



HAL
open science

Rôle de la convergence oculomotrice dans le contrôle de la posture

Thanh Thuan Le

► **To cite this version:**

Thanh Thuan Le. Rôle de la convergence oculomotrice dans le contrôle de la posture. Neurosciences. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2008. Français. NNT : 2008PA066178 . tel-00812531

HAL Id: tel-00812531

<https://theses.hal.science/tel-00812531>

Submitted on 12 Apr 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**THESE DE DOCTORAT DE
L'UNIVERSITÉ PARIS VI - PIERRE ET MARIE CURIE**

Spécialité

Sciences Cognitives (3C - Cerveau, Cognition et Comportement)

Présentée par

Mr LÊ Thanh-Thuan

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PARIS VI-PIERRE ET MARIE CURIE

Rôle de la vergence oculomotrice dans le contrôle de la posture

Soutenue le devant le jury composé de :

Mme Kapoula Zoï (DR)	Directeur de thèse
Mr Pierrot-Deseilligny Charles (Pr)	Président
Mme Assaiante Christine (DR)	Rapporteur
Mr Vital-Durand François (DR)	Rapporteur
Mme Bessou Monique (DR émérite)	Examineur
Mr Prince François (Pr)	Examineur
Mme Pissaloux Edwige (Pr)	Invitée

Remerciements

Je remercie les docteurs Christine Assaiante et François Vital-Durand pour avoir porté leur regard expert sur mon manuscrit, ainsi que le docteur Monique Bessou et les professeurs Charles Pierrot-Deseilligny, Edwige Pissaloux et François Prince pour avoir accepté de faire partie du jury de ma thèse.

Je tiens à remercier Zoï Kapoula pour m'avoir pris sous son aile durant ces trois années de thèse. Sa grandeur d'esprit et son sens de la perfection auront marqué, j'en suis certain, ma façon de travailler.

Ma pensée va aussi vers les autres membres fondateurs du Laboratoire Iris : Maria-Pia Bucci pour sa bonne humeur et pour son soutien, en particulier, durant la rédaction de mon manuscrit, Qing Yang pour son aide sur les différents aspects de l'analyse des mouvements oculaires, Marine Vernet qui, bien qu'elle soit arrivée après moi, m'a beaucoup plus apporté que moi réciproquement, Frédéric Rey et Eric Matheron avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à collaborer à travers les différentes études en posturographie. Eric Matheron pour son aide, si spontanée, durant la rédaction de la thèse.

Je tiens aussi à remercier les anciens membres de l'équipe ainsi que les stagiaires avec qui j'ai eu beaucoup d'échanges enrichissants (Olivier Coubard, Emilie Debay, Frédéric Jurion, Julie Ayoun, Marion Fauvernier, Rebecca Ganem, Estelle Longin, Nathalie Lorin, Sarah Poncet, Luc Arnal, Sophie Vuillermet, Audrey Castex, Pauline Misset, Solveig Bruneau, Delphine Oudiette, Marie Gruselle, Mareike Trams, Audrey Bonnet, et Pauline Bourtoire).

La plupart des études ont été réalisées au Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action (LPPA) au Collège de France dirigé par Le Pr. Alain Berthoz. Une des études a été menée à l'Hôpital Européen Georges Pompidou en collaboration avec le Dr Christophe Orssaud, Nolwenn Berbey, et Johann Berthe que je remercie pour leur accueil et leur disponibilité.

Mes remerciements vont également aux étudiants du Collège de France ainsi que le personnel « senior » de l'Institut de Biologie qui se sont prêtés aux expériences relatives à cette thèse. Je remercie également le personnel du LPPA (Valérie Blondel, Aline Delizy, Linda De Suza, Yves Dupraz, Gérard Krebs, Annie Piton, Sébastien Rateau, Yves Parbois, Sébastien et Brigitte) qui, malgré tout, a pu apporter une certaine infrastructure pour l'équipe et pour moi-même.

Merci à Serge pour son aide précieuse en ce qui concerne les erreurs de français qu'il m'arrive de commettre.

Pour terminer, je remercie ma famille ainsi que mes amis pour leur soutien inconditionnel.

CURRICULUM VITÆ

LÊ Thanh-Thuan

Né le 28 septembre 1980

Domaine de recherche

La vision, la posture, le vieillissement

Projets scientifiques

2005-2008 : Doctorant dans le groupe IRIS sous la direction de Mme Kapoula Zoï

Titre de la thèse : Rôle de la vergence oculomotrice dans le contrôle de la posture

2002-2004 : Master au Laboratoire de Neurosciences et Systèmes Sensoriels sous la direction de Mme Chery-Croze (UMR 5020)

Titre du travail de recherche : Comparaison des processus attentionnels dans le paradigme d'indication spatiale entre des sujets acouphéniques et non acouphéniques.

Diplômes

2003-2004 : Master 2^e année des sciences cognitives (Lyon 2)

2001-2002 : Licence 3^e année des sciences cognitives (Lyon 2)

2000-2001 : DEUG 2^e année des sciences de la vie (Lyon 1)

Langues et outils informatiques

Langues: Anglais scientifique (maîtrisé)

Outils informatiques: Word, Excel, PowerPoint, Statistica, Paint, Photoshop

Compétences en recherche scientifique chez l'Homme

Posturographie : Plateforme de posturographie statique (sabots, *TechnoConcept*, Céreste, France)
Logiciel *PostureWin*
Test de Fukuda

Oculographie : Chronos (capteurs infrarouges, *Chronos Vision*)
Logiciel d'analyse du mouvement oculaire « *Analyse* »

Examen des fonctions visuelles : Mesure de l'acuité visuelle de loin et de près (Parinaud), de la stéréoacuité (TNO, Titmus test), hétérophorie horizontale (cover test), amplitudes de vergences (barre à prismes)

Participation à des opérations de recherche en milieu clinique

Hôpital Européen Georges Pompidou : Examen postural à des personnes présentant des troubles fonctionnels de la vergence ; service ophtalmologie (2005-2006).

Hôpital gériatrique Henri Dunant : Recrutement et passation des examens oculomoteurs de personnes admises à l'hôpital dans le cadre d'une étude sur le lien entre la chute inexplicquée et la qualité de l'exploration oculomotrice (2005-2006).

Hôpital de la Pitié Salpêtrière : Recrutement et passation des examens psychométriques et oculomoteurs avec des personnes présentant des troubles cognitifs et mnésiques (Alzheimer précoce, corps de Lewy, Parkinson) ; service gériatrie (Professeur Verny, depuis 2007).

Participation à des contrats nationaux et internationaux

Contrat Handicap (CNRS/CTI)
Eurokinesis (QLK6-CT-2002-00151)

Enseignement

Travaux dirigés pour les étudiants en 3^{ème} année d'orthoptie (hôpital des Quinze-Vingts, Paris 6, avril 2007)

Co-encadrement de plusieurs étudiants sur la posturographie et l'analyse statistique

Rey F. (doctorant, voir publication 4 dans le journal *Auris Nasus Larynx*)
Matheron E. (doctorant, voir publication 5 dans le journal *Neuroscience Letters*)
Adonis M.S. (étudiante Master 1 de Science Cognitives, EHESS, ENS, Paris 5, 2008)

Participation aux Congrès, Colloques

Kapoula Z, et **Lê T.T.**, Influence de la position du regard et de la vision (monoculaire / binoculaire) sur la stabilité posturale : étude des sujets jeunes et des sujets âgés. *Congrès national d'orthoptique*, 8 mai, 2005, Paris

Kapoula Z., Jurion F., **Lê T.T.**, Yang Q. Gaze position, distance and postural stability in young and old subjects. *International Society for Posture and Gait Research (ISPGR, XVIIth Conference)* 29 Mai-2 Juin, Marseille, 2005.

Lê T.T. et Kapoula Z, La distance détériore la stabilité posturale seulement en vision binoculaire : étude chez le sujet jeune et âgé. *Congrès de l'Association Posture Équilibre*, 8-10 Décembre, Marseille, 2006

Publications dans des journaux internationaux

Etudes en posturographie

- 1 - Kapoula Z, Lê TT. Effects of distance and gaze position on postural stability in young and old subjects. *Experimental Brain Research* 2006; 173:438-45.
- 2 - Lê TT, Kapoula Z. Distance impairs postural stability only under binocular viewing. *Vision Research* 2006 ; 46:3586-93.
- 3 - Lê TT, Kapoula Z. Role of ocular convergence in the Romberg quotient. *Gait and Posture*. 2008 ; 27:493-500.
- 4 - Rey F, Lê TT, Bertin R, Kapoula Z. Saccades horizontal or vertical at near or at far do not deteriorate postural control. *Auris Nasus Larynx*. doi:10.1016/j.anl.2007.07.001.
- 5 - Matheron E, Lê TT, Yang Q, Kapoula Z. Effects of two diopter vertical prism on posture. *Neuroscience Letters* 2007; 423: 236-240.
- 6 - Lê TT, Berbey N, Orssaud C, Kapoula Z. Postural stability in subjects with visual fatigue, headaches and vertigo symptoms. *BMC Neuroscience* (soumis).

Etudes non posturographiques

- 1 – Yang Q, Lê TT, Debay E, Orssaud C, Magnier G, Kapoula Z. Rare express saccades in elderly fallers. *Clinical Intervention in Aging* 2008.
- 2 – Yang Q, Lê TT, Kapoula Z. Different effects of aging on regular and express latencies of vergence. *Journal of eye movement research* (soumis)
- 3 - Yang Q, Lê TT, Kapoula Z. Aging prolongs only the visually-driven part of vergence movements. *Vision Research* (soumis)
- 4 – Matheron E, Lê TT, Yang Q, Kapoula Z. Prism-induced vertical vergence: eye dependency. *Optometry and Vision science* (soumis)

Publications dans des journaux et ouvrages français

Kapoula Z, Bucci MP, **Lê TT**, Wiener-Vacher S, Bremond-Gignac D. Syndrome pseudo vestibulaire, stabilité posturale et rôle de la vergence oculomotrice : étude des enfants, adultes et sujets âgés. Journal Français d'Orthoptique 2006 ; 38 : 37-53.

Kapoula Z, **Lê TT**. L'effet de la distance sur le quotient de Romberg. In: Borel L, Lacour M (eds) Posture et Équilibre (2007). Association Française de Posturologie.

Lê TT, Kapoula Z. La distance détériore la stabilité posturale chez le sujet jeune et âgé seulement en vision binoculaire. In: Borel L, Lacour M (eds) Posture et Équilibre (2007). Association Française de Posturologie.

Préface

Après avoir réalisé des travaux de recherche concernant les processus attentionnels sur le système auditif à Lyon (Laboratoire de Neurosciences et Systèmes Sensoriels, ex-UMR 5020), j'ai joint l'équipe IRIS dirigée par Mme Kapoula le 2 janvier 2005 à Paris, au sein du Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action, dirigé par le Pr. Berthoz, au Collège de France (ex-UMR 7152). J'ai commencé ma thèse sur les interactions visuo-posturales : il s'agissait d'étudier le rôle des signaux oculomoteurs, en particulier, ceux de la vergence oculomotrice dans le maintien de l'équilibre du corps. Tout au long de cette thèse, j'ai mené avec l'équipe des travaux de posturographie. J'ai aussi participé à certaines études concernant l'oculomotricité chez le sujet âgé (en tant que co-auteur avec le Dr Qing Yang). Je me suis également impliqué en tant qu'encadrant dans des études posturographiques menées par deux doctorants et une étudiante en master de l'équipe (E. Matheron, F. Rey et M.S. Adenis). Les connaissances ainsi que les compétences acquises au cours du doctorat m'ont permis d'intervenir, en tant qu'enseignant auprès des orthoptistes, dans la mise en place d'un travail expérimental qui réunissait à la fois la posturographie et l'oculographie. Le corps principal de cette thèse comporte cinq études de posturographie : quatre ayant fait l'objet de publication dans des journaux internationaux, la dernière étant soumise (voir le *curriculum vitae*). L'ensemble de ces études accumule de nombreux résultats qui convergent vers la même conclusion : la vergence oculomotrice participe dans la stabilisation de la posture ; les déficits de la vergence sont associés à une fatigue visuelle, des céphalées, des vertiges mais aussi à une instabilité posturale.

Sommaire

Introduction.....	2
Partie Théorique	4
I – La posture statique.....	6
II – Les mouvements oculaires	21
III – Posture statique et oculomotricité.....	28
IV – Posture et vieillissement	44
V – Problématique du travail expérimental	53
Partie Expérimentale.....	59
Méthodologie générale.....	62
Etude 1 - Effets de la distance et de la position du regard sur la stabilité posturale chez le sujet jeune et le sujet âgé.	67
Etude 2 - La distance détériore la stabilité posturale seulement en vision binoculaire.....	76
Etude 3 - Rôle de la convergence oculaire dans le quotient de Romberg	84
Etude 4 - Les saccades horizontales ou verticales réalisées en distance proche ou lointaine ne détériorent pas la stabilité posturale.....	94
Etude 5 - Stabilité posturale chez des personnes présentant les symptômes de fatigue visuelle, céphalées et vertiges.....	103
Discussion générale	114

Introduction

Faisons une expérience. Mettez-vous debout avec les bras le long du corps. Puis, fixez un objet situé droit devant vous tout en maintenant votre position durant une vingtaine de secondes. Reposez-vous pendant 30 secondes et effectuez la même expérience avec les yeux fermés. Dans la dernière condition, vous allez percevoir que votre corps bouge plus, même si vous ne réalisez aucun mouvement volontaire. A travers cette expérience, vous avez montré que le corps n'atteint jamais la stabilité absolue : il oscille perpétuellement sur de faibles amplitudes.

Les entrées sensorielles étudiées en posture statique

La présente thèse étudie le système de régulation de l'équilibre du corps en position érigée (ou orthostatique). Dans cette position, le système postural utilise plusieurs sources, dites « entrées », pour permettre le maintien de l'équilibre du corps : visuelles, vestibulaires, somesthésiques et proprioceptives. L'influence de la vision vient d'être illustrée par l'expérience précédente. En l'absence de vision, soit les yeux fermés, nous sommes généralement moins stables que les yeux ouverts. Au niveau de l'oreille interne, les capteurs du système vestibulaire (i.e. les canaux semi-circulaires, l'utricule et le saccule) détectent les mouvements et la position de la tête et du corps. Les capteurs somesthésiques, notamment de pression situés au niveau de la voûte plantaire, participent grandement au contrôle de l'équilibre postural. Enfin, la prise en compte des relations spatiales entre les différents segments du corps (la proprioception) est utile dans le maintien de la posture. Une riche littérature existe à propos de la contribution de ces différentes entrées sensorielles dans le contrôle postural.

Rôle de la vergence dans la posture statique

Dans cette thèse, nous avons examiné le rôle d'un autre système pouvant intervenir dans l'équilibre postural : la vergence oculomotrice. Après une présentation générale du système postural et oculomoteur (Chapitres 1 et 2), le troisième chapitre mettra en lien les deux précédents en montrant que le système oculomoteur influence le contrôle postural. Une

telle influence utiliserait la synergie entre l'activité oculomotrice et l'activité des muscles de la nuque, siège de la proprioception cervicale impliquée dans l'équilibre postural. Enfin, le quatrième chapitre sera consacré aux effets du vieillissement sur le contrôle postural en relation avec la vergence oculomotrice.

Dans la partie expérimentale de la thèse, nous avons cherché à déterminer si la vergence oculomotrice, en particulier l'angle de la convergence, avait un rôle dans le contrôle postural. Pour cela, nous avons mené cinq travaux expérimentaux chez des sujets jeunes ou âgés, sains ou avec des troubles de la vergence. Le chapitre de synthèse, qui réunit l'ensemble des résultats de nos études, confirme le rôle de la vergence sur le contrôle postural.

