rehabilitation settings.

Acknowledgments

Grants from the Société Anonyme des Eaux minérales d'Evian are gratefully acknowledged. We are thankful to Dr. Patricia Franck, Prof. Jean-Luc Olivier (Department of Biochemistry, University Hospital of Nancy, France) and the technicians of the department for their skilled technical and critical assistance. The University Hospital of Nancy promoted this study.

References

- Adam GE, Carter 3rd R, Cheuvront SN, Merullo DJ, Castellani JW, Lieberman HR, et al. Hydration effects on cognitive performance during military tasks in temperate and cold environments. *Physiol Behav* 2008;93:748–56.
- Allen DG, Lamb GD, Westerblad H. Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol Rev* 2008;88:287–332.
- Beaver WL, Wasserman K, Whipp WJ. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol* 1986;60:2020–7.
- Black FO, Paloski WH, Doxey-Gasway DD, Reschke MF. Vestibular plasticity following orbital spaceflight: recovery from postflight postural instability. *Acta Otolaryngol* 1995;520:450–4.
- Bove M, Faelli E, Tacchino A, Lofrano F, Cogo CE, Ruggeri P. Postural control after a strenuous treadmill exercise. *Neurosci Lett* 2007;418:276–81.
- Chien CW, Hu MH, Tang PF, Sheu CG, Hsieh CL. A comparison of psychometric properties of the smart balance master system and the postural assessment scale for stroke in people who have had mild stroke. *Arch Phys Med Rehabil* 2007;88:374–80.
- Couloigner V, Teixeira M, Sterkers O, Rask-Andersen H, Ferrary E. Le sac endolymphatique: ses fonctions au sein de l'oreille interne. *Med Sci (Paris)* 2004;20:304–10.
- Derave W, De Clercq D, Bouckaert J, Pannier JL. The influence of exercise and dehydration on postural stability. *Ergonomics* 1998;41:782–9.
- Diard JP, Aubin F, May D, Michel M, Gouteyron JF. Equilibre et sujets de hautes performances. *Rev Laryngol Otol Rhinol (Bord)* 1997;118:307–10.
- Fan JL, Cotter JD, Lucas RA, Thomas K, Wilson L, Ainslie PN. Human cardiorespiratory and cerebrovascular function during severe passive hyperthermia: effects of mild hypohydration. *J Appl Physiol* 2008;105:433–45.
- Furman JM. Posturography: uses and limitations. *Baillieres Clin Neurol* 1994;3:501–13.
- Gauchard GC, Gangloff P, Vouriot A, Mallié JP, Perrin PhP. Effects of exercise-induced fatigue with and without hydration on static postural control in adult human subjects. *Int J Neurosci* 2002;112:1191–206.
- Gauchard GC, Vançon G, Meyer P, Mainard D, Perrin PhP. On the role of knee joint in balance control and postural strategies: effects of total knee replacement in elderly subjects with knee osteoarthritis. *Gait Posture* 2010;32:155–60.
- Guyton AC, Hall JE. The Body fluid compartments: extracellular and intracellular fluids; interstitial fluid and edema. In: Guyton AC, Hall JE, editors. *Textbook of medical physiology*. Philadelphia: Elsevier Saunders Ed.; 2006.
- Herdman SJ, Clendaniel RA, Mattox DE, Holliday MJ, Niparko JK. Vestibular adaptation exercises and recovery: acute stage after acoustic neuroma resection. *Otolaryngol Head Neck Surg* 1995;113:77–87.
- Herpin C, Gauchard GC, Lion A, Collet P, Keller D, Perrin PhP. Sensorimotor specificities in balance control of expert fencers and pistol shooters. *J Electromyogr Kinesiol* 2010;20:162–9.
- Ide K, Horn A, Secher NH. Cerebral metabolic response to submaximal exercise. *J Appl Physiol* 1999;87:1604–8.
- Judelson DA, Maresch CM, Anderson JM, Armstrong LE, Casa DJ, Kraemer WJ, et al. Hydration and muscular performance: does fluid balance affect strength, power and high-intensity endurance? *Sports Med* 2007;37:907–21.
- Ledin T, Fransson PA, Magnusson M. Effects of postural disturbances with fatigued triceps surae muscles or with 20% additional body weight. *Gait Posture* 2004;19:184–93.
- Leitner C, Mair P, Paul B, Wick F, Mittermaier C, Sycha T, et al. Reliability of posturographic measurements in the assessment of impaired sensorimotor function in chronic low back pain. *J Electromyogr Kinesiol* 2009;19:380–90.
- Lepers R, Bigard AX, Diard JP, Gouteyron JF, Guezennec CY. Posture control after prolonged exercise. *Eur J Appl Physiol* 1997;76:55–61.
- Lion A, Gauchard GC, Devitene D, Perrin PhP. Differentiated influence of off-road and on-road cycling practice on balance control and the related-neurosensory organization. *J Electromyogr Kinesiol* 2009;19:623–30.
- Mallié JP, Alt-Djafer Z, Saunders C, Pierrat A, Cairat MV, Courroy O, et al. Renal handling of salt and water in humans during exercise with or without hydration. *Eur J Appl Physiol* 2002;86:196–202.
- Massion J. Postural control system. *Cur Opin Neurobiol* 1994;4:877–87.
- Millet GY, Lepers R. Alterations of neuromuscular function after prolonged running, cycling and skiing exercises. *Sports Med* 2004;34:105–16.
- Moeller L, Lempert T. Mal de débarquement: pseudo-hallucinations from vestibular memory? *J Neurol* 2007;254:813–5.
- Mountain SJ, Smith SA, Mattot RP, Zientara GP, Jolesz FA, Sawka MN. Hypohydration effects on skeletal muscle performance and metabolism: a ^{31}P -MRS study. *J Appl Physiol* 1998;84:1889–94.
- Nardone A, Tarantola J, Galante M, Schieppati M. Time course of stabilometric changes after a strenuous treadmill exercise. *Arch Phys Med Rehabil* 1998;79:920–4.
- Nashner LM. Computerized dynamic posturography. In: Jacobson GP, Newman CW, Kartush JM, editors. *Handbook of balance function testing*. London: Thomson Learning; 1997. p. 280–307.
- Nielsen B, Sjøgaard G, Ugelvig J, Knudsen B, Dohmann B. Fluid balance in exercise dehydration and rehydration with different glucose-electrolyte drinks. *Eur J Appl Physiol* 1986;55:318–25.
- Patel AV, Mihalik JP, Notebaert AJ, Guskiewicz KM, Prentice WE. Neuropsychological performance, postural stability, and symptoms after dehydration. *J Athl Train* 2007;42:66–75.

- Perrin PhP, Deviterne D, Hugel F, Perrot C. Judo, better than dance, develops sensorimotor adaptabilities involved in balance control. *Gait Posture* 2002;15:187–94.
- Perrin PhP, Perrot C, Deviterne D, Ragaru B, Kingma H. Dizziness in discus throwers is related to motion sickness generated while spinning. *Acta Otolaryngol* 2000;120:390–5.
- Regueme SC, Barthélemy J, Gauthier GM, Nicol C. Changes in illusory ankle movements induced by tendon vibrations during the delayed recovery phase of stretch-shortening cycle fatigue: an indirect study of muscle spindle sensitivity modifications. *Brain Res* 2007;1185:129–35.
- Salt AN. Regulation of endolymphatic fluid volume. *Ann NY Acad Sci* 2001;942:306–12.
- Schieppati M, Nardone A, Schmid M. Neck muscle fatigue affects postural control in man. *Neuroscience* 2003;121:277–85.
- Stahle J. Medical treatment of fluctuant hearing loss in Meniere's disease. *Am J Otol* 1984;5:529–33.
- Tanguy SC, Quarck GM, Etard OM, Gauthier AF, Denise P. Are otolith inputs interpreted better in figure skaters? *Neuroreport* 2008;19:565–8.
- Vallier JM, Grego F, Basset F, Lepers R, Bernard T, Brisswalter J. Effect of fluid ingestion on neuromuscular function during prolonged cycling exercise. *Br J Sports Med* 2005;39(4):e17.
- Wasserman K, Hansen J, Sue D, Whipp B. Normal values. In: Wasserman K, Hansen J, Sue D, Whipp B, editors. *Principles of exercise testing and interpretation*. Philadelphia: Lea and Febiger; 1987. p. 72–85.
- Wrisley DM, Stephens MJ, Mosley S, Wojnowski A, Duffy J, Burkard R. Learning effects of repetitive administrations of the sensory organization test in healthy young adults. *Arch Phys Med Rehabil* 2007;88:1049–54.



Alexis Lion obtained a Licence degree in Sport Sciences in 2004 and a Master in Bioengineering–Biomechanics in 2006, and is currently Ph.D. student at Nancy-University, Henri Poincaré University (East of France). He is affiliated to the Balance Control and Motor Performance laboratory and to the National Institute for Health and Medical Research (INSERM). His research topics concern the postural control in relation with physical and sporting activities, muscular exercise and metabolic disorders. He practices road cycling at a national level of competition.



Gilles Bosser, MD, Ph.D., is a cardiologist and pediatric cardiologist, graduated with a Ph.D. in neurosciences. He works in the field of cardiac rehabilitation. His research areas are the relations between postural control system and autonomic nervous system, the pathophysiology of motion sickness and vasovagal syncope and heart failure with its underlying mechanisms. He has published 29 international papers in peer reviewed periodicals and is affiliated to the National Institute for Health and Medical Research (INSERM) at the Faculty of Medicine of Nancy and to the Balance Control and Motor Performance laboratory at the University Hospital of Nancy, France.



Gérome Gauchard is a Doctor in Neurosciences from the University Henri Poincaré, Nancy 1. He received his Ph.D. degree in 2000 and his Habilitation in 2007. His research topics concern the neurophysiology of balance and gaze control, especially in relation to physical and sporting activities, osteo-articular and oto-neurological pathologies, cognitive processes and neurotoxicity. He has published more than 40 international papers in peer reviewed periodicals. He is affiliated to the National Institute for Health and Medical Research (INSERM) and is actually Associate Professor in the Faculty of Sport Sciences, Nancy-University, France. He is currently Treasurer of the European Society for Clinical Evaluation of Balance Disorders.



Karim Djaballah, MD, cardiologist at the University Hospital of Nancy, France, is head of the cardiac exercise laboratory. He also works in the field of cardiac rehabilitation and heart failure. He is particularly interested in sport cardiology and regularly evaluates cardiovascular performances of professional soccer and basketball players.



Jean-Pierre Mallié, MD, Ph.D., is Nephrologist. He was Fellowship in Nephrology and Physiology at the University Hospital of Lyon. He was Founder and Head of a Unit of Haemodialysis at the University Hospital of Saint-Etienne. Then, he became Professor (R) of Renal Pathophysiology at the University of Nancy. He is Emeritus Member of the American Society of Nephrology and of the International Society of Nephrology and expert for the Comité Mixte de Coopération Universitaire. His main publications concern toxicology of renal development and in fluids and electrolytes metabolism.



Philippe Perrin, MD, Ph.D., is Professor at Nancy-University (Physiology and Balance Control) and physician in Oto-Laryngology at the University Hospital. His research areas are the modifications of balance control strategies as a function of ageing, physical and sporting activities practised, diseases (inner ear, brain, musculoskeletal, etc.), motion sickness susceptibility, dual-tasking and rehabilitation programs. He is head of the Balance Control and Motor Performance laboratory at the University Hospital and is affiliated to the National Institute for Health and Medical Research (INSERM) at the Faculty of Medicine. He has published more than 120 papers in international peer reviewed journals and 60 in French periodicals, one book and 40 book chapters. He gave over 230 presentations at international and national conferences or scientific meetings. He is regularly advisor for MD and Pharm.D. thesis and has been so far director for 20 Ph.D. thesis (in Neuroscience and Public Health). He is regularly invited in universities outside France for conferences and to take part in panels for Ph.D. dissertation defence. He is responsible for the Master Ergonomics, Biomechanics, Motricity, Occupational Physiology (Faculty of Medicine) and for the Exercise physiology course in the Licence degree in Sport Sciences (Faculty of Sport Sciences). He was General Secretary of the Société de Physiologie (2003–07) and of the Société Internationale d'Oto-Neurologie (2005–09) and currently is President of the European Society for Clinical Evaluation of Balance Disorders and Secretary of the Neuro-otological and Equilibriometric Society. He has been the president of the organization committee of the annual meeting of the three latter societies and of the annual meeting of the French Society of Sports Medicine.

Annexe 3 : Journal of Vestibular Research 2010;20:211-212

C1-5**Obesity and postural sway during quiet upright stance**

Kathrine Jáuregui-Renaud, Nora Cruz-Gómez, Georgina Plascencia, Laura Villanueva
 Instituto Mexicano del Seguro Social, México D.F., Mexico

Objective: To assess the influence of the body mass index group (lean/ overweight/ obesity) and the gender on the postural sway of adults and adolescents during quiet upright stance.

Methods: Ninety women and 90 men accepted to participate, they were between 12 and 67 years old (mean age $35.8 \pm \text{S.D. } 12.1$ years). Postural sway, during quiet upright stance, was recorded at 40Hz using a force platform, during 4 conditions: while adding or not a layer of foam rubber to the base of support, with the eyes open or closed. A multivariate analysis of covariance was performed for each surface condition, including the repeated measures with the eyes open or closed.

Results: Although the body mass index of women and men was similar, obesity was more frequent among women, while overweight was more frequent among men. During recordings on hard surface, when the eyes were closed, obese subjects showed a larger length, area and average velocity of sway than lean and overweight subjects. Although gender differences were found during the four sensory conditions, no interaction was observed between the gender and the body mass index group. Additionally, during recordings on the foam rubber, with the eyes closed, the age was related to the length, the average velocity and the length as a function of the area of sway.

Conclusion: The findings suggest that obese subject may be more dependent on vision to control balance, with no interaction with the gender.

Oral Session C2 – Motion Sickness**C2-1****Vertigo induced by downhill mountain biking and road cycling**

Philippe Perrin¹, Alexis Lion², Gilles Bosser³, Gérome Gauchard², Dominique Vibert⁴

¹Nancy-University and University Hospital, Villers-lès-Nancy, France

²Nancy-University, Nancy, France

³Regional Institute of Rehabilitation (IRR), Nancy, France

⁴Department of Otorhinolaryngology, Inselspital, University of Bern, Bern, Switzerland

Injuries, which are mainly the consequence of falls, are reported both in road cycling and downhill mountain biking despite the consensual recommendation to wear devices to protect head, back, neck, elbows, knees and shoulders. In addition, benign paroxysmal positional vertigo has been observed after intensive mountain biking without head trauma. Displacement and/or dislocation of otoconia in the inner ear, possibly induced by vibrations and jumps, could explain this injury. Because vibrations and jumps are more common in downhill mountain biking than in road cycling, vertigo symptoms may occur more frequently in downhill mountain bikers than in road cyclists. The purpose of this study was therefore to investigate the prevalence of vertigo following competitions and training of downhill mountain biking and road cycling. In this prospective study, 111 downhill mountain bikers and 80 road cyclists filled in a questionnaire on the occurrence of vertigo induced by biking and bicycling practice, daily life activities and the possible determinants for its development. The participants were asked to describe specific bicycling events possibly involved in the occurrence of vertigo, such as falls, repeated intensive vibratory exposure (e.g. downhill on rough terrain), linear acceleration-deceleration events (high speed downhill), angular acceleration-deceleration events (set of multiple turns), jumps and exhaustion. The yearly riding time (in hours per year) of downhill mountain biking and road cycling was also gathered. Cyclists reporting vertigo after competitions and/or training were younger ($p = 0.020$) and practiced mainly downhill mountain biking ($p = 0.014$). Vertigo was associated with bicycling-related exhaustion in road cyclists ($p = 0.001$) and with repeated linear acceleration-deceleration events ($p = 0.094$) and falls in downhill mountain bikers ($p = 0.001$). The pathophysiological mechanisms generating vertigo might be directly related to the specific characteristics of each type of bicycling. The higher prevalence of vertigo in downhill mountain bikers may be explained by the bicycling practice conditions. Indeed, vibration impacts, acceleration-deceleration events, jumps and falls occur more frequently in downhill mountain biking than in road cyclists. In road cycling, effort related disturbance of homeostasis might induce vertigo. Dehydration is often observed in such sport activity and is known to

generate important changes of homeostasis. The modifications of volume and composition of the endolymph in case of dehydration may alter vestibular input. Such mechanism as well as brain cortical perfusion changes might explain the vertigo reported by road cyclists. On the other hand, the duration of a downhill mountain biking run is very short often less than 5 min. Thus, exhaustion and dehydration are unlikely to be the main cause of vertigo. Moreover, vertigo occurred not only after falls, being themselves the strongest linear deceleration, but also after linear acceleration-deceleration events. The acceleration-deceleration events recorded by the head, as well as consequences of falls, might generate transient dysfunction of brain and of peripheral vestibular structures, particularly the otolith organs which analyze linear horizontal and vertical accelerations of the head. Despite the need to investigate more precisely the vestibular function of the downhill mountain bikers, the usage of adapted materials to absorb vibrations and jumps (frame, suspensions, wheels, tires) is recommended as well as helmet's wearing and responsible behaviors.

C2-2

Motion sickness and tilting trains

Bernard Cohen¹, Mingjia Dai¹, Dmitri Ogorodnikov¹, Jean Laurens², Theodore Raphan³, Christopher Bockisch², Marco Penner², Philippe Müller⁴, Alexiou Athanasios⁴, Klaus Stadtmüller⁴, Jürgen Edmaier⁴, Thomas Grossenbacher⁴, Ueli Brugger⁵, Gerald Hauser⁵, Dominik Straumann⁶

¹Mount Sinai School of Medicine, New York, USA

²Zurich University Hospital, Zurich, Switzerland

³Brooklyn College of the City University of New York, Brooklyn, USA

⁴Schweizerische Bundesbahn, Zurich, Switzerland

⁵Alstom Schienenfahrzeuge AG, Zurich, Switzerland

⁶University of Zurich, Zurich, Switzerland

Objectives: Trains can go faster around curves if the cars are tilted inwards to compensate for the centripetal acceleration, significantly decreasing travel time. But there is a speed-up/comfort trade-off, as many passengers complain of motion sickness on tilting trains. In a joint study with the Swiss Train System (Schweizerische Bundesbahn, SBB), we wished to determine why this occurs with the aim of developing tilting strategies that would significantly reduce the discomfort. The strategy that we tested was based on our investigations of a potent way to induce motion sickness by tilting the head in roll while rotating about a yaw axis

(Dai et al., 2003). Preliminary data indicated that we could dramatically alter motion sickness sensitivity by changing the phase between yaw and roll. We postulated that inappropriate synchronization of roll with lateral acceleration as cars entered and left the turns was the responsible factor. A similar hypothesis has been proposed by Griffen (2007).