Partie

Théorique

Chapitre 1 :

La posture statique

1 – Généralités sur la posture statique.....	6
2 – La plate-forme de posturographie	7
3 – Entrées sensorielles	10
4 – L'influence de la vision.....	12
5 – Bases neurales de la posture orthostatique.....	17

I – La posture statique

Quelques généralités sur la posture statique seront décrites. Ensuite, nous présenterons la plate-forme de posturographie et différents paramètres issus de cet appareil. Enfin, seront évoquées les différentes entrées sensorielles utiles dans le contrôle de la posture orthostatique, en particulier la vision, ainsi que les bases neurales du contrôle de la posture.

1 – Généralités sur la posture statique

Gurfinkel et Osovets (1972) ont décrit que les oscillations posturales en position orthostatique formaient un cône (Fitzpatrick et al., 1992) qu'ils ont appelé le « pendule inversé » (voir Fig. 1). Les pieds apportent une base de soutien pour le reste du corps dont l'équilibre est principalement contrôlé par les articulations des chevilles (articulations tibio-tarsiennes).

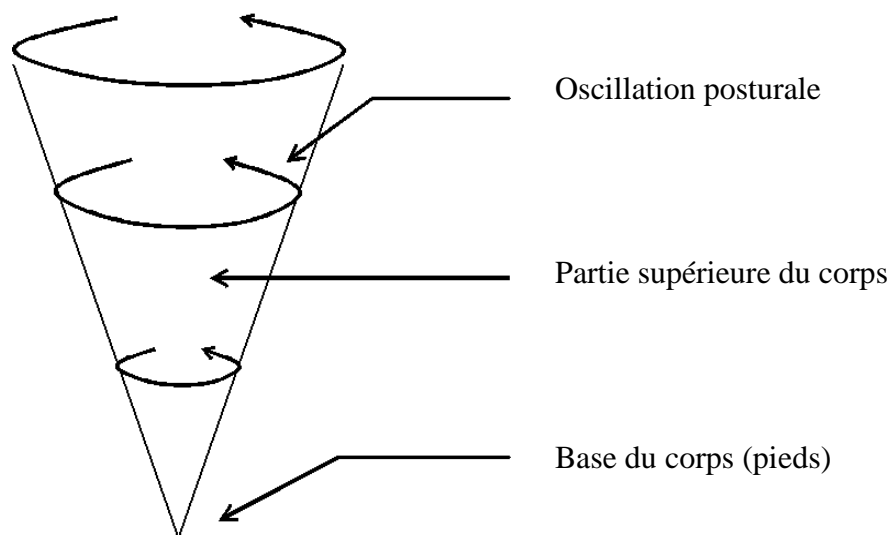


Figure 1

D'autres articulations dont celles permettant des mouvements du bassin sont aussi impliquées dans le contrôle postural. Le groupe de Winter (Winter et al., 1996) rapporte qu'avec les pieds disposés l'un à côté de l'autre, les chevilles contrôlent les oscillations

posturales dans le plan antéropostérieur et les hanches dans le plan médio-latéral. Les auteurs ont aussi démontré qu'en disposant les pieds différemment, par exemple un pied devant l'autre, la relation est inversée : les chevilles contrôlent davantage les oscillations médio-latérales, et les hanches, les oscillations antéropostérieures.

2 - La plate-forme de posturographie

La plate-forme de posturographie (ou plate-forme de force) est un instrument qui permet de mesurer l'équilibre postural. La plate-forme modélise la pression exercée par les pieds d'un sujet en un seul point : le centre de pression « CdP » (Gagey et Weber, 1999). Il existe une correspondance entre les oscillations posturales du sujet et les excursions du centre de pression dont le tracé est appelé le statokinésigramme (voir Fig. 2 ; Gagey et Weber 1999). Du statokinésigramme, sont extraits divers paramètres. Le paramètre spatial le plus souvent utilisé est la surface de l'ellipse de confiance (Schieppati et Nardone, 1991; Collins et De Luca, 1995; Tarantola et al., 1997; Doyle et al., 2004; Hatzitaki et al., 2004; Isotalo et al., 2004). La surface comprend 90% des positions du CdP les plus proches de la position moyenne du CdP (Gagey et Weber, 1999). Elle s'exprime en mm^2 (voir Fig. 2).

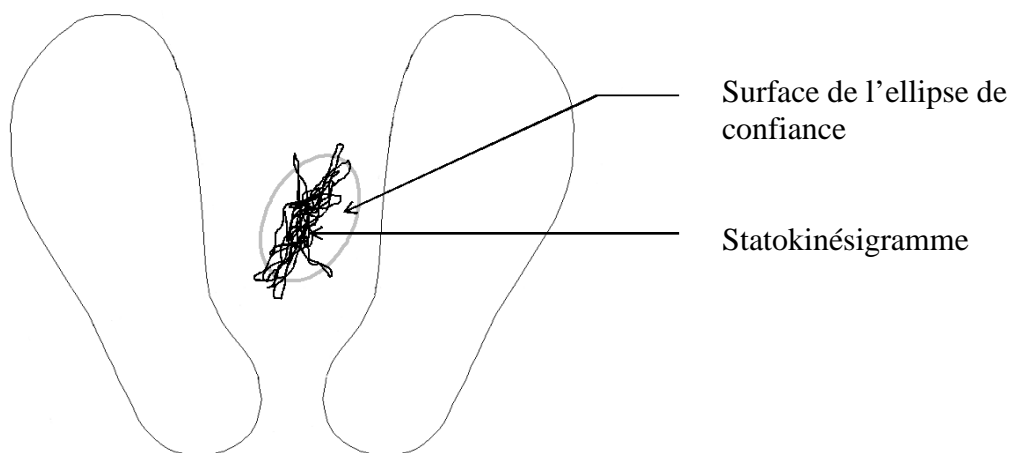


Figure 2

D'autres paramètres spatiaux comme les oscillations dans le plan antéropostérieur et médio-latéral (Winter et al., 1996; Kirshenbaum et al., 2001; Gravelle et al., 2002; Hertel et

Olmsted-Kramer, 2006) ainsi que la longueur du statokinésigramme (Schieppati et Narbone 1991) sont aussi étudiés. Concernant le domaine temporel, de nombreuses études utilisent la vitesse des excursions du CdP (Pyykko et al., 1990; Teasdale et al., 1991). Enfin, l'analyse des bandes de fréquences des oscillations du CdP (la transformée de Fourier par exemple) est souvent employée dans divers travaux (Carpenter et al., 1999; Yarrow et al., 2001; Ledin et al., 2004).

Il existe une opposition entre la posturographie statique et dynamique (e.g. les plates-formes mobiles asservies par les oscillations du sujet ou motorisées) selon laquelle l'examen de la posture statique serait une approche moins écologique que la posture dynamique. Cependant, le rapport réalisé à la demande de la Haute Autorité de Santé (http://www.has-sante.fr/portail/upload/docs/application/pdf/synthese_analyse_de_la_posture.pdf) suggère que les deux types de plate-forme apportent des informations complémentaires en ce qui concerne les stratégies mises en place dans le maintien de l'équilibre postural : la plate-forme statique examine les influences de diverses entrées sensorielles telles que la vision ou la proprioception (voir partie 3) alors que la posture dynamique analyse les stratégies de réajustement de l'équilibre postural suite aux perturbations induites par la plate-forme.

Une autre opposition peut aussi être faite entre le centre de pression mesuré par les plates-formes et le centre de masse. Le centre de masse (CdM) correspond au barycentre du poids des différents segments du corps. L'équipe de Winter (Winter et al., 1998) a développé un modèle anthropométrique permettant de déterminer la position du CdM en utilisant des capteurs posés à différents endroits du corps (voir Fig. 3).

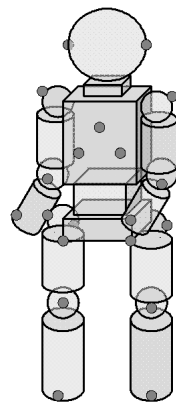


Figure 3 (adaptée de Winter et al. 1998)

Dans leur modèle, le corps se compose de n segments (tronc, hanche, pieds...) ayant chacun une masse m_i dont la somme (i.e. la masse totale) est M . Le déplacement du centre de masse dans le plan latéral du sujet (X_{CoM}) est exprimé selon l'équation suivante :

$$x_{CoM} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n x_i \cdot m_i$$

Les auteurs ont comparé les excursions du CdP avec les déplacements du CdM durant la posture orthostatique en calculant la différence « CdP-CdM », différence qui s'est avérée faible. En effet, les excursions du CdP et du CdM étaient quasiment en phase (voir Fig. 4). Gutierrez-Farewik et al. (2006) ont fait le même constat au cours de la marche. En conclusion, les plates-formes apportent une mesure pertinente concernant les oscillations posturales.

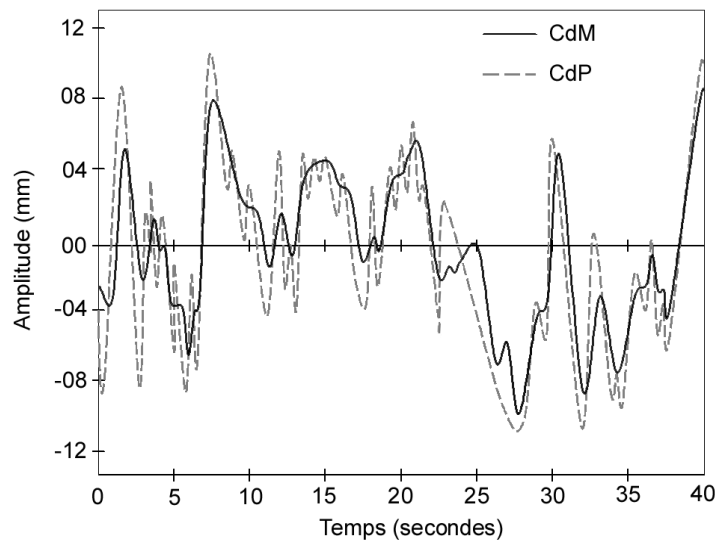


Figure 4 (adaptée de l'étude de Winter et al. 1998)

L'Association Française de Posturologie (AFP) a déterminé des conditions normées d'utilisation des plates-formes de posturographie échantillonnées à 5 Hz (A.F.P, 1985) : le sujet est en position orthostatique dans une cabine ; il fixe une cible placée dans le plan sagittal au niveau du regard à une distance de 90 cm. L'écartement formé par les deux pieds est de 30°, et la distance intermalléolaire est de 4 cm (Gagey et Weber 1999). Cette position est aussi appelée Romberg standard. Selon les normes établies, la surface de confiance doit

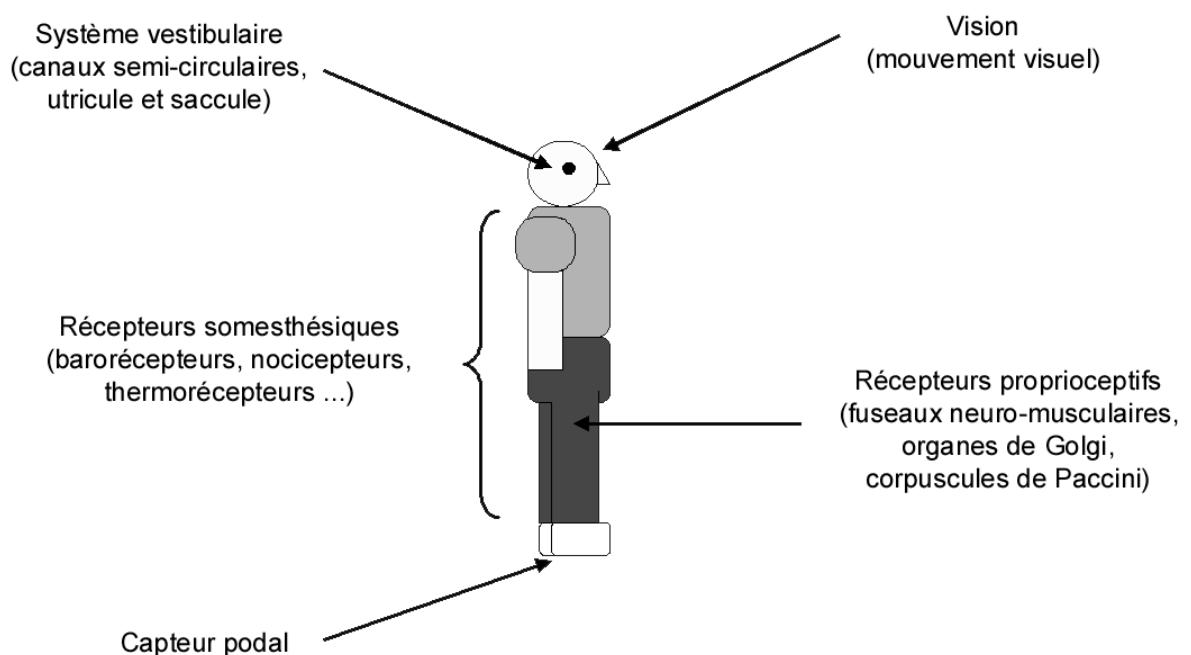
être comprise entre 39 et 210 mm² pour un enregistrement de 51.2 sec (la moyenne étant de 91 mm²). Pour les plates-formes à 40 Hz que nous utilisons dans cette thèse, d'autres normes sont établies (Gagey et al., 2001).

3 – Entrées sensorielles

Le système postural assure le maintien de l'équilibre du corps en utilisant les entrées vestibulaires, somesthésiques, proprioceptives et visuelles. Le système vestibulaire est impliqué dans la détection des mouvements et positions de la tête et du corps. L'organe périphérique du système vestibulaire est composé de canaux semi-circulaires, de l'utricule, du saccule, du nerf vestibulocochléaire et de ses noyaux encéphaliques. Les canaux semi-circulaires détectent les accélérations angulaires des mouvements de la tête et du corps. L'utricule et le saccule sont composés d'otolithes qui détectent les changements de position ainsi que les accélérations linéaires de la tête. Par exemple, lorsque la tête s'incline vers l'arrière, la gravité provoque un déplacement des otolithes informant le système nerveux central du changement de position de la tête. La somesthésie désigne, de façon générale, des sensations diverses (pression, chaleur, douleur...) élaborées à partir d'informations fournies par les récepteurs sensitifs du système somatosensoriel situés dans divers tissus de l'organisme (mécanorécepteurs, viscères, thermorécepteurs). Par exemple, lors du maintien de l'équilibre postural, les barorécepteurs de la sole plantaire déterminent les différences de pression entre les deux voûtes plantaires. La proprioception désigne l'ensemble des récepteurs, voies et centres nerveux impliqués dans la perception, consciente ou non, de la position relative des parties du corps les unes par rapport aux autres. Par exemple, les étirements musculaires et tendineux, et les mouvements articulaires sont captés respectivement par les fuseaux neuromusculaires, les organes de Golgi et les récepteurs ostéo-articulaires (corpuscules de Vater Paccini, voir Fig. 5).