Methods: Physical data from accelerometers at different locations on the train and the subjects' heads were coupled with a survey by the SBB to measure motion sickness and travel comfort of the passengers riding under different conditions. The experimental train had three configurations: 1) 'No tilt', in which the trains simply rode the curves, generating substantial centripetal acceleration. 2) 'Reactive' Tilts, i.e., tilts initiated by accelerometers on the front wheels that detected the onset of the curves. This information then initiated the sequential tilts of the cars. The cars tilted 0.54°, 1.28° and 8° in the 'reactive' mode on separate rides. 3) 'Predictive' Tilts, i.e., tilts initiated by a system that detected the onset of curves from a 'look-up' table based on the position of the train on the track. Cars tilted 8° in the 'predictive' mode. SBB recruited two hundred subjects; one hundred had previously complained of having motion sickness while riding on tilting trains. The other one hundred had no complaints. Each day, a different set of forty subjects (20 motion sickness susceptible) rode four round trips between Winterthur and Gossau (St. Gallen) and rated their comfort level every ten minutes.

Results: Lateral acceleration was maximal in the 'no-tilt' condition, when the trains simply rode the curves, and there was no compensatory tilt of the cars. Passengers were most comfortable in the 'no-tilt' condition. This showed that lateral acceleration, itself, was not responsible for the induction of the motion sickness. Roll velocities were shorter, more precise, and had better-defined beginnings and endings with the 'predictive' than the 'reactive system'. Postural stability was also much better when standing or walking in the train in the predictive mode. Concomitantly, there was significantly less motion sickness when subjects rode in the predictive than the reactive mode, regardless of angle of tilt.

Conclusion: The finding that motion sickness was essentially abolished when roll and yaw velocities were well coordinated at the onset and end of the turns supports our initial hypothesis. It indicates that motion sickness can be reduced or eliminated on tilting trains by performing the compensatory roll tilts of the trains at the onset or in synchrony with lateral acceleration when entering and leaving turns.

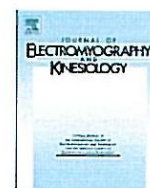
Annexe 4 : Journal of Electromyography and Kinesiology 2010;20:162-169



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Electromyography and Kinesiology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jelekin



Sensorimotor specificities in balance control of expert fencers and pistol shooters

Guillaume Herpin^a, Gérome C. Gauchard^{a,b}, Alexis Lion^{a,b}, Philippe Collet^a, Dominique Keller^c,
Philippe P. Perrin^{a,b,d,*}

^a Nancy-University, Henri Poincaré University, Balance Control & Motor Performance, UFR STAPS, 30, rue du Jardin Botanique, 54 600 Villers-lès-Nancy, France

^b National Institute for Health and Medical Research (INSERM), U 954, Vandoeuvre-lès-Nancy, France

^c Strasbourg-University, Marc Bloch University, Motor Behaviour and Sport Psychobiology, UFR STAPS, Strasbourg, France

^d University Hospital of Nancy, Department of Ear, Nose and Throat, Vandoeuvre-lès-Nancy, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 September 2008

Received in revised form 8 January 2009

Accepted 8 January 2009

Keywords:

Sensory organisation

Fencing

Pistol shooting

Balance control

Posturography

ABSTRACT

Motor skills during sport activity are influenced by practice-related constraints and leads to the development of appropriate postural sensorimotor strategies. Fencing is highly requiring visual monitoring and high-speed motor skills while retaining efficient balance control. Conversely, pistol shooting is a static activity requiring a high control of body sway. This study aimed to evaluate balance control and the related neurosensory organisation through reproducible postural tasks with and without sensory conflict. Twelve expert fencers, 10 expert shooters and 10 sedentary controls have performed a static posturographic test and a sensory organisation test (in 6 different sensory situations based upon sway-referenced vision and support surface, C1 to C6). Shooters yielded a better balance control during C1 (eyes open) and C2 (eyes closed) than fencers and controls. Fencers showed a better balance control in C5 (eyes closed with sway-referenced support surface) than shooters and controls. While this study confirms the beneficial effects of physical activities on balance control, a differential effect on balance characteristics due to the acquired specific motor skills was also noted. In addition to high proprioceptive sensitivity in sportsmen, dynamic constraints in fencing force fencers to permanently select the most relevant information to manage better sensory conflicting situations.

© 2009 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Balance control is regulated through mechanisms of postural maintaining and stabilisation, requiring management of body orientation in space by central processing of visual, vestibular and somatokinesthetic afferences (Horak et al., 1994; Massion, 1994). Under conditions of reduced or conflicting sensory inputs, balance control performances generally decrease, pointing out the importance and relevance of each sensory system (Hayashi et al., 1988; Kuo et al., 1998). However, several studies have shown a positive effect of sport training over a long period of time on sensorimotor

adaptation (Crotts et al., 1996; Lephart et al., 1996; Perrin et al., 1998, 2002).

Different balance control strategies can be developed in relation with the requirements of each sport discipline. For example, in cycling, mountain bikers rely more on somesthetic information to find a rapid and adapted motor response to the balance instability induced by the environment, whereas road cyclists, on account of a lesser balance need, rely more on vision to anticipate the following movement (Lion et al., 2009). Moreover, two sport activities, which are similar in terms of performances during posturographic evaluation in quiet stance, could differ in terms of sensory organisation. This feature is found in high-level judoists and professional ballet dancers in eyes open situation; however, postural performances highly decrease in ballet dancers in eyes closed condition, whereas judoists retain a better stance (Perrin et al., 2002). Such specificities lead to different motor behaviours, i.e. static and dynamic motor skills, which could be reflected by activities such as shooting and fencing, respectively. Indeed, whereas static balance is of major importance for shooters, fencers take much more advantage on dynamic balance. Nevertheless, in both activities, while a fine control of body movement and a specific use of vision are necessary to mark points (target or opponent, respectively), the underlying sensorimotor adaptability mechanisms are potentially different.

Abbreviations: AP, anterior–posterior; C1 to C6, conditions 1 to 6 of the sensory organisation test; C1^{ES} to C6^{ES}, equilibrium score of conditions 1 to 6; C^{ES}, composite equilibrium score; CoG, centre of gravity; CoP, centre of pressure; ES, equilibrium score; IQR, interquartile range; Lat, lateral; R^{PMAN}, proprioceptive management ratio; R^{PREF}, visual preference ratio; RQ, Romberg quotient; R^{SOM}, somatosensory ratio; R^{VEST}, vestibular ratio; R^{VS}, visual ratio; SOT, sensory organisation test; SP, sway path.

* Corresponding author. Address: Nancy-University, Henri Poincaré University, Balance Control & Motor Performance, UFR STAPS, 30, rue du Jardin Botanique, 54 600 Villers-lès-Nancy, France. Tel.: +33 383 682 929; fax: +33 383 154 647.

E-mail address: Philippe.Perrin@staps.uhp-nancy.fr (P.P. Perrin).

1050-6411/\$ - see front matter © 2009 Elsevier Ltd. All rights reserved.
doi:10.1016/j.jelekin.2009.01.003

Pistol shooting is a static activity requiring a strict control of body segments and posture to align the rear sight aperture and the foresight through proprioceptive feedback and gaze fixation either on the target directly or between the target and the weapon and, therefore, to increase precision of the shot (Ripoll et al., 1985; Aalto et al., 1990; Mononen et al., 2007). The important use of vision for shooting necessitates to rely less on this cue for balance, leading to a compensation through subconscious postural mechanisms based on proprioceptive and vestibular information. Nevertheless, while balance stability is higher in experienced shooters than in untrained controls (Niinimaa and McAvoy, 1983; Era et al., 1996; Gangloff et al., 2000) and although some influence is evident between body sway and error of shot, body sway is less important than other skill factors for performance (Aalto et al., 1990; Ball, 1999), such as a less elevation of pre-shot heart rate and blood pressure, a lower sweating and a more appropriate preparatory brain activity (Tremayne et al., 1993; Tremayne and Barry, 2001; Konttinen et al., 1995, 1998; Fenici et al., 1999).

Fencing is a ballistic dynamic activity requiring both analysis of the trajectory and spatial position of the weapon – foil, épée or sabre – with dynamic balance management based on unceasingly moving situations of high-speed attacks forcing opponents to constant spatial, temporal and situational adjustments. The fencer must manage a double constraint, reacting to the adversary and retaining balance during offensive and counter-offensive actions. Consequently, attack management requires high visual attention and the execution of the motor skill is thus carried out in a quasi automatic way according to training and related learning (Williams and Walmsley, 2000; Yiou and Do, 2001).

Therefore, each of these activities should be governed by a specific multimodal sensory organisation. Indeed, the dynamic characteristics of fencing could imply that the visual information is more used in action control whereas for balance control fencers need to select permanently the most relevant vestibular and proprioceptive information; on the other hand, pistol shooters also develop a dominant use of vestibular and proprioceptive information for balance control with a regulation model for which the need of switching between the different afferences is less crucial because of its more static characteristics as opposed to fencers. The aim of this study was to evaluate whether differences in training could lead to differences in weighting of various sensory inputs involved in balance control and whether a specific sensory organisation allows a more efficient switching between the different inputs in complex postural situations.

2. Materials and methods

2.1. Subjects

This cross-sectional study included 32 volunteers, non-smokers, without known pathology of the central nervous system, without muscle, joint or bone injury of the trunk or the lower limbs and no middle or inner ear pathology interfering with balance control during the preceding 6 months. All subjects gave informed consent before data collection, according to the current ethical laws of France. Tests were carried out in the Balance Control Laboratory of the University Hospital of Nancy (accredited for research by the Ministry of Health). Subjects were split into three groups:

- Group I was composed of twelve fencers (five women, seven men; median age = 22.0 years, interquartile range (IQR) = 2.2 years; median height = 173.0 cm, IQR = 11.5 cm). All the subjects were licensed at the French Fencing Federation and competitors at national level. Moreover, fencers had not been practicing any other physical activity for at least 9 years.

- Group II was composed of 10 pistol shooters of the French national team (four women and six men; median age = 19.5 years, IQR = 2.8 years; median height = 174.0 cm, IQR = 9.3 cm). On average, they had 10 years of training in shooting.
- Group III was composed of ten healthy and sedentary controls (three women, seven men; median age = 23.0 years, IQR = 1.3 years; median height = 173.0 cm, IQR = 6.0 cm). None practised sporting activity, had a sporting licence or took part in sport events.

2.2. Posturographic evaluation

2.2.1. Protocol and methodology

Balance control during quiet stance was evaluated with and without sensory conflict by static posturography, using a platform fitted with four strain gauges (Toennies GmbH, Freiburg, Germany) and by a sensory organisation test on a computerised dynamised posturography platform (EquiTest®, Neurocom, Clackamas, OR). The two platforms use the same technology to record the centre of pressure (CoP), i.e. the force transducers in addition to an interface allowing the transformation of force pressure information to electric information. For every testing, the subjects were requested to stand upright and barefoot on the platform, remaining as stable as possible, breathing normally, and with their arms at their sides, and were instructed to look straight ahead at a white dot located at eye level 2 m away (Toennies) or at a picture located on the visual surround (EquiTest®). To protect against falls, an operator stood within touching distance of the subject and all wore a safety harness connected by two suspension straps to the ceiling in all the test conditions.

2.2.2. Static posturographic test

The Toennies system uses four force transducers (strain gauges) mounted symmetrically on a supporting platform. Transducers measure vertical forces which allow to record positions and displacements of the CoP at 50 Hz sampling rate with 123 dB/octave low pass filter set at 30 Hz; data are filtered using a 12-bit A/D converter allowing the detection of the CoP position within 0.01 cm. The interface allows to display the position of CoP during the recording according to an abscissa and an ordinate representing respectively lateral and anterior–posterior displacements (statokinesigrams). In the static test, CoP displacements were recorded for 20 s, in eyes open and then in eyes closed conditions. Statokinesigrams represented measurement of sway path (SP) and the area covered by the CoP, in addition to sways in the anterior–posterior (AP) and lateral (Lat) axes which were determined by vectorial analysis of CoP displacement. Good balance control is mainly reflected by low values for SP and area parameters, respectively conveying efficiency and precision of balance control (Era and Heikkinen, 1985; Perrin et al., 1999). Data obtained with eyes open and eyes closed tests allows calculation of the Romberg quotients (RQ) (RQ^{SP} : eyes closed/eyes open SP ratio, RQ^{area} : eyes closed/eyes open area ratio), which determines the contribution of visual information to balance control (Van Parys and Njiokiktjien, 1976).

2.2.3. Sensory organisation test

EquiTest®, in addition to force transducers, uses a dual platform which consists of two footplates connected by a pin joint. The two footplates are supported by four force transducers (strain gauges) mounted symmetrically on a supporting centre plate. Force data were sampled to 100 Hz and stored on a PC using a 12-bit A/D converter. A fifth transducer is bracketed to the centre plate directly beneath the pin joint. The centre transducer measures shear forces along the Y-axis, in the plane parallel to the floor. The other transducers measure vertical forces applied to the dual platform. The

data is filtered using a second order Butterworth with 0 phase shift. The computer then calculates the CoP and the vertical component of the centre of gravity (CoG), using the subject height entered by the operator. The force transducers are placed so that when a subject stands with ankles centred over the stripe on the dual platform, with feet an equal distance laterally from the centre line (Y-axis), CoG being located directly above the intersection of the X- and Y-axes (position called electrical zero position, which serves as a reference point for the calculation of sway angles). The programme uses a small angle approximation to $\arcsin x$, which is accurate to 0.5% in the range of angles encountered.

The sensory organisation test (SOT) evaluates the subject's ability to make effective use of visual, vestibular and somatosensory inputs separately and to suppress sensory information that is inappropriate. To generate inadequate information, somatosensory and visual cues are disrupted by using a technique commonly referred to as sway-referenced. This technique involves tilting the support surface and/or the visual surround to directly follow the anterior-posterior sways of the subject's centre of gravity (Nashner and Peters, 1990). For body sway rates below 0.3 Hz, the program is highly accurate at estimating both the amplitude and time of the sway angle, resulting in excellent correlation between body sway and sway-referencing.

The SOT includes six conditions (Fig. 1); the first two conditions provide a basic measurement of the subject's stability and do not induce any sensory conflict; the support surface is fixed and the subject's eyes are open (condition 1) or closed (condition 2). In condition 3, the support remains fixed while the subject stands, eyes open, within a sway-referenced visual surround. From conditions 4 to 6, somatosensory information is systematically disrupted (sway-referenced) and vision is fixed (condition 4), absent (condition 5) and sway-referenced (condition 6) respectively. In conditions 3 and 4, a sensory conflict is induced, but relatively easy to solve according to a ratio between the number of disrupted information and the number of reliable information (one disrupted cue for two reliable cues). The sensory conflict is more difficult to solve in conditions 5 (one disrupted cue for one reliable cue, vision being absent) and 6 (two disrupted cues for one reliable cue). The subject's task is to maintain an upright stance during the three 20 s trials of each condition with as little postural sway as possible and without moving the feet. When the subject required the assistance of the harness or took a step, the test was rated a fall. An equilibrium score (ES) was calculated by comparing the subject's ante-

rior-posterior sway during each 20 s SOT trial to the maximal theoretical sway limits of stability. The theoretical limit of stability is based on the individual's height and size of the base of support. It represents an angle (8.5° anteriorly and 4.0° posteriorly) at which the person can lean in any direction before the centre of gravity would move beyond a point that allows him/her to remain upright (i.e. point of falling). The following formula was used to calculate the equilibrium score: $[12.5^\circ - ((\theta_{\max} - \theta_{\min})/12.5^\circ)] \times 100$, where $\theta_{\max}$ indicates the greatest AP CoG sway angle displayed by the subject while $\theta_{\min}$ indicates the lowest AP CoG sway angle. Lower sways lead to a higher ES, indicating a better balance control performance (a score of 100 represents no sway, while 0 indicates sway that exceeds the limit of stability, resulting in a fall). $C1^{ES}$ represented the averaged equilibrium score of the three trials in condition 1, $C2^{ES}$, $C3^{ES}$, $C4^{ES}$, $C5^{ES}$ and $C6^{ES}$ in conditions 2–6, respectively. A composite equilibrium score (C^{ES}) was calculated by adding the average scores from conditions 1 and 2 and the ES from each trial of sensory conditions 3, 4, 5 and 6, and finally dividing that sum by the total number of trials, that would smooth the data across all conditions. By using the individual scores for conditions 3, 4, 5 and 6, C^{ES} is effectively weighted to the more difficult conditions and characterizes the overall level of balance control performance, i.e. coupling both simple and complex postural tasks (without and with sensory conflicts) (Nashner, 1997; Colnat-Coulbois et al., 2005).

Each ES was compared with baseline average ($C1^{ES}$) to identify the significance of each sensory system influencing balance control (Table 1). These ratios work on a cancellation approach common to all mathematical ratios as well as the hierarchy of the sensory systems relative to balance control, i.e. somatosensory then vision then vestibule. In this respect, the $C2^{ES}/C1^{ES}$ ratio represents somatosensory contribution to balance control (R^{SOM}), the $C4^{ES}/C1^{ES}$ ratio the visual contribution (R^{VIS}) and the $C5^{ES}/C1^{ES}$ ratio the vestibular contribution (R^{VEST}). In addition, the ability to manage altered proprioceptive inputs (R^{PMAN}) was evaluated by comparing all the sway-referenced platform conditions with all the fixed platform conditions, which conveys proprioceptive preference $((C4^{ES} + C5^{ES} + C6^{ES})/(C1^{ES} + C2^{ES} + C3^{ES}))$ (Black et al., 1995). These ratios are useful in identifying sensory integration difficulties, as lower ratios indicate an inability to compensate for disruptions in selected sensory inputs. Ability to rely on vision, even if inadequate, was evaluated by comparing the sway-referenced visual surround with the absence of vision $[(C3^{ES} + C6^{ES})/(C2^{ES} + C5^{ES})]$, which conveys visual preference (R^{PREF}). This ratio measures the degree to which the individual relies on visual information, regardless of its accuracy; thus, a higher R^{PREF} ratio, indicating a higher visual dependency, does not systematically imply a good balance control performance (Nashner, 1997; Peterson et al., 2006).