Dans le système proprioceptif, figure la proprioception des muscles extraoculaires. Ces muscles constituent les organes effecteurs de la motricité oculaire (voir Chap. 2). Les muscles extraoculaires sont composés de trois couches : couche externe, marginale et interne (Büttner-Ennever, 2006). La couche externe, jouant le rôle d'une poulie, s'insère dans la capsule de Tenon. La couche interne est directement attachée à la sclérotique de l'œil. La couche marginale se situe entre les deux précédentes (voir Fig. 6). Pour chacune de ces couches, il existe des récepteurs proprioceptifs spécifiques : des fuseaux neuromusculaires

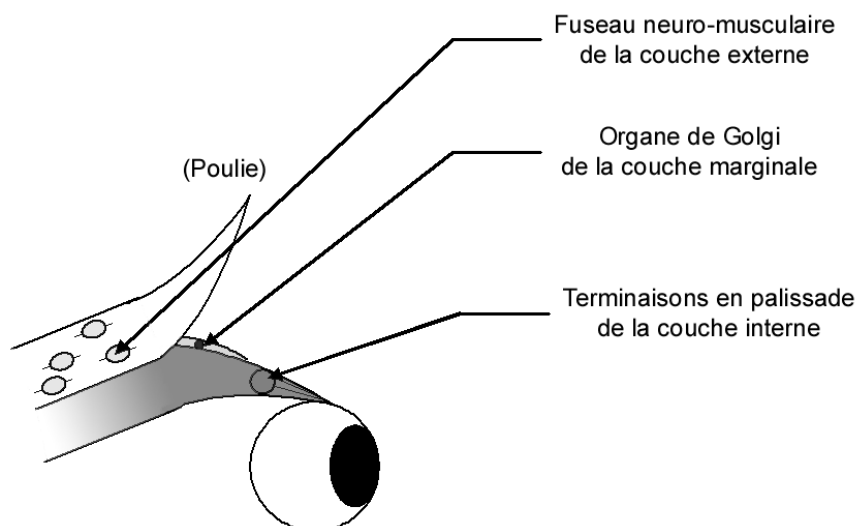
dans la couche externe (Blumer et al., 1999), des organes de Golgi dans la couche marginale (Blumer et al., 2000), et des terminaisons en palissade dans la couche interne (Ruskell, 1999). La contraction d'un muscle extraoculaire est détectée par l'élongation des fuseaux neuromusculaires au niveau de la couche externe qui entraîne un mouvement de l'œil. Ce dernier stimule directement les terminaisons en palissade au niveau de la couche interne. Enfin, la tension exercée entre les couches externe et interne est détectée par les corps de Golgi au niveau de la couche marginale (Fig. 6). Ainsi, les muscles extraoculaires sont le siège d'une proprioception riche.



La stabilité posturale est assurée par l'intégration des informations issues des récepteurs des systèmes vestibulaire (accélérations rotatoires et linéaires de la tête par rapport à la gravité), somesthésique (pression, douleur, chaleur ...), proprioceptif (étirement musculaire, tension articulaire) et visuel (mouvement visuel sur la rétine).

Figure 5

La vision est dédiée à la perception du rayonnement électromagnétique visible pour l'œil humain permettant la perception des objets. Environ 80 % des informations de l'environnement extérieur sont captés par le système visuel. Un ensemble (non exhaustif) d'études sur le rôle de la vision sur la posture est présenté ci-dessous.



Le muscle extraoculaire (ici le droit supérieur) est divisé en 3 couches : externe, marginale et interne. Chaque couche contient des récepteurs proprioceptifs spécifiques garantissant une proprioception riche.

Figure 6

4 – L'influence de la vision

Le test de Romberg

Le test de Romberg est l'un des premiers à avoir montré l'importance de la vision sur la posture. Il compare la stabilité posturale, en position orthostatique, entre la condition yeux ouverts et yeux fermés. En général, la posture est plus stable en condition yeux ouverts. Le test doit son nom à son inventeur Moritz Heinrich Romberg (1795-1873), mis au point pour détecter les troubles de la proprioception des membres inférieurs chez des patients présentant un *tabes dorsali* (Lanska et Goetz, 2000; Lanska, 2002; Pearce, 2005). Cette maladie est associée à de fortes oscillations posturales pouvant entraîner une chute en condition yeux fermés (Pearce, 2005). Comme mentionné précédemment, ce test a été normalisé par l'AFP (Gagey et Weber, 1999; Gagey et al., 2001).

Le quotient de Romberg (QR) correspond au ratio de la condition yeux fermés sur la condition yeux ouverts pour un paramètre donné. Par exemple, le QR de la surface du CdP est de l'ordre de 2,5 (A.F.P, 1985; Gagey et Weber, 1999), signifiant que la posture en condition yeux fermés est 2,5 fois plus instable en comparaison avec la condition yeux ouverts.

Une des études de cette thèse est centrée sur le test de Romberg (Lê et Kapoula 2008). Elle apporte un nouvel éclairage sur le rôle de la vision associée à l'angle de la convergence des yeux en fonction de la distance.

Vision binoculaire *versus* monoculaire et dominance oculaire

Diverses fonctions visuelles ainsi que de nombreuses tâches sont réalisées avec une meilleure performance en vision binoculaire qu'en vision monoculaire. Par exemple, le groupe de McKnight (McKnight et al., 1991) a montré que le jugement des distances était plus juste en vision binoculaire qu'en vision monoculaire. De même, les sujets sont plus précis durant des tâches manuelles en vision binoculaire qu'en vision monoculaire (Servos et al., 1992; Servos et Goodale, 1994; Servos, 2000; Magne et Coello, 2002).

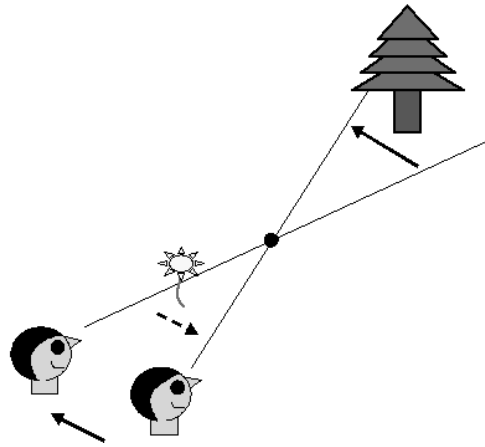
Les données de la littérature sont contradictoires en ce qui concerne le contrôle postural : Fox (1990) a observé une amélioration de la stabilité posturale en vision binoculaire qu'en vision monoculaire, amélioration rapportée que pour un sujet sur deux dans une étude récente (Isotalo et al., 2004). Le rôle de la vision monoculaire *versus* binoculaire fait l'objet de la seconde étude de la thèse qui réexamine cette question en fonction de la distance et de la vergence oculomotrice (Lê et Kapoula 2006).

Un autre aspect sur le rôle de la vision monoculaire dans le contrôle de la posture concerne la dominance oculaire. Gentaz (1988) a introduit le concept de l'œil postural ; l'œil postural induit une meilleure stabilité lorsqu'il est ouvert seul par rapport à l'autre œil. L'œil postural n'est pas forcément l'œil directeur. Ce dernier correspond à l'œil le mieux aligné à la cible fixée lors d'une tâche de visée binoculaire. Isotalo et collaborateurs (2004) n'ont pas observé de différence entre l'œil directeur (en l'occurrence l'œil droit) et l'œil non directeur.

Influence de la parallaxe visuelle

La parallaxe visuelle correspond à un changement de la position angulaire relative entre deux points statiques engendré par le mouvement de l'observateur qui perçoit la scène. Lorsque l'observateur fixe un point, ses déplacements corporels dans le plan frontal dans un sens donné entraînent un mouvement visuel des objets positionnés en arrière du point de

fixation dans le même sens. En revanche, les objets statiques placés en avant du point de fixation bougent dans le sens opposé (voir Fig. 7).



Les objets lointains semblent bouger dans le sens du mouvement de l'observateur alors que les objets proches semblent bouger dans le sens opposé.

Figure 7 : La parallaxe de mouvement (adaptée de Guerraz et al. 2001)

Bronstein et Buckwell (1997) ont montré l'influence de la parallaxe sur le contrôle postural. Les auteurs ont mesuré les oscillations posturales en enregistrant à la fois les mouvements de la tête (avec un système photoélectrique) et les excursions du centre de pression (avec une plate-forme de force). En position orthostatique, les sujets étaient à 100 cm d'un écran translucide où était projetée une grille. En fonction des conditions expérimentales, un cadre pouvait être placé devant l'écran à 50 cm du sujet (voir Fig. 8A). Trois conditions étaient testées : en fixant la grille du fond 1) avec ou 2) sans le cadre au premier plan ou 3) en fixant le cadre (voir Fig. 8B, 8C et 8D). Pour toutes les conditions, la grille du fond se déplaçait pendant 2 secondes ce qui, en présence du cadre au premier plan, simulait la parallaxe visuelle (voir Fig. 8A). En fixant la grille sans cadre, le mouvement de la grille dans une direction donnée induisait une oscillation des sujets dans cette même direction (voir Fig. 8B). En fixant le cadre au premier plan, le mouvement de la grille dans une direction entraînait une oscillation des sujets du côté opposé (voir Fig. 8C). Enfin, en fixant la grille à travers le cadre, les auteurs n'ont pas observé de réponse posturale spécifique (voir Fig. 8D).

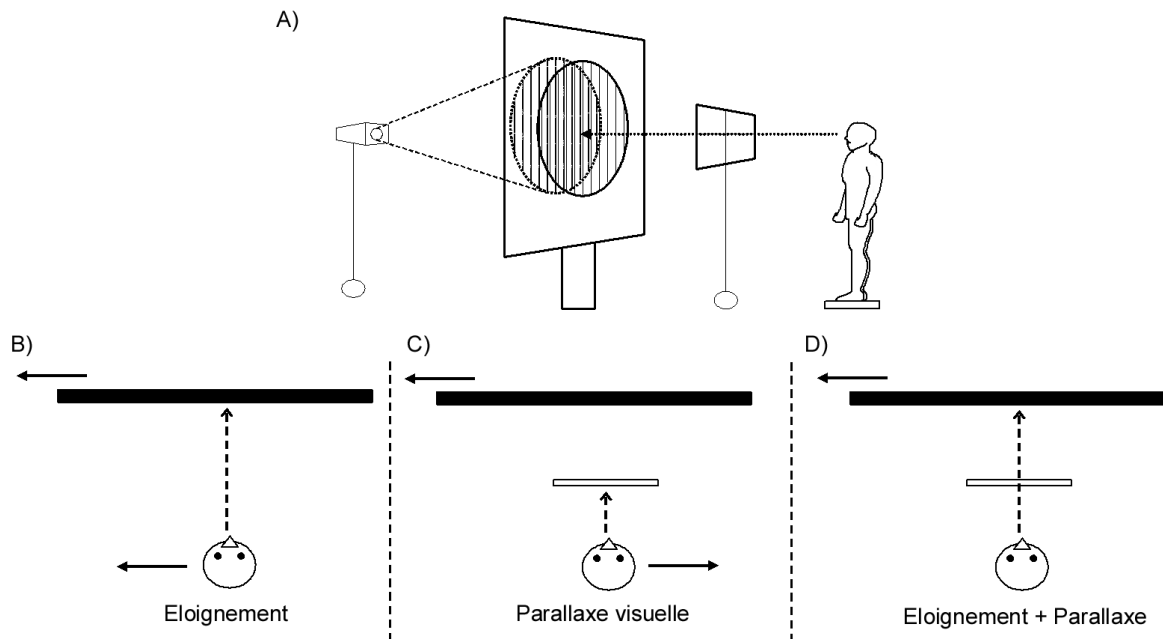


Figure 8 (adaptée de Bronstein et Buckwell 1997)

Bronstein et Buckwell ont suggéré que le mouvement du corps du sujet dans le même que celui de la grille correspondrait à un « ajustement postural correctif » (voir Fig. 8B). En effet, le mouvement de la grille dans un sens donné a induit, chez le sujet, la sensation d'osciller dans le sens opposé, ou de « s'être éloigné » de la scène fixée. L'oscillation de son corps dans le même sens que celui de la grille serait donc une réponse à cet éloignement (Fig. 8B). Concernant les mouvements de la grille et du corps dans des sens opposés, les auteurs ont attribué ce résultat à la parallaxe (voir Fig. 8C). Enfin, ils ont expliqué l'absence de réponse posturale vers une direction spécifique par la combinaison de « l'éloignement » avec la parallaxe (voir Fig. 8D) engendrant un « conflit intra-visuel ».

Le groupe de Guerraz (Guerraz et al., 2000) a montré l'implication de la parallaxe dans la stabilité posturale. Les sujets fixaient des cibles à 45 cm alors que d'autres étaient placées à 45, 85 ou 170 cm du sujet. Dans les deux dernières conditions, les oscillations des sujets produisaient une parallaxe visuelle. Les auteurs ont observé qu'en présence de parallaxe, la posture était plus stable qu'en l'absence de parallaxe. Enfin, ces résultats ont été obtenus aussi bien en vision monoculaire que binoculaire. Les auteurs suggèrent que la parallaxe est un indice visuel important pour la stabilisation de la posture, la vision monoculaire étant suffisante pour la percevoir et la mettre en jeu.

Influence de l'acuité visuelle

Paulus et al. (1984, membres du groupe de Brandt) ont évalué l'effet de l'acuité visuelle sur le contrôle postural en plaçant des feuilles en plastique d'opacités différentes devant les yeux des sujets. Une feuille parfaitement transparente correspondait à une acuité de 10/10. Cinq autres feuilles ont été utilisées correspondant à 6/10, 3/10, 1/10, 3/100 et 1/100 d'acuité visuelle. Les auteurs ont mesuré les oscillations posturales de douze sujets (âge moyen $22,4 \pm 4,5$ ans) à l'aide d'une plate-forme de force. La racine du carré moyen des oscillations dans le plan antéropostérieur et médio-latéral a été analysée. Les oscillations du corps dans les deux plans augmentaient avec la diminution de l'acuité visuelle. Paulus et al. suggèrent que la baisse de l'acuité visuelle diminuerait la perception du mouvement visuel consécutif aux oscillations posturales et induirait une plus grande instabilité posturale.

Le groupe de Brandt (Brandt, 1999) a mené différents travaux, maintenant classiques et résumés dans l'ouvrage « *Vertigo : its sensory syndrome* », sur d'autres composantes de la vision (vision centrale *versus* périphérique, effet de l'illumination stroboscopique). Ci-dessous, nous présentons une de leurs études sur l'effet de la distance, effet ré-étudié dans la thèse (Kapoula et Lê 2006).

L'effet de la distance

Paulus et collaborateurs (1984) ont étudié l'équilibre postural de douze sujets (âge moyen $22,4 \pm 4,5$ ans). Les sujets fixaient une cible à hauteur des yeux durant une minute en position orthostatique. La distance entre l'observateur et la cible était de 10 ; 12,5 ; 16,6 ; 25 ; 50 ou 100 cm. La racine du carré moyen des oscillations dans le plan antéropostérieur et médio-latéral a été analysée. Les oscillations du corps dans les deux plans augmentaient avec la distance. Ainsi, la fixation en distance proche stabilisait davantage la posture que la fixation en distance lointaine. Les auteurs ont attribué ce phénomène à des facteurs géométriques. Les oscillations du corps entraînent un mouvement visuel : le glissement rétinien. La détection du glissement rétinien est à son tour utilisée par le système nerveux central qui déclenche des oscillations du corps correctives dans le but de le stabiliser. Pour une oscillation du corps d'amplitude égale, la taille angulaire du glissement rétinien en vision proche est plus élevée qu'en vision éloignée (voir Fig. 9). Ainsi, le glissement rétinien en vision lointaine serait plus

difficilement détectable. Le système nerveux central ne déclencherait pas ou déclencherait peu les oscillations posturales correctives.