2.3. Statistics

Statistics were performed with Statview Software (Abacus Concepts Inc., Berkeley, CA) using non-parametric tests on account of the lack of Gaussian distribution for the main posturographic parameters (verification of the normal distribution of data by graphic method), probably due to the relatively small sample size. The global heterogeneity between the three groups was tested with the H of Kruskal Wallis and, for each statistically significant value of H , pairwise comparisons were made using the Mann & Whitney test. Statistically significant differences were accepted for a probability level of $p \leq 0.05$ and borderline significance for a probability level of $p \leq 0.10$. The Bonferroni procedure was applied to pairwise comparisons by adjusting "familywise alpha" to a significance level of $p \leq 0.05/3 = 0.017$ in accordance with the three possible comparisons, borderline significance being defined to a level of $p \leq 0.10/3 = 0.033$.

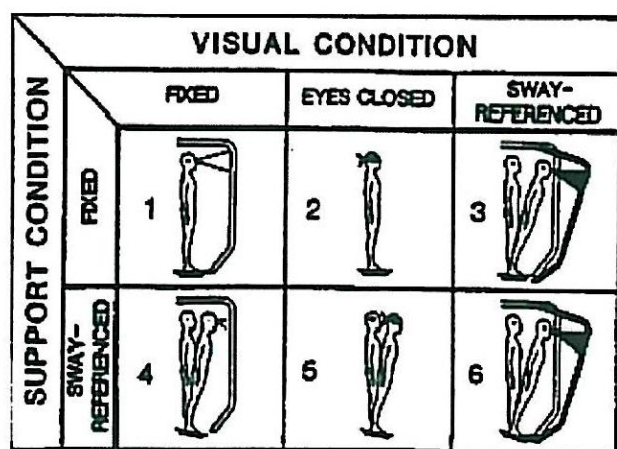


Fig. 1. The six conditions of the Sensory Organisation Test (EquiTest, Neurocom International Inc., Clackamas, OR). Conditions 1–3 were performed on a fixed platform with eyes open, eyes closed and vision sway-referenced. Conditions 4–6 were performed on a sway-referenced platform with eyes open, eyes closed and vision sway-referenced respectively.

Table 1
Significance of sensory analysis (according to Nashner (1997) and Black et al. (1995)).

Ratio name	Ratio pair	Significance
R^{SOM} somatosensory	C2/C1	Question: Does sway increase when visual cues are removed? Low scores: Poor use of somatosensory references
R^{VIS} visual	C4/C1	Question: Does sway increase when somatosensory cues are inaccurate? Low scores: Poor use of visual references
R^{VEST} vestibular	C5/C1	Question: Does sway increase when visual cues are removed and somatosensory cues are inaccurate? Low scores: Poor use of vestibular cues or vestibular cues unavailable
R^{PREF} visual preference	(C3 + C6)/(C2 + C5)	Question: Do inaccurate visual cues result in increased sway compared to no visual cues? Low scores: Reliance on visual cues even inaccurate
R^{PMAN} altered proprioceptive information management	(C4 + C5 + C6)/(C1 + C2 + C3)	Question: Do inaccurate somatosensory cues result in increased sway compared to accurate somatosensory cues? Low scores: Poor compensation for disruptions in selected sensory inputs

3. Results

No significant differences between the three groups were observed for age ($H = 4.08$, $p = 0.13$), height ($H = 1.17$, $p = 0.56$) and gender ($H = 0.88$, $p = 0.88$).

For the static posturographic tests (Fig. 2), the results observed in eyes open condition indicated a significant heterogeneity for Lat parameter ($H = 7.89$, $p = 0.01$) and a borderline significance for area parameter ($H = 5.28$, $p = 0.07$). Pairwise comparisons showed that Lat values were lower in fencers than in controls ($z = -2.63$, $p = 0.008$) and in shooters than in controls ($z = -2.19$, $p = 0.028$). In eyes closed condition, significant heterogeneity was observed for SP ($H = 9.36$, $p = 0.01$), area ($H = 6.88$, $p = 0.03$) and Lat ($H = 8.68$, $p = 0.01$) parameters. Pairwise comparisons showed that SP, area and Lat values were lower in shooters than in controls ($z = -2.83$, $p = 0.005$; $z = -2.49$, $p = 0.012$; $z = -2.57$, $p = 0.010$, respectively) and in fencers than in controls ($z = -2.24$, $p = 0.025$; $z = -2.34$, $p = 0.019$, respectively). No statistically significant difference was observed for AP parameters between the three groups and for all parameters between fencers and shooters in any eyes open or eyes closed conditions. For Romberg quotients, only RQ^{SP} differed between the three groups ($H = 11.86$, $p = 0.002$), lower values being observed in shooters than in controls ($z = -3.31$, $p = 0.001$).

For the SOT (Fig. 3), no fall has been observed in the three groups whatever the condition. The results observed in $C1^{\text{ES}}$, $C2^{\text{ES}}$, $C5^{\text{ES}}$ and $C6^{\text{ES}}$ indicated a significant heterogeneity ($H = 8.77$, $p = 0.012$; $H = 8.35$, $p = 0.015$; $H = 9.29$, $p = 0.009$; $H = 11.07$, $p = 0.003$, respectively) and a borderline significance for $C3^{\text{ES}}$ ($H = 5.41$, $p = 0.064$) and $C4^{\text{ES}}$ ($H = 5.50$, $p = 0.063$). No statistically significant difference was found for $C6^{\text{ES}}$ between the three groups. Pairwise comparisons showed significantly higher values in shooters compared to controls for $C1^{\text{ES}}$ ($z = -2.87$, $p = 0.004$) and $C2^{\text{ES}}$ ($z = -2.83$, $p = 0.004$). Pairwise comparisons showed differences for $C5^{\text{ES}}$ which were statistically significant between fencers and controls ($z = -2.93$, $p = 0.003$) and close to significance between fencers and shooters ($z = -2.17$, $p = 0.029$) with higher values in fencers. For $C6^{\text{ES}}$, pairwise comparisons showed differences which were statistically significant between fencers and controls ($z = -3.13$, $p = 0.001$) and close to significance between shooters and controls ($z = -2.15$, $p = 0.031$) with higher values in fencers and shooters than in controls. Concerning ratios, significant heterogeneity was observed for R^{VEST} and R^{PMAN} ($H = 9.58$, $p = 0.008$; $H = 9.72$, $p = 0.007$, respectively). Pairwise comparisons showed that, for both parameters, fencers displayed significantly higher values compared to shooters ($z = -2.47$, $p = 0.013$; $z = -2.63$, $p = 0.008$, respectively) and controls ($z = -2.76$, $p = 0.005$; $z = -2.63$, $p = 0.008$, respectively), whereas pairwise comparisons between shooters and controls showed no statistically significant differences.

4. Discussion

This study aimed to evaluate the effects, on balance control, of practice of two sporting activities leading to different motor behaviours, i.e. static and dynamic motor skills, respectively pistol shooting and fencing. Not only balance control was more efficient in shooters and fencers than in controls, but also neurosensory balance organisation seemed to differ between both disciplines. Lower values for Romberg quotient and for the main posturographic parameters in eyes closed situations were observed in shooters, highlighting a less reliance on vision and a better balance control in static conditions. On the other hand, better ability to use vestibular and proprioceptive information was observed in fencers, especially in the situations involving vestibular input as a main cue.

Fencers and shooters displayed more efficient balance control and lower lateral sways than the controls, both in eyes open and eyes closed conditions by developing particularly proprioceptive sensitivity. In fact, previous studies have shown that physical activities are involved in the development of proprioception both in younger (Mesure et al., 1997; Perrin et al., 1998) and in elderly (Perrin et al., 1999; Gauchard et al., 2001) subjects. Balance regulation during quiet stance and adaptation to the environment are based on background postural tone and on the postural reflexes, which are generated by the vestibular, visual and somatosensory systems, and involve higher levels of central processing. For the static test in eyes open condition, proprioceptive information provided by the legs is the most sensitive information for perceiving postural sway, vision appears to play a relatively minor role, and balance-related accelerations are below threshold of vestibular organ sensation (Benson et al., 1986; Fitzpatrick and McCloskey, 1994; Winter et al., 1998). Guard posture in fencing implies a head rotation near to 90° to keep the gaze fixed on the opponent which increases postural tone in the opposite limb (Allum et al., 1995). During steps and/or lunges execution (i.e. offensive action), the weight of the body is transmitted to the backward foot to provoke a sharp offensive reaction, this being facilitated by head position and indeed modified muscular tone. This CoG transfer generates high solicitation of the somatokinesthetic receptors to maintain posture while allowing quick modifications of this posture according to opponent reaction. In shooting, it is well-known that respiration could contribute to increased sway through the destabilizing effect of the associated trunk movements (Hunter and Kearney, 1981; Jeong, 1991). High attention level of shooters, particularly on respiratory timing and amplitude and heart rate (a low heart rate facilitating shooting between two heart beats), could also contribute to increase the performance (Tremayne et al., 1993; Kontinen et al., 1998). Moreover, the posture of the shooter is alike fencing guard with amble position of body, head rotation near to 90° and a parallel placement of the feet. Thus,

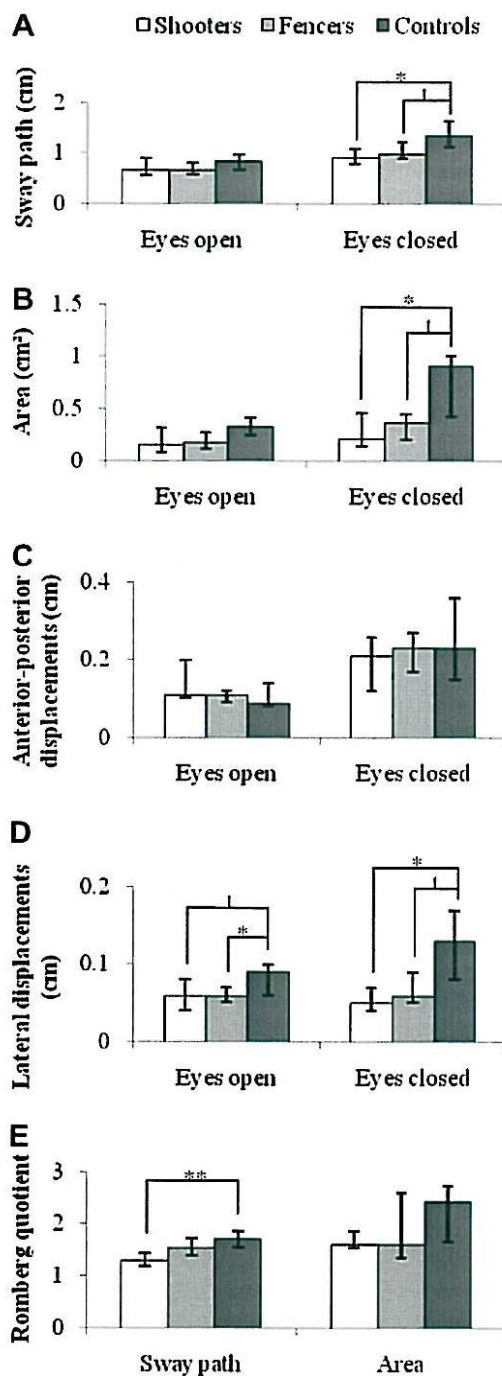


Fig. 2. Static test – median results, associated with interquartile range, of sway path (graph A), area (graph B), anterior-posterior (graph C) and lateral (graph D) parameters in eyes open and eyes closed conditions, and Romberg's quotient (graph E) observed in shooter (white bars), fencer (light grey bars) and control (dark grey bars) groups. * $p \leq 0.033$; ** $p \leq 0.017$; *** $p \leq 0.003$ (after Bonferroni correction).

the feet position required in these two activities imply more stimulation in its medial-lateral plane.

This study has also shown that fencing seems to be associated with a better contribution of vestibular information in postural regulation, the latter being observed especially in situations involving sensory conflicts. Although, in fencing, vision is not a preponderant information for balance control but essential for specific

fencing actions, visual contribution in postural regulation is paradoxically similar to controls. Recent research on the effects of extensive practice suggests that certain types of training increase visual attention abilities (Cavanagh and Alvarez, 2005). Fencing imposes firstly the tracking of multiple targets, such as opponent guard, opponent armed hand or floor, and secondly the necessity to counter-attack, especially when information from opponent targets reveal feint execution. This ability implies reactional strategies based on vision leading to a reduction in available time. Similarly, during shooting, vision is directed at sighting and, as previously suggested, cannot be used preferentially for postural stability control (Aalto et al., 1990). This is confirmed by the comparison with the control group (Romberg quotient higher for controls than shooters) although one finding suggests that expert air-pistol shooters were able to shoot at the target with greatest success when not having maximal visual attention on where the pistol was aimed, as controlled by mechanisms of intention (Loze et al., 2001). Thus, these activities seem to be governed by the same visual environmental constraints which determine the accuracy of the shot and the execution of technical gesture adapted to the opponent action respectively. The focus of balance control must, therefore, be shifted towards other sensory cues, especially proprioception.

Both in fencing and shooting, the technical gesture performed involves in most cases a fixation in a 90° rotation of the head on the trunk. This specific posture should lead, during a movement in anterior-posterior plane, to a higher stimulation of otolithic organs than of semi-circular canals. Besides, vestibular information to control balance is rather of utriculo-saccular origin than of semi-circular canal origin (Mouchnino et al., 1992). Nevertheless, shooting is a static activity based on a strict control of body posture whereas fencing is based on unceasingly moving situations of high-speed attacks forcing opponents to constant spatial and temporal adjustments. Therefore, this dynamic activity of fencing leads to permanent destabilising situations and so continuously forces to anticipate and adjust motor programs to sensory feedback messages. These situations necessitate to find the most relevant information to adjust balance to the action in progress. This ability to take into account the most reliable information allows a better sensory conflict management, e.g. by increasing the vestibular organ gain. Conversely, shooters are specifically trained to maintain a bipedal posture, as still as possible, in order to stabilize the weapon in stable environment without spatial and temporal constraints. Therefore, they did not particularly develop abilities to adapt balance control during sensory conflict situations which require an increased use of vestibular input or during proprioceptive altered situations.

Some limitations could be considered. Firstly, this study, which is cross-sectional and not longitudinal, makes more difficult to know if the effect found is due to sports training. However, taking into account three groups, i.e. one group of subjects practising no sporting activity and two groups of subjects practising sporting activities potentially relying on different mechanisms of balance control due to the motor skills required, allows to partially control for this aspect. Indeed, this study allows, on the one hand, to highlight the global effects of sport by the comparison with the lack of sport practice and, on the other hand, to determine the specificities acquired by the comparison between fencing and shooting. Secondly, although the sample was of relatively small size and composed by men and women, the three groups are homogeneous regarding the main potentially confounding variables (age, height and gender). Moreover, whereas age effects are known on balance control, several studies showed no gender effect during quiet stance for the age range observed in our study (Kollegger et al., 1992; Wolfson et al., 1994; Hageman et al., 1995; Perrin et al., 2002), even though Ekdhall et al. (1989) evidenced better standing

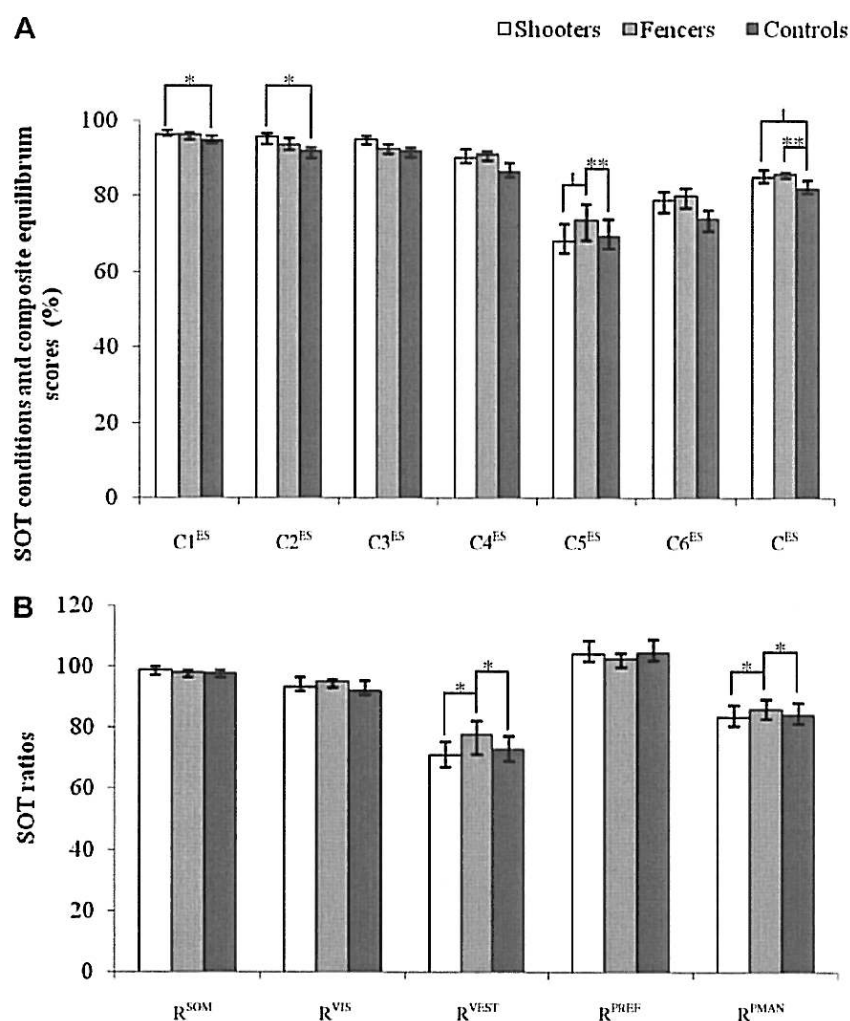


Fig. 3. Sensory organisation test – median results, associated with interquartile range, of the equilibrium score (ES, in%) for the six conditions (C1^{ES}, C2^{ES}, C3^{ES}, C4^{ES}, C5^{ES} and C6^{ES}) and the composite equilibrium score (C^{ES}) (graph A) and for the different ratios (R^{SOM}, R^{VIS}, R^{VEST}, R^{PREF} and R^{PMAN}, without unit) (graph B) observed in shooter (white bars), fencer (light grey bars) and control (dark grey bars) groups. * $p \leq 0.033$; ** $p \leq 0.017$; *** $p \leq 0.003$ (after Bonferroni correction).

balance in women than in men, but within a population including older subjects (20–64 years old) than our sample.