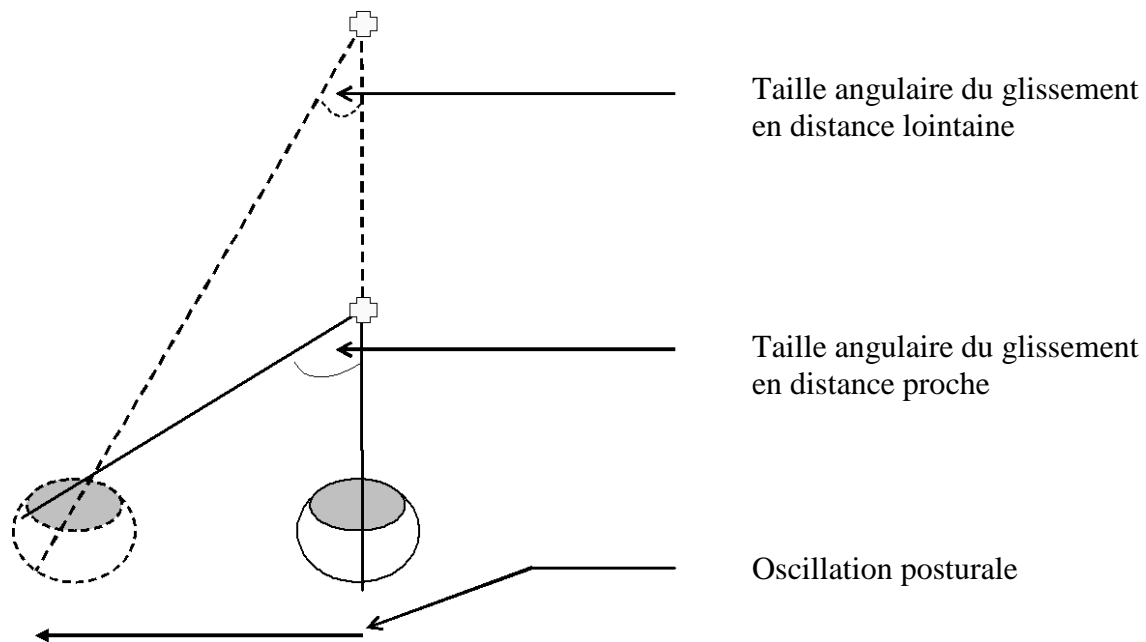
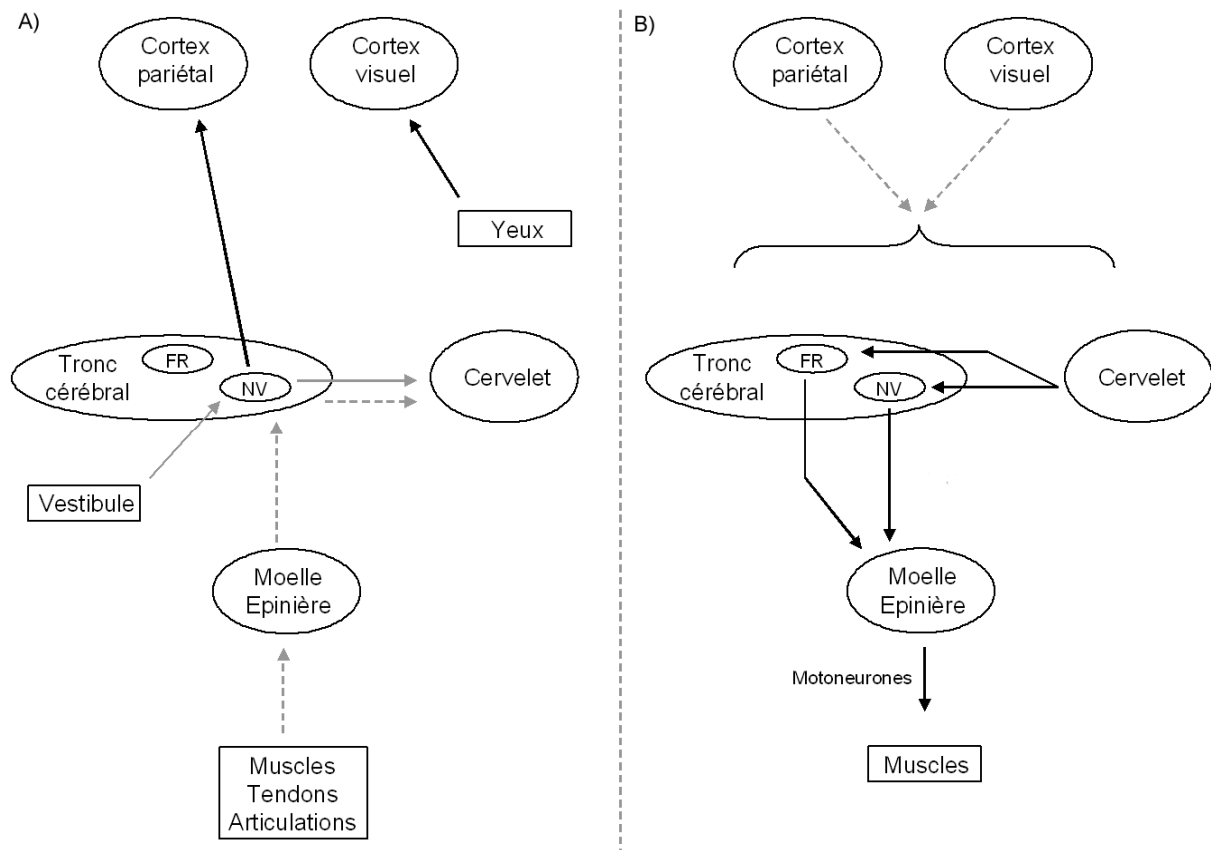


Figure 9 (adaptée de Brandt et al. 1999)

5 – Bases neurales de la posture orthostatique

Le maintien de la posture orthostatique fait intervenir différentes structures telles que le cortex visuel, le cervelet, le tronc cérébral et la moelle épinière. Une étude utilisant la tomographie à émissions de positrons (TEP) a montré l'implication de l'aire visuelle primaire droite et du lobe antérieur du cervelet durant le maintien de l'équilibre orthostatique (Ouchi et al., 1999). Le circuit impliquant le cervelet est le suivant : le noyau fastigial du cervelet envoie des signaux efférents en direction de la formation réticulée du tronc cérébral et du noyau vestibulaire. Ces deux structures interviennent dans l'activité des motoneurones alpha innervant les muscles responsables du tonus musculaire (essentiel dans le maintien de l'équilibre postural). L'implication de la formation réticulée du tronc cérébral et du noyau vestibulaire repose sur leurs connexions avec la moelle épinière qui sont respectivement les faisceaux réticulospinaux et vestibulospinaux (Fig. 10b). Quant au cervelet, il reçoit des afférences du système vestibulaire via le nerf et le noyau du même nom, et du système

proprioceptif des membres inférieurs et supérieurs, respectivement via les faisceaux de Gowers et de Flechsigs (Fig. 10a).



Circuits cérébraux hypothétiques ascendants (A) et descendants (B) du contrôle de la posture. (A) Les signaux proprioceptifs (flèches grises pointillées) ainsi que les signaux du système vestibulaire (flèches grises traits pleins) affèrent vers le cervelet. Le cortex pariétal reçoit aussi des signaux issus du noyau vestibulaire (NV). Une étude en TEP montre l'implication de l'aire visuelle I^{aire} durant le maintien de la posture. (B) Le cervelet, le NV et la formation réticulée (FR) du tronc cérébral sont impliqués dans les voies descendantes du contrôle postural. Le cortex pariétal et le cortex visuel pourraient aussi jouer un rôle dans cette fonction.

Figure 10

Les bases neuroanatomiques du contrôle de la posture orthostatique comprennent un circuit sûrement plus étendu et restent moins connues que celles de la locomotion (Nutt et Horak, 2004). Par exemple, le cortex pariétal impliqué dans la représentation du schéma corporel pourrait intervenir dans l'orientation de la posture et son équilibration. Le cortex pariétal aurait par ailleurs un rôle dans le traitement de l'information vestibulaire. Des travaux chez le singe ont montré que l'aire ventrale intra-pariétale (correspondant au cortex pariétal

postérieur chez l'homme) recevait des afférences du noyau vestibulaire (Lewis et Van Essen, 2000; Klam et Graf, 2003).

En résumé, le chapitre introductif, loin d'être exhaustif, illustre la complexité du contrôle postural. Le rôle de la vision, monoculaire ou binoculaire et le rôle de la distance ont fait l'objet de nombreuses études depuis des décennies. Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans ce contexte. Il permet d'apporter un nouvel éclairage sur le rôle de la vision dans le contrôle de la posture orthostatique, en l'associant au rôle des signaux oculomoteurs, en particulier ceux liés à la vergence et la profondeur. Le chapitre suivant est donc centré sur quelques généralités concernant l'oculomotricité en profondeur et en direction : la vergence et la saccade.

Chapitre 2 :

Les mouvements oculaires

1 – Les muscles extraoculaires	22
2 – Générateurs de la vergence et de la saccade	24
3 – Contrôle cortical de la vergence et de la saccade	25

II – Les mouvements oculaires

Les mouvements oculaires permettent l'exploration de l'environnement tridimensionnel. Il existe différents types de mouvements : la poursuite, le nystagmus optocinétique, le nystagmus vestibulaire, les vergences, les saccades, les mouvements combinant vergence et saccade. La poursuite oculaire est un mouvement lent des deux yeux permettant de maintenir l'image de l'objet d'intérêt en mouvement sur les fovéas. Dans le chapitre 3 seront présentés des travaux de Glasauer et al. (2003) et Strupp et al. (2004) qui ont démontré l'influence de la poursuite oculaire sur la posture. Le nystagmus optocinétique se caractérise par une série de mouvements oculaires réflexes se produisant de façon répétée lorsqu'un sujet regarde une succession d'objets défilant rapidement devant ses yeux. Le nystagmus vestibulaire produit le même type de mouvements réflexes que le nystagmus optocinétique. Cependant, il est induit par les mouvements mêmes du sujet (e.g. en rotation sur une chaise). Dans leur étude décrite dans le chapitre suivant, Jahn et al. (2005) ont montré que des patients présentant un nystagmus spontané (en l'absence de stimuli) étaient plus instables que des sujets asymptomatiques. La vergence oculomotrice est un mouvement simultané des deux yeux dans des directions opposées permettant de fixer des objets situés à différentes profondeurs. Les yeux convergent vers un objet proche et divergent vers un objet lointain. Enfin, les saccades sont des mouvements rapides de « refixation » du regard durant lesquelles les deux yeux bougent dans la même direction. La saccade est le mouvement le plus rapide chez l'homme : sa vitesse maximale peut dépasser les 500°/sec pour des saccades amples (Leigh et Zee, 2006). Dans la vie quotidienne, nous réalisons plus fréquemment des mouvements combinant vergence et saccade que des mouvements de vergences ou saccades pures.

Ce chapitre, lui aussi, est loin d'être exhaustif. L'oculomotricité est une discipline à part entière. L'oculomotricité est prise en considération dans chacune des études expérimentales incluses dans cette thèse, en particulier les systèmes de vergence et de saccade justifiant leur description dans ce chapitre.

1 – Les muscles extraoculaires

Les mouvements oculaires sont assurés par l'action des muscles extraoculaires, au nombre de six par œil : le droit supérieur, le droit inférieur, le droit interne (ou médian), le droit externe (ou latéral), l'oblique supérieur et l'oblique inférieur (Fig. 11).

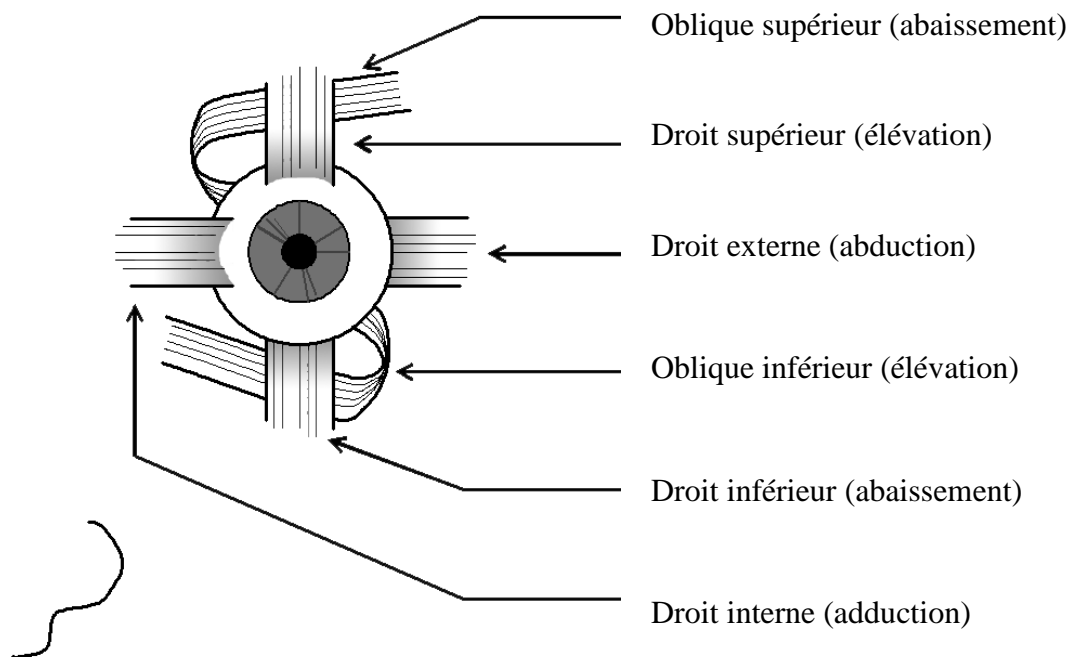


Figure 11

La convergence implique la contraction des muscles droits internes entraînant un rapprochement des axes optiques et une augmentation de l'angle de la vergence (Fig. 12A). Par contre, durant la divergence, les axes optiques s'écartent diminuant ainsi l'angle de la vergence (Fig. 12B).

Il existe trois principaux types de vergence : la vergence proximale, accommodative et de disparité (ou fusionnelle). La vergence proximale est stimulée par la détection d'objets situés dans l'espace proche. La vergence accommodative permet la vision nette des objets. Elle est stimulée par l'accommodation induite elle-même par la vision floue de l'objet fixé (Leigh et Zee, 2006). La vergence accommodative implique le cristallin dont le bombement ou l'étirement permet de modifier son pouvoir de réfraction (i.e. le maintien de la netteté de

l'image). La vergence fusionnelle est stimulée par la disparité binoculaire (i.e. images d'un même objet projetées sur des points rétinien non correspondants). Elle permet la fusion des deux images rétiniennes en une seule.

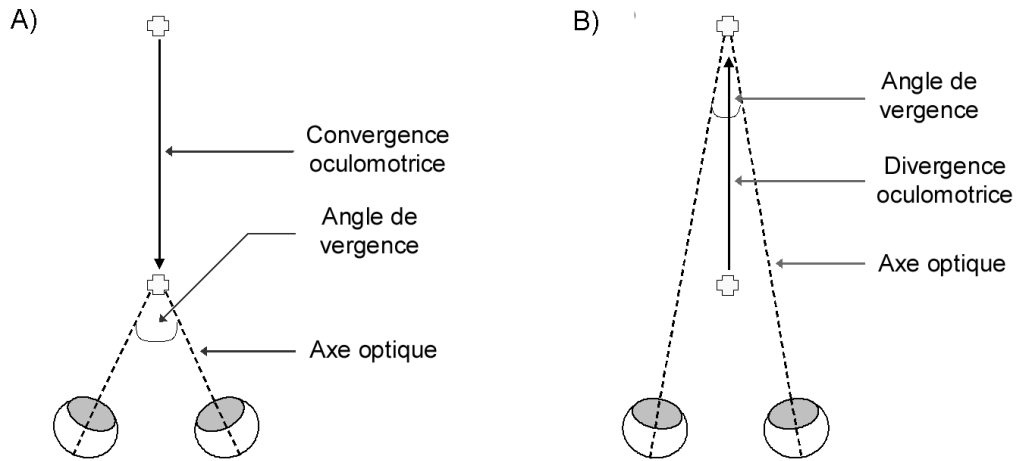


Figure 12

Tous les travaux expérimentaux menés dans cette thèse traitent de façon systématique le rôle de l'angle de la convergence sur le contrôle postural.

La saccade horizontale implique la contraction du muscle droit interne d'un des deux yeux et du droit externe de l'autre œil. Lorsque la saccade est exécutée sans modification de la profondeur de fixation (i.e. isovergence ou angle de vergence égal), la saccade est pure (Fig. 13).

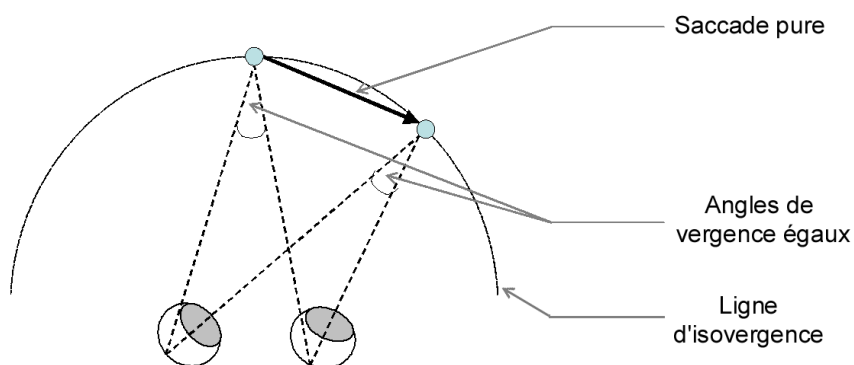


Figure 13

2 – Générateurs de la vergence et de la saccade

Les commandes pré-motrices de la vergence sont issues des neurones situés dans la formation réticulée du mésencéphale (FRM, Mays 1984) à 1-2 mm du noyau oculomoteur (III, voir Fig. 14). Les neurones impliqués dans la génération de la convergence se distinguent de ceux impliqués dans la génération de la divergence (Mays, 1984). Il existe trois types de neurones : les neurones toniques liés à l'angle de vergence, les neurones phasiques qui envoient une commande de vitesse, et les neurones à la fois de type tonique et phasique (Leigh et Zee, 2006).

Pour réaliser une convergence, la FRM envoie la commande pré-motrice au noyau abducens (VI). Ce dernier transmet, controlatéralement, la commande vers le noyau oculomoteur (III) via le faisceau longitudinal médian (FLM). Le noyau III envoie la commande motrice vers les droits internes via les motoneurones (voir Leigh et Zee 2006, Fig. 14).

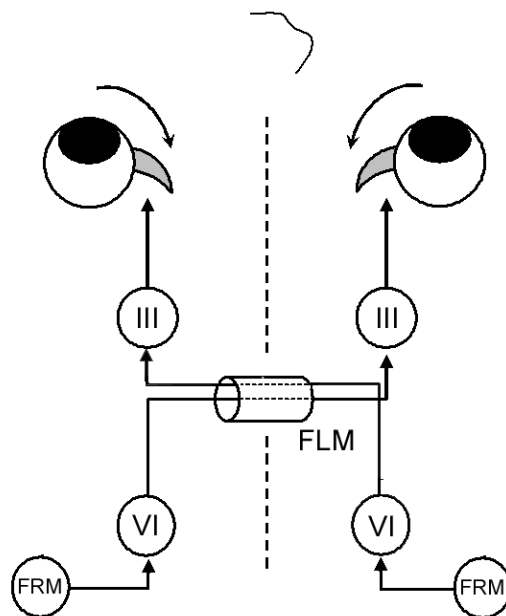


Figure 14 : schéma d'innervation pour la convergence (adapté de Leigh et Zee 2006)

Les neurones pré-moteurs des saccades sont situés dans la formation réticulée pontique paramédian (FRPp), la formation réticulée médullaire controlatéral, le noyau

prepositus hypoglossi bilatéral, et le noyau vestibulaire (Fuchs et al., 1985; Scudder et Fuchs, 1992; Moschovakis et al., 1996).

Pour réaliser une saccade horizontale, la FRPp envoie la commande pré-motrice au noyau abducens (VI) qui transmet ipsilatéralement, via les motoneurones, la commande motrice vers le muscle droit externe. La commande est également envoyée vers le noyau oculomoteur controlatéral (III) via des interneurones qui parcourent le faisceau longitudinal médian (FLM). Le noyau oculomoteur controlatéral transmet la commande motrice vers le muscle droit interne (Leigh et Zee, 2006, voir Fig. 15).

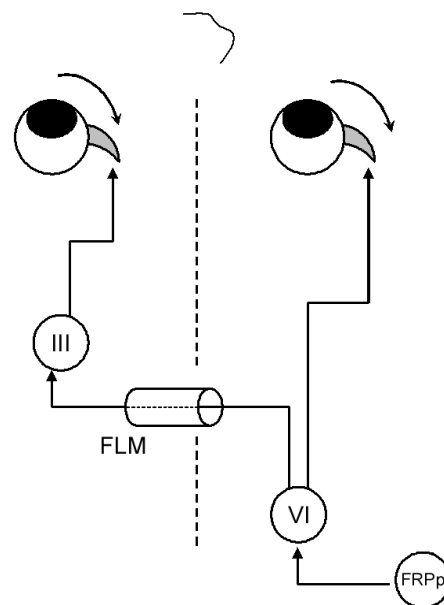


Figure 15 : schéma d'innervation pour la saccade (adapté de Leigh et Zee, 2006)

3 – Contrôle cortical de la vergence et de la saccade

L'équipe de Pierrot-Deseilligny (Pierrot-Deseilligny et al., 1995) a proposé un modèle hypothétique des circuits corticaux du contrôle de la saccade horizontale. Le modèle comprend, entre autres, le champ oculomoteur frontal (COF), le cortex occipital (CO), le champ oculomoteur pariétal (COP), et le colliculus supérieur (CS, Fig. 16).

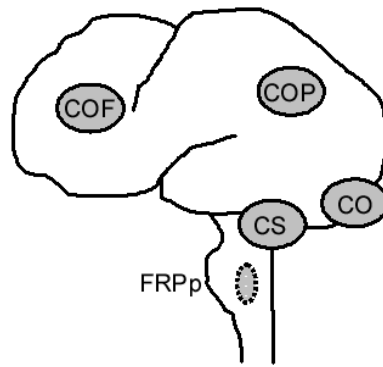


Figure 16

Le contrôle de la vergence semble impliquer des aires corticales similaires de celles de la saccade. Par exemple, une étude utilisant la tomographie à émission de positrons a montré une activation du cortex pariétal inférieur gauche, de la jonction occipito-temporale bilatérale ainsi que le gyrus fusiforme droit avant le déclenchement des mouvements de vergence (Hasebe et al., 1999). Une étude en électroencéphalographie a mis en évidence une activation postérieure et centrale des aires corticales avant le déclenchement de la divergence et de la convergence (Tzelepi et al., 2004). Enfin, des travaux utilisant la stimulation magnétique transcrânienne ont montré l'implication du cortex pariétal postérieur gauche et droit (Yang et Kapoula, 2004; Kapoula et al., 2005b; Kapoula et al., 2005a) et du cortex préfrontal dorsolatéral (Coubard et Kapoula, 2006) dans l'initiation de la vergence.

Le chapitre suivant présente des travaux qui montrent que l'activité oculomotrice a une influence sur le contrôle postural.

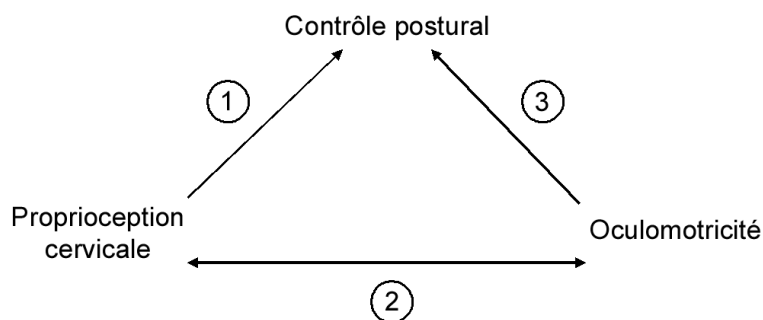
Chapitre 3 :

Posture statique et oculomotricité

1 – La proprioception cervicale et la posture	28
2 – Muscles du cou et oculomotricité.....	32
3 – Proprioception extraoculaire, oculomotricité et posture	37

III – Posture statique et oculomotricité

Le chapitre est consacré au rôle de l’oculomotricité dans le contrôle de la posture. Il fait le lien entre les deux chapitres précédents. L’implication de l’oculomotricité dans la posture est à la fois directe et indirecte. Concernant l’action indirecte, nous présenterons différentes études montrant le rôle majeur de la proprioception cervicale dans le contrôle de la posture ainsi que des travaux mettant en évidence l’interaction entre proprioception cervicale et activité oculomotrice. L’oculomotricité peut donc intervenir dans le contrôle postural par le biais de cette interaction. Concernant l’action directe, nous décrirons différents travaux rapportant l’influence de divers mouvements oculaires (poursuite oculaire, nystagmus, saccades...) sur la posture. Le chapitre rapporte donc trois relations : l’influence de la proprioception cervicale sur la posture, l’interaction entre l’activité cervicale et oculomotrice, et l’influence directe de l’oculomotricité sur la posture.



1 – La proprioception cervicale et la posture

Les muscles de la nuque constituent un site majeur de la proprioception cervicale. L’essentiel du propos est orienté sur certains muscles de la nuque : le *splenius capitis*, le *rectus capitis* majeur et mineur et les obliques supérieur et inférieur (voir Fig. 17).

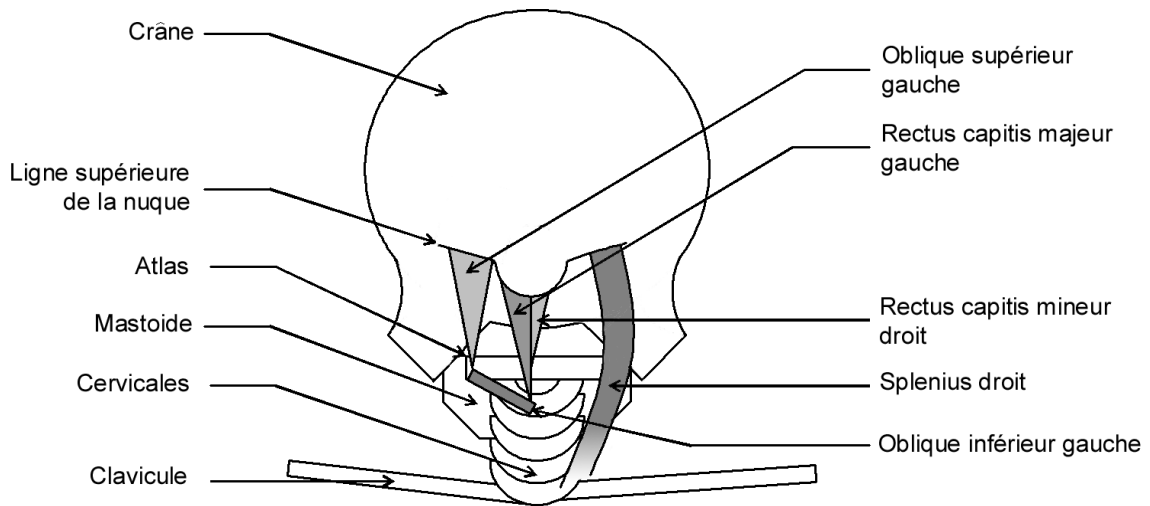


Figure 17

L'ensemble de ces muscles participe aux mouvements cervicaux. Il existe trois principaux types de mouvements de la tête : inclinaison avant arrière de la tête correspondant respectivement à une flexion et une extension du cou (Fig. 18A), les mouvements d'inclinaison gauche droite (Fig. 18B), et la rotation gauche droite (Fig. 18C).

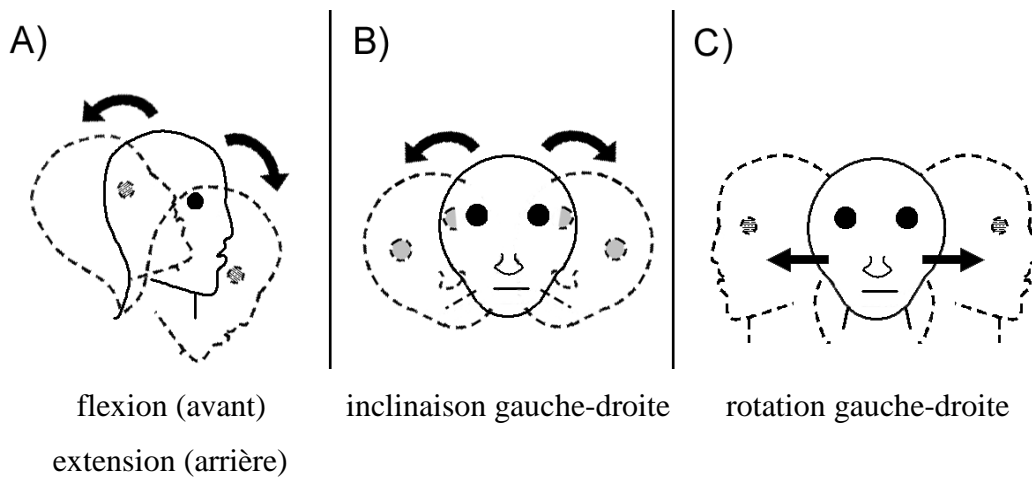


Figure 18

Une étude a démontré l'influence de l'extension du cou (tête en arrière) sur le contrôle de la posture (Jackson et Epstein, 1991). Les sujets étaient en position érigée sur une plateforme statique ou dynamique, soit les yeux fermés, soit les yeux ouverts. Leur tête était soit orientée droit devant soit inclinée vers l'arrière avec une amplitude 55°. L'extension arrière du cou a entraîné une détérioration de la stabilité posturale comparée à la condition tête

orientée droit devant. Les auteurs ont attribué leur résultat à une diminution de l'influence du système vestibulaire. En effet, lorsque la tête s'incline vers l'arrière, l'action de la gravité entraîne un changement de position des otolithes de l'utricule (Chapitre 1). Il est probable qu'avec un tel repositionnement des otolithes, l'information issue du vestibule soit réduite.

Une autre étude a obtenu des résultats similaires en comparant la flexion et l'extension du cou de 45° (i.e. tête en avant et en arrière respectivement) par rapport à la position droit devant (Buckley et al., 2005). Quelque soit la position de la tête, les auteurs ont utilisé la même scène visuelle : surface de 1,1 m² constituée de sinusoïdales horizontales et verticales (contraste 2,5 c/° soit 25 %) placée à une distance de 1 mètre. En termes de stabilité, la posture était plus instable en condition tête en arrière ou en avant par rapport à la posture en condition droit devant. En termes de position moyenne du centre de pression, cette dernière était similaire entre les conditions tête en arrière et droit devant alors qu'elle était différente entre les conditions tête en avant et droit devant. La position moyenne du CdP étant similaire entre les conditions tête en arrière et droit devant, les auteurs ont conclu que l'instabilité posturale en condition tête en arrière serait due uniquement au déplacement des otolithes de l'utricule hors de leur champ d'action. L'entrée vestibulaire serait donc « interrompue ». Buckley et al. sont, ainsi, en accord avec les travaux de Jackson et Epstein (1991). Par contre, la position moyenne du CdP étant différente entre la condition tête en avant et droit devant, les auteurs ont suggéré que la cause de l'instabilité posturale en condition tête en avant ne serait pas uniquement vestibulaire. D'une part, elle impliquerait une modification et une activité plus importantes de la proprioception musculaire et articulaire de la cheville. D'autre part, elle serait aussi la résultante d'une forte modification des entrées issues des mécanorécepteurs cutanés de la voûte plantaire. Cette étude suggère donc que l'influence du système vestibulaire sur le contrôle postural diffère en proportion entre les conditions tête en avant et en arrière. L'étude suivante confirme cette différence.