5. Conclusion

This study has shown that balance control in fencers and shooters, through a different use of vestibular and proprioceptive information, is more efficient than that of controls. In both sports the role of vision is similar, i.e. mainly attributed to the management of the action. Fencers use visual information to analyse the opponent intention whereas shooters for the sighting. Thus, their vision cannot be used preferentially to control postural stability. Moreover, this study has also shown balance specificities in these two types of physical activity, especially concerning sensory conflict management and directly related to the dynamic environmental constraints. Fencing, the more dynamic activity in this study, promotes better management of disruptive balance situations through better efficiency of the central nervous system to find the most relevant information, especially from vestibular source. Without this ability the fencer could fall or increase his reaction time allowing the opponent to realise a counter-attack. Nevertheless, these results should be confirmed in a larger population through a direct measure of the neurosensory organisation during actual shooting and fencing tasks.

Acknowledgements

The authors are grateful to FFTir (Fédération Française de Tir), shooters from Pôle France de Tir de Strasbourg and fencers from Salle d'Armes de Nancy.

References

- Aalto H, Pyykkö I, Ilmarinen R, Kähkönen E, Starck J. Postural stability in shooters. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec* 1990;52:232–8.
- Allum JH, Honegger F, Acuna H. Differential control of leg and trunk muscle activity by vestibulo-spinal and proprioceptive signals during human balance corrections. *Acta Otolaryngol* 1995;115:124–9.
- Ball K. Body sway and aim point fluctuation in rifle and pistol shooters. Victoria University Thesis, Melbourne, 1999.
- Benson AJ, Spencer MB, Scott JR. Thresholds for the detection of whole-body linear movement in the horizontal plane. *Aviat Space Environ Med* 1986;57:1088–96.
- Black FO, Paloski WH, Doxey-Gasway DD, Reschke MF. Vestibular plasticity following orbital spaceflight: recovery from postflight postural instability. *Acta Otolaryngol* 1995(Suppl. 520):450–4.
- Cavanagh P, Alvarez GA. Tracking multiple targets with multifocal attention. *Trends Cogn Sci* 2005;9:349–54.
- Colnat-Coulbois S, Gauchard GC, Maillard L, Barroche G, Vespignani H, Auque J, et al. Bilateral subthalamic nucleus stimulation improves balance control in Parkinson's disease. *J Neurol Neurosurg Psychiatr* 2005;76:780–7.
- Crotts D, Thompson B, Nahom M, Ryan S, Newton RA. Balance abilities of professional dancers on select balance tests. *J Orthop Sports Phys Ther* 1996;23:12–7.

- Ekdal C, Jarnlo GB, Andersson SI. Standing balance in healthy subjects. Evaluation of a quantitative test battery on a force platform. *Scand J Rehab Med* 1989;21:187–95.
- Era P, Heikkinen E. Postural sway during standing and unexpected disturbance of balance in random samples of men of different ages. *J Gerontol* 1985;40:287–95.
- Era P, Konttinen N, Mehto P, Saarela P, Lyytinen H. Postural stability and skilled performance – a study on top-level and naive rifle shooters. *J Biomech* 1996;29:301–6.
- Fenici R, Ruggieri MP, Brisinda D, Fenici P. Cardiovascular adaptation during action pistol shooting. *J Sports Med Phys Fitness* 1999;39:259–66.
- Fitzpatrick R, McCloskey DI. Proprioceptive, visual and vestibular thresholds for the perception of sway during standing in humans. *J Physiol* 1994;478:173–86.
- Gangloff P, Louis JP, Perrin PhP. Dental occlusion modifies gaze and posture stabilization in human subjects. *Neurosci Lett* 2000;293:203–6.
- Gauchard GC, Jeandel C, Perrin PhP. Physical and sporting activities improve vestibular afferent usage and balance in the elderly human subjects. *Gerontology* 2001;47:263–70.
- Hageman PA, Leibowitz JM, Blanke D. Age and gender effects on postural control measures. *Arch Phys Med Rehab* 1995;76:961–5.
- Hayashi R, Miyake A, Watanabe S. The functional role of sensory inputs from the foot: stabilizing human standing posture during voluntary and vibration-induced body sway. *Neurosci Res* 1988;5:203–13.
- Horak FB, Shupert CL, Dietz V, Horstmann G. Vestibular and somatosensory contributions to responses to head and body displacements in stance. *Exp Brain Res* 1994;100:93–106.
- Hunter IW, Kearney RE. Respiratory components of human postural sway. *Neurosci Lett* 1981;25:155–9.
- Jeong BY. Respiration effect on standing balance. *Arch Phys Med Rehab* 1991;72:642–5.
- Kollegger H, Baumgartner C, Wöber C, Oder W, Deecke L. Spontaneous body sway as a function of sex, age, and vision: posturographic study in 30 healthy adults. *Eur Neurol* 1992;32:253–9.
- Konttinen N, Lyytinen H, Konttinen R. Brain slow potentials reflecting successful shooting performance. *Res Quart Exercise Sport* 1995;66:64–72.
- Konttinen N, Lyytinen H, Viitasalo J. Preparatory heart rate patterns in competitive rifle shooting. *J Sports Sci* 1998;16:235–42.
- Kuo AD, Speers RA, Peterka RJ, Horak FB. Effect of altered sensory conditions on multivariate descriptors of human postural sway. *Exp Brain Res* 1998;122:185–95.
- Lephart SM, Giraldo JL, Borsia PA, Fu FH. Knee joint proprioception: a comparison between female intercollegiate gymnasts and controls. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1996;4:121–4.
- Lion A, Gauchard GC, Deviterne D, Perrin PhP. Differentiated influence of off-road and on-road cycling practice on balance control and the related-neurosensory organization. *J Electromyogr Kinesiol* 2009;19:623–30.
- Loze GM, Collins D, Holmes PS. Pre-shot EEG alpha-power reactivity during expert air-pistol shooting: a comparison of best and worst shots. *J Sports Sci* 2001;19:727–33.
- Massion J. Postural control system. *Curr Opin Neurobiol* 1994;4:877–87.
- Mesure S, Amblard B, Crémieux J. Effect of physical training on head-hip co-ordinated movements during unperturbed stance. *Neuroreport* 1997;8:3507–12.
- Mononen K, Konttinen N, Viitasalo J, Era P. Relationships between postural balance, rifle stability and shooting accuracy among novice rifle shooters. *Scand J Med Sci Sports* 2007;17:180–5.
- Mouchinno L, Aurenty R, Massion J, Pedotti A. Coordination between equilibrium and head trunk orientation during leg movement. *J Neurophysiol* 1992;67:1587–98.
- Nashner LM. Computerized dynamic posturography. In: Jacobson GP, Newman CW, Kartush JM, editors. *Handbook of Balance Function Testing*. London: Thomson Learning; 1997. p. 280–307.
- Nashner LM, Peters JF. Dynamic posturography in the diagnosis and management of dizziness and balance disorders. *Neurol Clin* 1990;8:331–49.
- Niinimaa V, McAvoy T. Influence of exercise on body sway in the standing rifle shooting position. *Can J Appl Sport Sci* 1983;8:30–3.
- Perrin PhP, Deviterne D, Hugel F, Perrot C. Judo, better than dance, develops sensorimotor adaptabilities involved in balance control. *Gait Posture* 2002;15:187–94.
- Perrin PhP, Gauchard GC, Perrot C, Jeandel C. Effects of physical and sporting activities on balance control in elderly people. *Brit J Sports Med* 1999;33:121–6.
- Perrin PhP, Schneider D, Deviterne D, Perrot C, Constantinescu L. Training improves the adaptation to changing visual conditions in maintaining human postural control in a test of sinusoidal oscillation of the support. *Neurosci Lett* 1998;245:155–8.
- Peterson ML, Christou E, Rosengren KS. Children achieve adult-like sensory integration during stance at 12-years-old. *Gait Posture* 2006;23:455–63.
- Ripoll H, Papin JP, Guezennec JY, Verdy JP, Philip M. Analysis of visual scanning patterns of pistol shooters. *J Sports Sci* 1985;3:93–101.
- Tremayne P, Barry RJ, Burke S. From novices to experts in pistol shooting: what the researchers say. *Sports Coach* 1993;16:37–41.
- Tremayne P, Barry RJ. Elite pistol shooters: physiological patterning of best vs. worst shots. *Int J Psychophysiol* 2001;41:19–29.