Des auteurs ont comparé les effets sur la posture de conditions impliquant des mouvements volontaires de la tête (condition dynamique) *versus* tête statique (Paloski et al., 2006). En condition statique, cinq positions étaient examinées : tête droit devant, en avant, en arrière, inclinée à gauche et à droite de 30°. En condition dynamique dans ces mêmes positions, la tête oscillait selon trois fréquences : 0,14 ; 0,33 et 0,60 Hz.

En condition statique, les auteurs ont observé une détérioration de la posture seulement en condition tête en arrière par rapport à droit devant. En condition dynamique

quelque soit l'orientation des oscillations de la tête, elles induisaient plus d'instabilité que dans la condition contrôle. Par ailleurs, l'instabilité était d'autant plus marquée que la fréquence d'oscillation de la tête augmentait. Les auteurs ont suggéré que l'instabilité posturale (en statique) observée seulement en condition tête en arrière proviendrait de la diminution de la contribution des afférences du système vestibulaire (otolithes de l'utricule). La diminution serait de l'ordre de 40% alors que celle liée à la position tête en avant ne serait que de 15%. Ainsi, avec la tête penchée en avant de 30°, Paloski et al. (2006) n'ont pas obtenu la détérioration posturale observée par Buckley et al. (2005) à 45°.

Ces trois études ont montré que la modulation de la proprioception cervicale et/ou la modification des afférences vestibulaires liées à inclinaison de la tête affectent la stabilité posturale. En effet, Jackson et Epstein (1991), Buckley et al. (2005), et Paloski et al. (2006) admettent qu'une inclinaison de la tête influence aussi bien le système vestibulaire que la proprioception cervicale, et même la proprioception de la cheville et la somesthésie plantaire.

Des auteurs ont mesuré la posture au moyen d'une plate-forme de force et ont appliqué des vibrations, entre autres, sur les muscles *splenii* de la nuque (Kavounoudias et al., 1999). Contrairement aux trois études précédentes, la position de la tête des sujets était maintenue droit devant aussi bien pour la condition avec vibration que pour la condition sans vibration. Ainsi le système vestibulaire contribuait de façon équivalente entre les deux conditions. En condition avec vibration, les auteurs ont observé une inclinaison du corps des sujets vers l'avant. Ils expliquent leur résultat de la façon suivante : la vibration des *splenii* code, au niveau du SNC, la « sensation illusoire » d'étirement des fibres musculaires. Elle donnerait lieu à l'envoi de messages proprioceptifs signalant que la tête serait penchée vers l'avant par rapport au tronc ou, en d'autres termes, que le tronc s'inclinerait vers l'arrière par rapport à la tête. En vue de compenser l'inclinaison « illusoire » du corps vers l'arrière, ce dernier se pencherait dans la direction opposée.

Le changement de la position de la tête ou la vibration des muscles nucaux démontre l'implication de la proprioception cervicale dans le contrôle de la posture. Cette influence semble être sous-tendue par les neurones du noyau vestibulaire et des colliculi supérieurs. En effet, dans son ouvrage, Latash suggère que le noyau vestibulaire médian et latéral (appelé aussi noyau de Deiter) ainsi que les projections tectospinales (issus des colliculi supérieurs) seraient impliqués dans le contrôle des muscles de la nuque (Latash, 2002). Comme

mentionné dans le Chapitre 1, le noyau vestibulaire contribue grandement au maintien de l'équilibre postural (voir Fig. 10). Ainsi, il est possible que l'activité des muscles de la nuque ait une influence sur le contrôle postural par le biais du noyau vestibulaire.

La suite du chapitre se focalise sur le couplage entre la proprioception cervicale et l'activité oculomotrice étudié par divers travaux chez le singe et chez l'homme.

2 - Muscles du cou et oculomotricité

a – Chez le singe

Lestienne et collaborateurs (1984) ont examiné les réponses neuromusculaires du cou durant les mouvements oculaires réalisés par des macaques. Les animaux étaient assis avec la tête immobilisée afin de réduire les torsions au niveau cervical. L'activité électrique de différents muscles du cou (i.e. *splenius capitis*, *altoïdo scapularis*, *cleidomastoïdeus*, *rectus capitis*, *obliquus capitis*) était mesurée par électromyographie et les mouvements des yeux étaient enregistrés par électro-oculographie. Trois conditions ont été testées : la poursuite oculaire, l'exploration libre de la scène visuelle, et la stimulation vestibulaire dans l'obscurité complète.

Durant la poursuite, le *rectus*, l'*obliquus* et l'*altoïdo scapularis* répondaient en phase et de manière ipsilatérale avec la direction de la poursuite. Concernant l'exploration libre, le *splenius* était activé durant la composante phasique et ipsilatérale de l'exploration. De même, durant la stimulation vestibulaire rotatoire, les auteurs ont observé le couplage entre l'activité des muscles du cou et les mouvements oculaires lorsque ces derniers étaient respectivement d'une amplitude et d'une fréquence d'au moins 30° et 0,4 Hz. Ainsi, quelque soit le type de mouvement oculaire, les auteurs ont observé un couplage entre l'activité des muscles du cou et celle des yeux. Les auteurs se sont référés aux travaux menés par l'équipe de Berthoz (Berthoz et al., 1982) suggérant l'implication des neurones du tronc cérébral (i.e. de la voie réticulo-spinale et/ou vestibulo-spinale) dans la mise en place de ce couplage. Ces neurones transmettraient une copie des signaux des mouvements oculaires horizontaux vers les muscles de la nuque.

Plus récemment, Corneil et collaborateurs (2004) ont étudié, chez deux singes, les saccades horizontales guidées par des cibles (diodes ou spots rouges projetés sur un écran). En position assise, tête fixe ou libre, le singe devait fixer un point central qui s'éteignait durant 200 ms (i.e. période de gap). La cible apparaissait alors à gauche ou à droite du point central. Les auteurs ont mesuré les latences des saccades (période entre le début de l'apparition de la cible excentrée et le début de la saccade). Le gap facilite le désengagement de la fixation de la cible centrale permettant le déclenchement de saccades à latence express (les auteurs ont considéré une saccade comme express si sa latence était comprise entre 70 à 100 ms).

L'électromyographie a été utilisée pour mesurer l'activité des unités motrices du *rectus*, de l'*obliquus* et du *splenius*. Que ce soit en condition tête fixe ou libre, ces unités motrices déchargeaient de façon ipsilatérale à la direction de la saccade. La décharge survenait soit de façon synchrone, soit entre 80 à 90 ms après la présentation de la cible, pouvant ainsi précéder l'initiation de la saccade.

Les auteurs ont rapporté une relation inverse entre l'amplitude de l'activité des muscles du cou et la latence des saccades. Plus l'activité des muscles du cou est élevée, plus le temps de réaction des saccades est court. Ils ont suggéré l'existence d'une commande descendante commune à l'orientation du mouvement de la tête et des yeux. La commande pourrait avoir comme origine les couches profondes et intermédiaires du colliculus supérieur. Elle serait envoyée vers le système assurant les mouvements de la tête avant le système de la saccade. Corneil et al. ont conclu qu'une telle commande pourrait diminuer le nombre de saccades express et favoriser la synergie entre l'orientation de la tête et des yeux. Cette interprétation semble en accord avec le modèle de Isa et Kobayashi (2004) suggérant l'implication du colliculus supérieur dans la génération des saccades express. Rappelons que le colliculus supérieur est également impliqué dans le contrôle des muscles de la nuque (ouvrage de Latash : Bases neurophysiologiques du mouvement, 2002).

Des études, décrites ci-dessous, ont aussi démontré un couplage semblable entre l'activité des muscles du cou et les mouvements des yeux, mais chez l'homme.

b – Chez l'homme

André-Dehsays et collaborateurs (André-Dehsays et al., 1988) ont étudié le couplage entre l'activité des muscles du cou et l'activité oculomotrice durant la fixation excentrée (i.e.

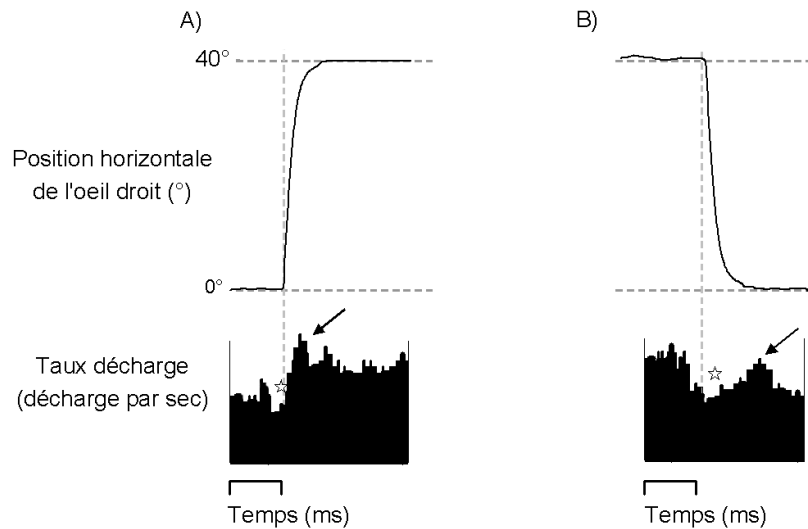
la période tonique) chez 10 sujets (âgés de 22 à 42 ans), tête fixe. L'activité des unités motrices du *splenius* a été mesurée par électromyographie et la position des yeux a été enregistrée par électro-oculographie.

Le taux de décharge produit par le *splenius* augmentait avec l'excentricité du regard et de manière ipsilatérale, et ceci, sans mouvement de la tête. Un tel couplage se mettait en place à partir d'une position excentrée du regard d'au moins 15°. Cependant, les auteurs n'ont pas considéré ce seuil comme absolu puisque, pour un même sujet, le seuil pouvait varier d'un jour à l'autre. Ils ont suggéré l'implication des neurones vestibulaires de second ordre (Berthoz et al., 1981) et des neurones réticulo-spinaux (Grantyn et Berthoz, 1985; Grantyn et Berthoz, 1987) dans la synergie liant l'activité oculomotrice à celle de la nuque. Ces neurones vestibulaires se projetteraient controlatéralement au noyau abducens (impliqué dans le circuit de la génération de la vergence et de la saccade, Fig. 14 et 15, Chapitre 2) et aux muscles de la nuque. Rappelons que le noyau vestibulaire et la formation réticulée du tronc cérébral interviennent dans le contrôle de la posture (Chapitre 1 partie 4).

Dans une autre étude, André-Deshays et al. (1991) ont examiné la relation entre l'activité des muscles du cou et l'activité oculomotrice couplée, cette fois, avec le mouvement de la saccade : la phase. Sept sujets (âgés de 20 à 34 ans) ont participé à l'étude ; ils avaient la tête fixe. Les techniques utilisées étaient similaires de celles de la précédente étude (i.e. électromyographie du *splenius*, électro-oculographie et diodes). Les diodes étaient disposées de sorte à induire des saccades de 20° ou de 40°. Enfin, le caractère centrifuge et centripète de la saccade a été examiné.

Pour les saccades centrifuges (qui s'éloignaient du plan sagittal des sujets), la plupart des unités motrices du *splenius* présentaient un pattern d'activité excitatrice (Fig. 19A) croissant : plus l'excentricité était grande, plus le taux de décharge augmentait (unité motrice de type A). Pour les autres unités motrices (de type B), elles ne répondaient pas ou peu durant les différentes saccades oculaires.

Concernant les saccades centripètes (qui se rapprochaient du plan sagittal du sujet), les réponses étaient inversées. Les unités motrices présentaient un pattern d'activité inhibitrice (Fig. 19B) croissant : plus la saccade se rapprochait de 0° d'excentricité plus le taux de décharge des unités du *splenius* diminuait.



Enregistrements du taux de décharges d'une unité motrice de type A et de la position horizontale de l'œil droit réalisant une saccade centrifuge (A) ou centripète (B) de 40°. L'unité motrice présente un pattern excitateur (augmentation générale du taux de décharges) après la saccade centrifuge (A) et un pattern inhibiteur (diminution générale du taux de décharges) après la saccade centripète (B). Avant la saccade, le taux de décharges diminue (étoile) suivi d'une bouffée soit synchronisée à l'initiation de la saccade lorsqu'elle est centrifuge (flèche), soit tardive lorsque la saccade est centripète (flèche).

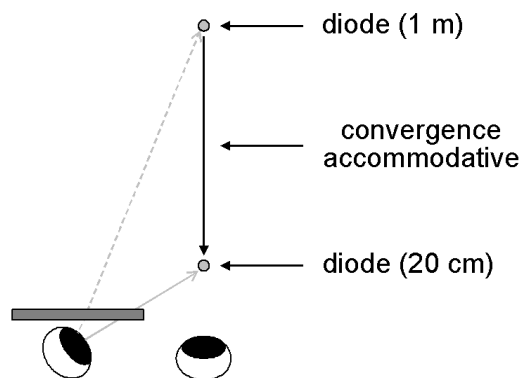
Figure 19 (adaptée de André-Deshays et al. 1991)

Que le pattern d'activité soit excitateur ou inhibiteur, le taux de décharges des unités motrices de type A présentait toujours un pattern divisé en deux périodes : une période de diminution du taux de décharges suivie d'une grande bouffée (Fig. 19). Cependant, l'enchaînement temporel des deux périodes par rapport à l'initiation de la saccade différait si cette dernière était centrifuge ou centripète. Pour les saccades centrifuges, la période de diminution précédait l'initiation de la saccade (de 50 à 200 ms) alors que la bouffée était synchronisée (ou en phase) avec l'initiation de la saccade (Fig. 19A). Pour les saccades centripètes, la période de diminution avait toujours lieu avant l'initiation de la saccade mais la bouffée se déclenchait seulement à la fin de l'exécution de la saccade (Fig. 19B). Les auteurs ont appelé cette composante « bouffée tardive ».

Selon André-Deshays et al., cette différence de phase entre les saccades centrifuges et centripètes serait due à l'activité du *splenius* antagoniste qui serait moins importante pour les saccades centrifuges. Ils concluent que le couplage « œil-tête » pourrait être fondé sur des

structures neurales communes telles que la formation réticulée caudale au niveau du pont et la formation réticulée mésencéphalique.

Han et Lennerstrand (Han et Lennerstrand, 1998) ont étudié l'influence de la vibration (par onde carrée de 1 Hz) des muscles du cou (e.g. sternocléidomastoïdien et *splenius*) sur la vergence accommodative, chez des sujets la tête fixe. Pour stimuler une vergence accommodative, deux diodes étaient disposées sur une barre alignée devant l'œil droit : l'une à 100 et l'autre à 20 cm du sujet. L'œil gauche était couvert. Lorsque l'œil droit accommodait vers la cible à 20 cm (5 dioptries), l'œil couvert convergeait. Cette convergence était stimulée par l'accommodation de l'œil non couvert (i.e. convergence accommodative, voir Fig. 20).



Accommodation de l'œil droit d'une cible placée à 1 m vers une cible située à 20 cm. L'accommodation de l'œil droit stimule la convergence accommodative de l'œil gauche couvert.

Figure 20

Les auteurs ont mesuré la durée d'exécution des deux tiers de l'amplitude totale de la convergence accommodative réalisée par l'œil couvert. La vergence accommodative était plus rapide durant la vibration cervicale en comparaison avec la condition contrôle. La vibration de la nuque a donc accéléré la vergence accommodative. Les auteurs ont conclu qu'un tel couplage reposerait sur le rôle de la proprioception issue des muscles de la nuque et des yeux dans le codage des informations spatiales au niveau rétinien. La stimulation proprioceptive des muscles du cou modifierait la proprioception au niveau des muscles extraoculaires entraînant un mouvement involontaire du regard qui, dans le cas de la vergence accommodative, correspondrait à son accélération.

Les études décrites précédemment ont mis en évidence, par électromyographie ou par vibration de la nuque, un couplage entre l'activité des muscles de la nuque et l'activité oculomotrice durant la saccade (André-Deshays et al. 1988 et 1991), et durant la vergence accommodative (Han et Lennerstrand 1998). Ce couplage serait permanent et interviendrait avec la tête libre ou fixe. Le rôle de la proprioception cervicale dans le contrôle de la posture étant majeur, les mouvements oculaires (par le biais des signaux proprioceptifs extraoculaires) pourraient donc intervenir dans le contrôle postural via leur interaction avec le système proprioceptif cervical. Les résultats des travaux expérimentaux de cette thèse peuvent être expliqués par ce support neuroanatomique. La prochaine partie présente des études traitant directement du rôle des mouvements des yeux sur la posture.

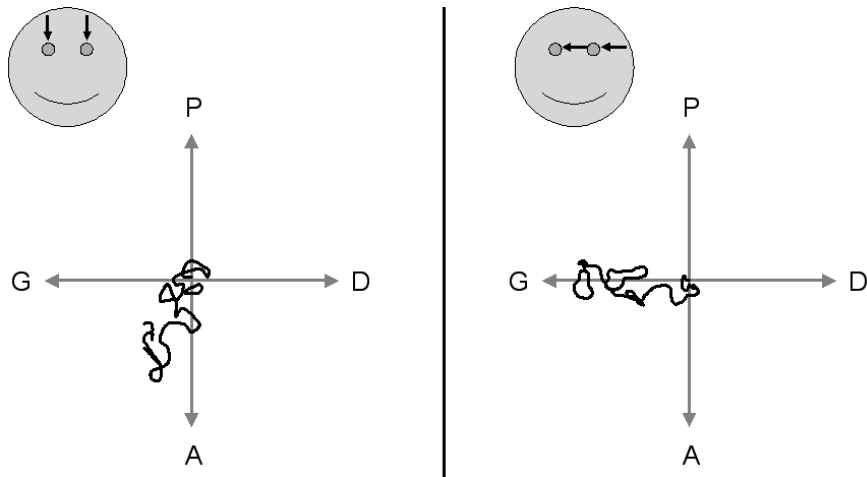
3 – Proprioception extraoculaire, oculomotricité et posture

Effet de la vibration des muscles extraoculaires sur la posture

Roll et collaborateurs (Roll et al., 1989) ont examiné l'influence de la vibration des muscles extraoculaires (voir Fig. 11) sur la posture. Lorsque la vibration était appliquée aux deux muscles droits supérieurs, les auteurs ont observé un déplacement du centre de pression des sujets vers l'avant (Fig. 21). La réponse posturale était d'autant plus marquée lorsque la fréquence de stimulation augmentait (20, 40, 60, 80 et 100 Hz).

Selon les auteurs, la vibration des droits supérieurs a induit l'envoi de signaux proprioceptifs informant le SNC d'un étirement de ces muscles en l'absence d'étirement réel. Les sujets ont alors eu la sensation de reculer car la scène visuelle qu'ils fixaient semblait « s'éloigner ». Roll et al. suggèrent l'importance de la proprioception extraoculaire dans le codage spatial de la position des yeux par rapport à celle de la tête, à celle du corps et par rapport à l'environnement.

La proprioception extraoculaire semble influencer l'orientation de la posture sans exécution volontaire des mouvements des yeux. Les études suivantes ont montré qu'il existe aussi une influence de l'activité oculomotrice sur la posture lors de mouvements oculaires volontaires.



La stimulation des droits supérieurs (schéma de gauche) entraîne un mouvement de la posture vers l'avant « A ». La vibration du droit interne de l'œil droit et du droit externe de l'œil gauche induit une réponse posturale vers la gauche « G ».

Figure 21 (adaptée de Roll et al. 1989)

Effet de la poursuite oculaire sur la posture

Deux études ont évalué la stabilité posturale en comparant deux conditions : la fixation d'une cible statique *versus* la poursuite oculaire d'une cible mobile dans un environnement visuel stable, ou en mouvement (Strupp et al., 2003; Glasauer et al., 2005). Quelque soit le type d'environnement, la poursuite oculaire induit plus d'instabilité posturale par rapport à la condition fixation. Les auteurs ont répliqué le résultat observé par Brandt et al. (1999) qui avaient examiné la poursuite seulement dans un environnement visuel stable. Strupp et al. (2003) et Glasauer et al. (2005) ont attribué l'influence de la poursuite oculaire sur la posture par l'implication des signaux extraoculaires (copie efférente et signal proprioceptif « réafférent ») et non par celle du glissement rétinien (Chap. 1). En effet, durant la poursuite, l'image de la cible est stable sur la rétine. La taille angulaire du glissement rétinien est alors de faible amplitude et ne peut donc expliquer ce résultat.

Effet du nystagmus spontané dans la posture

Jahn et al. (2002) ont examiné, au moyen d'une plate-forme, la posture d'une dizaine de patients (âge moyen 58 ans) présentant une névrite vestibulaire. Le trouble provoque un

nystagmus oculomoteur spontané. Le nystagmus oculaire a été enregistré au moyen d'un casque muni d'une caméra infrarouge. Une diode était fixée sur une barre attachée au casque pour stimuler la fixation oculaire.

Dans une salle obscure, les patients étaient en position érigée sur la plate-forme, posée directement sur le sol rigide ou sur une couche élastique. Trois conditions ont été réalisées : fixation de la diode allumée à forte intensité, à faible intensité ou éteinte (obscurité complète).

Les oscillations antéropostérieures et médio-latérales et la phase lente du nystagmus ont été analysées. Dans la condition obscurité complète, les patients ont présenté une phase lente du nystagmus de forte amplitude ($13,5^\circ/s$). En parallèle, les oscillations posturales des patients étaient particulièrement élevées (Fig. 22A). Dans la condition fixation de la diode à forte intensité, la phase lente du nystagmus ainsi que les oscillations posturales des sujets ont été réduites (Fig. 22B).

Ainsi, les auteurs ont mis en évidence un corrélat entre l'amplitude du nystagmus spontané et les oscillations du corps. Cette corrélation impliquerait soit des signaux oculomoteurs (copie efférente du signal issue de l'intégrateur de la commande tonique au niveau du tronc cérébral), soit des signaux proprioceptifs réafférents. Selon eux, la présence du nystagmus spontané en cas de névrite reposerait sur une anomalie des voies vestibulaires. Elles incluraient les voies ascendantes en direction du thalamus pouvant être responsables de vertiges, et les voies descendantes vestibulo-spinales perturbant le contrôle de l'équilibre postural. Leur conclusion semble en accord avec André-Deshays et al. (1988) qui suggéraient l'implication du noyau vestibulaire dans le couplage des mouvements oculaires et des muscles du cou.

Il est possible qu'un nystagmus induit expérimentalement chez un sujet sain entraîne une modification du contrôle postural. En effet, le nystagmus est composé d'une phase de poursuite dont les travaux de Glasauer et al. (2003) et Strupp et al. (2005) ont démontré l'effet déstabilisateur sur la posture. De plus, Bronstein et Buckwell (1997, voir Chapitre 1) suggèrent que la poursuite oculaire, induite par une scène en mouvement, réoriente la posture des sujets dans le sens du mouvement de la scène.

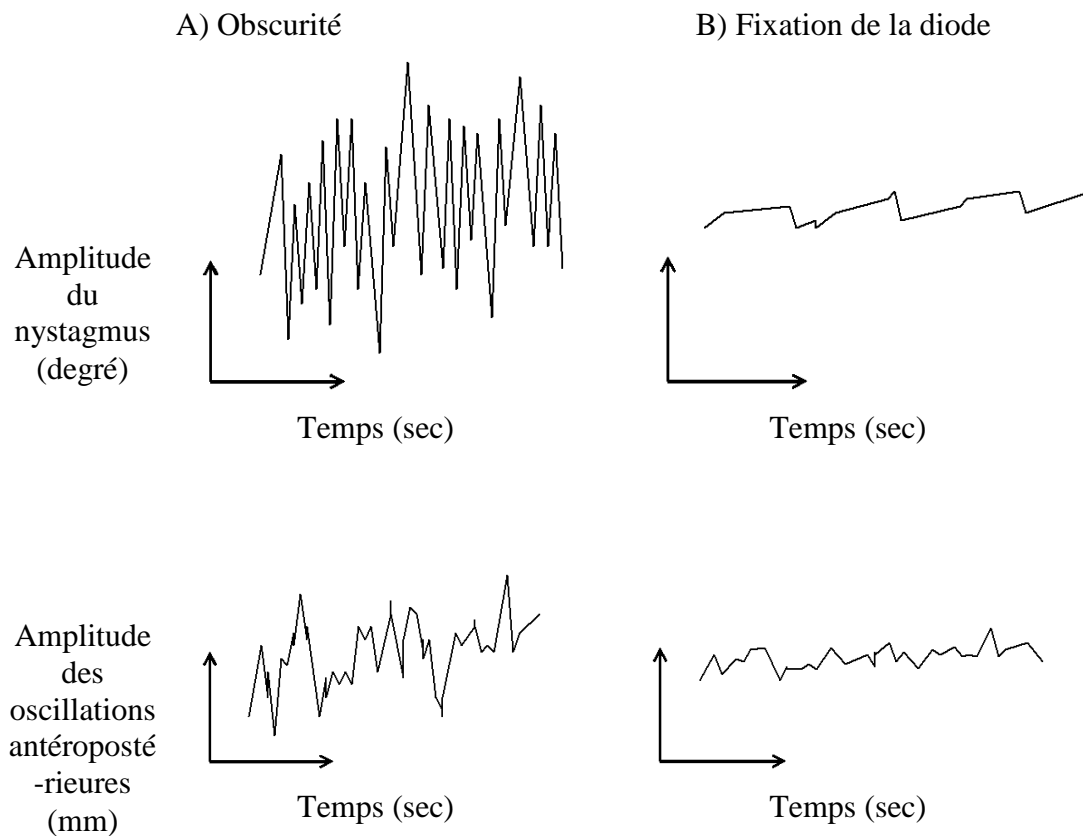


Figure 22 (adaptée de Jahn et al. 2002)

Effet des saccades sur la posture

L'effet des saccades oculaires sur la stabilité posturale diffère selon les études. White et al. (1980) ont montré une absence d'effet de la saccade sur la posture. Les auteurs ont comparé les saccades horizontales de 4° d'amplitude *versus* la fixation. Les bandes de fréquences des oscillations posturales ont été analysées et n'ont révélé aucune différence significative entre les deux conditions. White et al. ont suggéré que le système nerveux répondait différemment au glissement de l'image rétinienne si ce dernier résultait du mouvement de l'environnement ou des mouvements oculaires produits par les sujets eux-mêmes (i.e. les saccades). Les sujets ne seraient pas déstabilisés par le glissement rétinien produit par la saccade. Il est possible que l'absence d'influence des saccades sur la posture soit due à la faible amplitude des saccades étudiées (4°).

En effet, le groupe de Brandt (Brandt et al., 1986; Brandt, 1999) a observé une déstabilisation de la posture avec des saccades plus amples. Les sujets produisaient des

saccades horizontales de 5 à 80° à 0,5 Hz. La racine du carré moyen des oscillations dans le plan antéropostérieur et médio-latéral a été mesurée. Les paramètres ont augmenté significativement lorsque l'amplitude des saccades était large (au moins 40°) par rapport à la condition fixation. Les auteurs émettent comme hypothèse qu'au-delà de 40° d'amplitude, le glissement rétinien au cours des saccades aurait une grande vitesse influençant la posture dans le sens de la déstabilisation.

D'autres travaux (Uchida et al., 1979; Kikukawa et Taguchi, 1985; Oblak et al., 1985; Stoffregen et al., 2007) ont observé, au contraire, une amélioration de la stabilité posturale durant l'exécution des saccades. Le groupe de Uchida (1979) a étudié un large panel de saccades (i.e. horizontales et verticales de 5 à 40° d'amplitudes et de 0,1 à 1 Hz de fréquences). Ils ont rapporté un effet stabilisateur dès 0,2 Hz. Kikukawa et Taguchi (1985) ont examiné des saccades de 20°. Ils ont observé le même effet à partir de 0,75 Hz. Oblak et al. (1985) ont étudié des saccades horizontales de 45° à 0,5 Hz. Ces saccades sont similaires à celles examinées par Brandt et al. (1999) qui ont, nous l'avons dit, rapporté une influence déstabilisatrice des saccades. Enfin, Stoffregen et al. (2007) ont aussi observé l'effet stabilisateur avec des saccades d'amplitudes plus faibles (11°) à 0,583 Hz. Uchida et al. (1979), comme Kikukawa et Taguchi (1985), ont suggéré que les signaux liés à l'initiation ou à l'exécution des saccades seraient intégrés par le système postural via les voies vestibulo-spinales et réticulo-spinales impliquées dans le tonus musculaire des membres inférieurs (Chapitre 1 partie 13). Quant à Stoffregen et al. (2007), ils ont suggéré que le gain de stabilité durant les saccades permettrait aux yeux de mieux suivre les mouvements des cibles. Par exemple, une oscillation corporelle dans le plan antéropostérieur pourrait entraîner une modification non désirée de la position angulaire de la cible. La saccade exécutée aurait alors une amplitude incorrecte. Ainsi, une exécution précise de la saccade nécessiterait un mode de contrôle de la posture plus « serré » entraînant moins ou de faibles oscillations.

Il est possible que les différences de résultats entre ces études résident sur le choix de la distance utilisée entre les sujets et la cible (et donc de l'angle de convergence). Cet aspect fait l'objet d'une étude expérimentale incluse dans cette thèse.

Par le biais de sa synergie avec l'activité des muscles de la nuque, l'activité oculomotrice peut influencer l'équilibre postural. Une telle influence a été démontrée avec la vibration des muscles extraoculaires, la poursuite oculaire et le nystagmus spontané. Diverses

structures du tronc cérébral, telles que le noyau vestibulaire, la formation réticulée et les colliculi supérieurs, semblent participer à la fois au contrôle des mouvements des yeux, des mouvements du corps et du contrôle de la posture. La partie expérimentale de cette thèse s'inscrit dans ce cadre. Elle cherche à déterminer si la vergence oculomotrice a un rôle dans le contrôle postural, en particulier lorsque l'angle de convergence est augmenté en vision proche, chez les sujets sains, jeunes ou âgés, ou avec des troubles de la vergence. Ce rôle a été examiné de façon systématique dans toutes les études incluses dans cette thèse. Enfin, une des études est centrée sur l'effet de la saccade oculaire sur la posture (Rey et al. 2007), sujet controversé dans la littérature. Notre étude examine les saccades à différentes distances impliquant différents angles de convergence.

Le chapitre suivant est dédié aux effets du vieillissement sans pathologie sur l'équilibre postural, aspect également examiné dans la plupart de nos études expérimentales.