- Van Parys JA, Njikiktjen CJ. Romberg's sign expressed in a quotient. *Agressologie* 1976;17:95–9.
- Williams LR, Walmsley A. Response timing and muscular coordination in fencing: a comparison of elite and novice fencers. *J Sci Med Sport* 2000;3:460–75.
- Winter DA, Patla AE, Prince F, Ishac M, Gielo-Perczak K. Stiffness control of balance in quiet standing. *J Neurophysiol* 1998;80:1211–21.
- Wolfson L, Whipple R, Derby CA, Amerman P, Nashner L. Gender differences in the balance of healthy elderly as demonstrated by dynamic posturography. *J Gerontol* 1994;49:160–7.
- Yiou E, Do MC. In a complex sequential movement, what component of the motor program is improved with intensive practice, sequence timing or ensemble motor learning? *Exp Brain Res* 2001;137:197–204.



Guillaume Herpin obtained a Master degree in Sport Sciences in 2004 and a Ph.D. degree in Epidemiology and Public Health at Nancy-University, Henri Poincaré University, in 2008. His research topics concern the neurophysiology of balance and gaze control, especially in relation to physical and sporting activities and to neurotoxicity. He is affiliated to the Balance Control and Motor Performance laboratory and to the National Institute for Health and Medical Research (INSERM). He practiced fencing at a regional level of competition.



Jérôme Gauchard is a Doctor in Neurosciences from the University Henri Poincaré, Nancy 1. He received his Ph.D. degree in 2000 and his Habilitation in 2007. His research topics concern the neurophysiology of balance and gaze control, especially in relation to physical and sporting activities, osteo-articular and oto-neurological pathologies, cognitive processes and neurotoxicity. He has published 40 international papers in peer reviewed periodicals. He is affiliated to the National Institute for Health and Medical Research (INSERM) and is actually Associate Professor in the Faculty of Sport Sciences, Nancy-University, France. He is currently Treasurer of the European Society for Clinical Evaluation of Balance Disorders.



Alexis Lion obtained a Licence degree in Sport Sciences in 2004 and a Master in Bioengineering-Bio-mechanics in 2006, and is currently Ph.D. student at Nancy-University, Henri Poincaré University (East of France). He is affiliated to the Balance Control and Motor Performance laboratory and to the National Institute for Health and Medical Research (INSERM). His research topics concern the postural control in relation with physical and sporting activities, muscular exercise and metabolic disorders. He practices road cycling at a national level of competition.



Philippe Collet obtained the CAPEPS (certificate for teaching sport education) degree and is currently sport teacher at the Faculty of Sport Sciences, Nancy-University, France. He is in charge of formation of the teachers in physical and sports education, especially in fencing. Among his palmares in fencing, he was scholar and federal champion of France and university vice-champion of France in sabre, and international military to the battalion of Joinville. He became prévôt d'armes and maître d'armes, and obtained the silver medal of the Ministry of the Youth and Sports.



Dominique Keller is Professor in Psychobiology of motor behaviour in the domain of physical and sporting activities, especially in skiing, tennis and soccer, in the Faculty of Sports Sciences at Strasbourg University, France. He works on the preparatory behaviour in the execution of a physical activity or a sport related movement. He was editor of books in the field of sport and motricity, and wrote book chapters and papers in journals in sports sciences. He was director of a master of sports sciences.

conferences or scientific meetings. He is regularly advisor for M.D. and Pharm.D. thesis and has been so far director for 20 Ph.D. thesis (in Neuroscience and Public Health). He is regularly invited in universities outside France for conferences and to take part in panels for Ph.D. dissertation defence. He is responsible for the Master Ergonomics, Biomechanics, Motricity, Occupational Physiology (Faculty of Medicine) and for the Exercise physiology course in the Licence degree in Sport Sciences (Faculty of Sport Sciences). He was General Secretary of the Société de Physiologie (2003–07) and currently is President of the European Society for Clinical Evaluation of Balance Disorders and General Secretary of the Société Internationale d'Oto-Neurologie. He has been the president of the organisation committee of the annual meeting of the two latter societies and of the annual meeting of the French Society of Sports Medicine.



Philippe Perrin, MD, Ph.D., is Professor at Nancy University (Physiology and Balance control) and physician in Oto-Laryngology at the University Hospital. His research areas are the modifications of balance control strategies as a function of ageing, physical and sporting activities practised, diseases (inner ear, brain, musculo-skeletal, etc.), motion sickness susceptibility, dual-tasking and rehabilitation programs. He is head of the Balance Control and Motor Performance laboratory at the University Hospital and is affiliated to the National Institute for Health and Medical Research (INSERM) at the Faculty of Medicine. He has published more than 120 papers

in international peer reviewed journals and 60 in French periodicals, one book and 40 book chapters. He gave over 220 presentations at international and national

Modifications des stratégies sensori-motrices de l'équilibration en fonction du type d'exercice et de perturbations de l'homéostasie.

L'exercice permet l'acquisition et l'intégration de nouvelles habiletés motrices propres à la nature de l'activité considérée. L'exercice est également un facteur de risque de lésions et semble altérer temporairement la fonction d'équilibration. Cependant, les mécanismes physiologiques et physiopathologiques et leurs conséquences sur la fonction d'équilibration sont encore mal connus. Ce travail, pour lequel le cyclisme a été utilisé comme modèle neurosensoriel, visait à évaluer les éventuelles modifications des stratégies sensori-motrices physiologiques et compensatoires de la fonction d'équilibration en fonction du type d'exercice et de perturbations de l'homéostasie.

Les stratégies sensori-motrices de routiers et de vététistes et celles des effets d'une déshydratation induite par un exercice ont été évaluées par posturographie. De plus, la prévalence de vertiges après compétitions ou entraînements a été évaluée par questionnaire chez des routiers et des descendeurs (spécialistes du vélo tout terrain descente).

Pour assurer la fonction d'équilibration, les vététistes, qui pratiquaient le plus de VTT, utilisaient principalement les informations proprioceptives. Les routiers et les vététistes, qui pratiquaient le plus le cyclisme sur route, utilisaient davantage les informations visuelles. La déshydratation induite par l'exercice altérait temporairement le contrôle postural. Plus la déshydratation était importante, moins les informations vestibulaires étaient requises. Les vertiges survenaient couramment après la pratique du cyclisme et, en particulier, en VTT descente. L'épuisement a été rapporté comme un déterminant important des vertiges en cyclisme sur route alors que les accélérations-décélérations brusques et les chutes ont été rapportées comme déterminants des vertiges en VTT descente.

La différence d'organisation sensorielle entre les vététistes et les routiers peut être expliquée par des processus adaptatifs élaborés à partir des stimulations environnementales et des spécificités techniques de ces disciplines. Bien que la fatigue musculaire puisse expliquer les altérations posturales à la suite d'un exercice, les modifications de l'homéostasie des liquides vestibulaires peuvent également diminuer le poids de l'information vestibulaire dans la régulation de l'équilibration. Les mécanismes physiopathologiques générant des vertiges peuvent être liés à des modifications homéostatiques induites par l'effort en cyclisme sur route. En VTT descente, les accélérations-décélérations (incluant les chutes), auxquelles la tête est soumise, peuvent générer des dysfonctionnements des structures vestibulaires, en particulier des organes otolithiques.

Mots clés : exercice, cyclisme, posturographie, organisation sensorielle, déshydratation, vertiges.

Changes in sensory-motor strategies of balance in function of the type of exercise and homeostatic perturbations.

Exercise leads to the acquisition and the integration of new motor skills specific for the type of practiced activity. Exercise is also a risk factor for injuries and seems to transiently alter the balance function. Nevertheless, physiological and pathophysiological mechanisms and their consequences on balance function still remain unclear. This work, which used cycling as a neurosensory model, aimed to evaluate the possible changes of physiological and compensatory balance-related sensory-motor strategies in function of the type of exercise and homeostatic perturbations.

Road cyclists' (RCs) and mountain bikers' (MTBs) sensory-motor strategies were evaluated by posturography as well as the effects of exercise-related dehydration. Moreover, the prevalence of vertigo after competitions or training sessions was investigated by a questionnaire in RCs and downhill mountain bikers (MTBs^{Dh}).

Balance-related visual information was better used by RCs and MTBs, who mainly practised road cycling. Somesthetic information was better used in MTB, who mainly practiced mountain biking. Exercise-related dehydration transiently altered postural control. The more severe the dehydration, the lower was the use of vestibular information. Vertigo commonly occurred after the practice of cycling, particularly in downhill mountain biking. Exhaustion was reported as a crucial factor for vertigo by RCs, whereas for MTBs it was sudden accelerations-decelerations and falls.

The difference in sensory organisation between MTB and RC could be explained by adaptive processes elaborated from environmental stimulations and technical specificities of these disciplines. Even though muscular fatigue could explain the exercise-induced alterations of postural performances, vestibular fluid modifications may also be involved by their influence on intralabyrinthine homeostasis, lowering thus the contribution of vestibular information on balance control. The pathophysiological mechanisms generating vertigo might be an effort-related disturbance of homeostasis in RCs. In MTBs^{Dh}, the accelerations-decelerations (including falls), to which the head is subjected, might generate dysfunction of peripheral vestibular structures, particularly the otolith organs.

Keywords: exercise, cycling, posturography, sensory organisation, dehydration, vertigo.