Chapitre 4 :

Posture et vieillissement

1 – Paramètres posturographiques sensibles aux effets du vieillissement	44
2 – L'électromyographie et effets du vieillissement	46
3 – Vieillissement et instabilité posturale : une origine visuelle et/ou oculomotrice ? ...	48

IV – Posture et vieillissement

Le chapitre est consacré aux effets du vieillissement sans pathologie sur le contrôle postural. Dans un premier temps, nous présenterons une revue d'études posturographiques suivie de travaux en électromyographie examinant les effets du vieillissement sur la posture. La dernière partie sera consacrée aux déficits de certaines fonctions visuelles et oculomotrices liés à l'âge et leurs possibles implications dans la détérioration de la posture chez le sujet âgé.

1 - Paramètres posturographiques sensibles aux effets du vieillissement

L'effet de l'âge sur la posture est un sujet très étudié, sur des groupes d'âges différents et des paramètres posturographiques différents. Les travaux présentés sont regroupés selon le paramètre posturographique étudié et par chronologie.

Murray et al. (1975) ont comparé trois groupes de sujets classés selon leur âge : les trentenaires, les quinquagénaires et les septuagénaires. En position standardisée de Romberg, les sujets plus âgés ont montré une plus grande instabilité que les trentenaires (i.e. longueur du statokinésigramme plus grande). De tels résultats ont été reproduits par Benjuya et collaborateurs (Benjuya et al., 2004) en examinant des sujets plus âgés (i.e. âge moyen 77,8 ans).

Teasdale et al. (1991) ont examiné la posture de deux groupes de sujets d'âge moyen différent (i.e. 74 ans et 21,5 ans). Ils ont rapporté une plus grande vitesse des excursions du centre de pression chez les sujets âgés par rapport aux sujets jeunes. Le groupe de Pyykkö (Pyykko et al., 1990; Hytonen et al., 1993) a aussi observé une augmentation de la vitesse du CdP chez des sujets d'âge plus avancé (i.e. 85 ans) par rapport à des sujets moins âgés (i.e. de 50 à 60 ans). Plus récemment, Choy et al. (2003) et Du Pasquier et al. (2003) ont également mis en évidence une corrélation entre l'augmentation de la vitesse du CdP et l'âge. Les études portaient respectivement sur des sujets ayant entre 20 et 90 ans et entre 20 et 85 ans. Dans les

deux études, les auteurs ont observé une augmentation significative de la vitesse du CdP dès la soixantaine.

Rogind et al. (2003) ont examiné l'équilibre postural chez des sujets ayant entre 20 et 70 ans. Dans cette étude, le paramètre sensible aux effets du vieillissement sur la posture a été la surface du centre de pression. Benjuya et collaborateurs (2004) ont obtenu des résultats similaires en examinant des sujets d'âge plus avancé (i.e. 77,8 ans).

Deux autres études (Teasdale et al., 1991; Amiridis et al., 2003) ont mis en évidence une augmentation des oscillations dans le plan antéropostérieur et médio-latéral avec l'âge (en comparant des septuagénaires avec des sujets d'une vingtaine d'années).

Doyle et al. (2004) ont comparé des sujets d'âge moyen de $69,5 \pm 6,2$ ans avec des sujets d'âge moyen de $21,5 \pm 2,8$ ans en condition yeux ouverts et yeux fermés. Les excursions du centre de pression ont fait l'objet d'une analyse traditionnelle (étendue des excursions du CdP dans le plan antéropostérieur et médio-latéral) et d'une analyse non linéaire basée sur l'algorithme d'Higuchi de la dimension fractale. L'analyse fractale permet d'identifier les propriétés irrégulières de divers phénomènes comme les oscillations posturales. Une augmentation de la composante fractale est signe d'instabilité (Blaszczyk et Klonowski, 2001). Les sujets plus âgés ont montré une dimension fractale plus élevée que celle des sujets plus jeunes. L'effet a été observé pour les oscillations dans le plan antéropostérieur autant en condition yeux ouverts que yeux fermés. Avec les paramètres traditionnels, seule la condition yeux fermés a révélé une différence significative entre les sujets jeunes *versus* âgés. Les auteurs ont conclu que l'analyse fractale est plus sensible aux modifications du contrôle postural liées à l'âge par rapport aux paramètres traditionnels.

En résumé, bien que l'ensemble des études s'accorde sur l'observation selon laquelle avec le vieillissement non pathologique la posture se détériore, le paramètre postural sensible à l'âge varie d'une étude à l'autre. Les effets de l'âge ont été observés pour divers paramètres (longueur du statokinésigramme, vitesse du CdP, surface du CdP, oscillations antéropostérieures du CdP, analyse fractale...). La partie suivante présente des travaux examinant l'activité musculaire des membres inférieurs chez le sujet âgé pouvant être un autre signe d'instabilité posturale lié à l'âge.

2 – L'électromyographie et effets du vieillissement

Amiridis et collaborateurs (2003) ont comparé des sujets d'âge moyen de 70,1 ans avec des sujets jeunes d'âge moyen de 20,1 ans. Les excursions du centre de pression ont été mesurées avec une plate-forme. L'activité des muscles contrôlant les articulations de la cheville (*tibialis anterior*, gastrocnémien médian) et l'activité des muscles contrôlant les articulations de la hanche (droit fémoral et le semi tendineux) ont été enregistrées par électromyographie. Les sujets plus âgés ont montré de plus grandes oscillations posturales autant dans le plan antéropostérieur que médio-latéral et présentaient une plus grande activité musculaire du *tibialis* antérieur et du gastrocnémien. Sur la base de ces résultats, les auteurs ont conclu que l'amplification des oscillations posturales observée chez les septuagénaires pouvait être attribuée à une augmentation de l'activité des muscles des membres inférieurs. Benjuya et collaborateurs (2004) ont aussi observé une augmentation de l'activité musculaire du *tibialis* antérieur avec l'âge en examinant des sujets d'âge moyen plus avancé (i.e. 77,6 ans).

D'autres auteurs ont aussi mesuré l'activité du *tibialis* antérieur et du gastrocnémien latéral au moyen de l'électromyographie ainsi que l'équilibre postural avec une plate-forme (Jonsson et al., 2005). Ils ont comparé des sujets d'âge moyen de 70,6 ans avec des sujets d'âge moyen de 30,0 ans. Les deux groupes de sujets ont montré le même pattern de variabilité de la force exercée par les deux pieds. Au cours de l'enregistrement électromyographique, la variabilité diminuait correspondant à une phase de stabilisation de l'activité des deux jambes. Cependant, la baisse de la variabilité était plus rapide et plus ample chez les sujets jeunes que chez les sujets âgés. Les auteurs ont suggéré que les sujets âgés présentent une activité musculaire plus variable des membres inférieurs que les sujets jeunes.

L'ensemble de ces études arrive au même constat : durant la posture orthostatique, l'activité des muscles des membres inférieurs devient plus importante avec l'âge.

Laughton et collaborateurs (Laughton et al., 2003) ont effectué la même comparaison que les études vues précédemment (i.e. électromyographie et posturographie entre des sujets âgés et jeunes). Cependant, le contrôle postural de sujets âgés chuteurs a également été examiné. Les données posturographiques n'ont révélé aucune différence significative entre les

deux groupes de sujets âgés. Concernant les données électromyographiques, l'activité musculaire des jambes était plus forte chez les sujets âgés (chuteurs ou non) par rapport aux sujets plus jeunes. Ainsi, l'augmentation de l'activité musculaire durant le maintien de la posture semble spécifique au vieillissement. Elle serait présente autant chez les personnes âgées avec ou sans antécédent de chute.

Corriveau et collaborateurs (Corriveau et al., 2004a) ont mesuré les excursions du centre de pression au moyen d'une plate-forme et les déplacements du centre de masse en l'utilisant un système optoélectrique. L'amplitude de la différence entre les deux centres (i.e. CdP-CdM) a été calculée pour les conditions yeux ouverts et yeux fermés.

Les auteurs ont modélisé le contrôle postural. Le modèle était composé de 4 entrées (i.e. la vision, la somesthésie, la force musculaire des membres inférieurs et le système nerveux central) et d'une sortie (la différence CdP-CdM). Ils ont quantifié la contribution de chacune des 4 entrées (en pourcentage) afin d'obtenir des valeurs théoriques du CdP-CdM, issues du modèle, similaires à celles mesurées expérimentalement pour chaque sujet. Selon leur modèle, les auteurs ont observé qu'en augmentant la contribution de la force musculaire des membres inférieurs, les valeurs théoriques du CdP-CdM dans le plan antéropostérieur étaient similaires à celles observées expérimentalement chez les personnes âgées dans la condition yeux ouverts. Ainsi, les auteurs ont suggéré qu'avec l'âge la force musculaire des membres inférieurs devenait plus importante dans le contrôle des oscillations antéropostérieures en condition yeux ouverts.

Ainsi, il est possible que l'activité importante des muscles des membres inférieurs chez le sujet âgé soit responsable de l'augmentation des oscillations dans le plan antéropostérieur. Or, parmi les études citées précédemment, seules deux (i.e. Teasdale et al. 1991; Amiridis et al. 2003) ont observé un effet de l'âge sur le paramètre des oscillations antéropostérieures. Rappelons qu'en position de Romberg standard, les chevilles contrôlent les oscillations dans le plan antéropostérieur et que les hanches contrôlent les oscillations dans le plan médio-latéral (Winter et al. 1998). De plus, une étude récente semble indiquer que l'activité des membres inférieurs soit corrélée à un taux élevé de changements de position du centre de pression dans le temps, entraînant ainsi une vitesse importante (Wang et al., 2006). Dans les travaux expérimentaux de cette thèse, nous avons analysé plusieurs paramètres (surface du CdP, les oscillations dans le plan antéropostérieur et médio-latéral et la variance de vitesse) afin de déterminer lequel serait le plus sensible aux effets de l'âge sur la posture.

La suite du chapitre est centrée sur l'implication d'autres facteurs pouvant altérer l'équilibre postural du sujet âgé : la vision et l'oculomotricité.

3 – Vieillesse et instabilité posturale : une origine visuelle et/ou oculomotrice ?

La diminution de la stabilité posturale chez la personne âgée peut être la conséquence d'une baisse des fonctions visuelles et/ou oculomotrices. En effet, l'acuité visuelle décroît significativement chez les personnes âgées par rapport aux sujets plus jeunes (Ivers et al., 2000; Laitinen et al., 2005). De même, une étude a montré que la sensibilité au mouvement visuel serait plus faible chez les personnes âgées (Tran et al., 1998). Les auteurs de cette étude ont examiné la perception subjective et la détection objective du mouvement visuel chez des sujets âgés de 19 à 94 ans. Les sujets étaient placés devant un écran avec leur main dominante sur la poignée d'un joystick et leurs mouvements oculaires étaient enregistrés. Les stimuli étaient des points disposés de façon aléatoire (random dots), l'ensemble se déplaçant vers la droite ou vers la gauche.

Les sujets devaient déterminer la direction du mouvement visuel en orientant la poignée du joystick dans la même direction. Le temps pour déterminer la direction du mouvement correspondait à la mesure de la perception subjective. La mesure objective de la détection du mouvement correspondait à la latence du nystagmus optocinétique induit par le déplacement des points. Les auteurs ont observé une diminution avec l'âge à la fois de la perception subjective et de la détection objective. Ils ont attribué une telle diminution à une dégénérescence de la voie réticulo-géniculée et des boucles corticales et sous corticales impliquées dans le nystagmus optocinétique. Quant à la baisse de la perception subjective, elle serait due à une détérioration de l'aire temporale médiane du cortex visuel.

Wist et collaborateurs (Wist et al., 2000) ont rapporté des résultats similaires dans une tâche de détermination de l'orientation du cercle de Landolt. Le cercle était formé par des points aléatoires dont leurs mouvements produisaient un contraste avec les autres points restés statiques. Les sujets âgés de plus de 65 ans présentaient des taux de réponses correctes significativement inférieurs à ceux des sujets plus jeunes. Les auteurs suggèrent que la baisse

des performances chez les sujets âgés pourrait être attribuée à une plus faible sensibilité au contraste du mouvement.

Des études concernant les effets du vieillissement sur différents systèmes oculomoteurs, sont peu nombreuses. Yang et al. (2006) ont rapporté, pour les saccades horizontales, des latences plus longues chez les sujets âgés (de 63 à 83 ans) que chez les sujets jeunes (de 20 à 32 ans). De même, Yang et Kapoula (2006b) ont montré que des sujets de 63 à 83 ans réalisaient des saccades verticales avec une latence plus longue que des sujets de 20 à 28 ans. Les auteurs suggèrent que l'élévation des latences chez les sujets âgés serait due à la détérioration normale liée à l'âge des aires frontales et pariétales. Dans une autre étude, Yang et Kapoula (2006a) ont montré que des sujets âgés de 63 à 75 ans réalisaient des saccades verticales avec une précision et une coordination binoculaire semblables à celles de sujets âgés de 20 à 28 ans. Les saccades étaient effectuées à 40 et 150 cm avec une amplitude de 7,5° ou 15°. Les auteurs ont suggéré que les structures sous-corticales et le cervelet, impliqués dans le contrôle binoculaire des saccades verticales, réalisées à ces amplitudes, étaient préservés. En effet, pour des saccades plus amples (entre 10° et 50°), Huaman et Sharpe (1993) ont rapporté une baisse de la précision des saccades verticales. Yang et Kapoula (2006) suggèrent que les circuits corticaux et sous-corticaux, contrôlant ces différents mouvements, pourraient être peu affectés par l'âge. Autrement dit, le vieillissement ne serait pas une détérioration uniforme de toutes les fonctions. Néanmoins, les auteurs soulignent la nécessité d'études plus amples incluant des groupes de sujets âgés moins sélectifs (le groupe étudié étant des femmes, la plupart ex-danseuses de l'opéra). Enfin, Rambold et al. (2006) ont montré que la vergence oculomotrice chez les personnes de plus de 56 ans était plus longue en termes de latence et plus lente en termes de pics de vitesse et de pics d'accélération par rapport aux sujets jeunes.

La diminution de ces fonctions visuelles (acuité visuelle, sensibilité au contraste et au mouvement) et oculomotrices (saccades et vergences) avec l'âge pourrait être une source d'instabilité posturale. Par exemple, Leibowitz et Shupert (1985) suggèrent que la baisse de l'équilibre postural chez le sujet âgé pourrait être la conséquence d'une détérioration de certaines fonctions oculomotrices telles que la poursuite oculaire et le réflexe optocinétique.

Lord et Menz (2000) ont examiné l'acuité visuelle binoculaire, la sensibilité aux contrastes, la perception de la profondeur, la stéréoacuité et le champ visuel inférieur de sujets

âgés de 63 à 90 ans. Par ailleurs, ils ont aussi mesuré la force exercée par les quadriceps des sujets ainsi que l'équilibre postural avec une plate-forme posée sur un sol rigide ou mou.

Sur sol mou, les sujets ont présenté une détérioration de la posture. La diminution de la stabilité posturale était corrélée à la baisse de la sensibilité au contraste, de la stéréoacuité et à l'augmentation de la force des quadriceps. Les auteurs ont suggéré que la baisse de la sensibilité aux contrastes et celle de la perception du relief pourraient être responsables de l'instabilité posturale progressive chez le sujet âgé. Une baisse de la sensibilité au contraste et de la stéréoacuité pourrait influencer le système de la vergence puisque l'angle de la vergence s'ajuste en fonction de la profondeur des objets fixés. Il est donc possible que l'ajustement de l'angle de convergence soit incorrect et fluctuant, entraînant une posture instable. Comme mentionné dans les chapitres précédents, nos travaux expérimentaux inclus dans cette thèse examinent le rôle de la vergence dans le contrôle de la posture.

Lors d'un examen de la posture orthostatique, la qualité de la stabilité dépend de la vision nette de la cible. Elle implique, certes, une acuité visuelle et une perception du contraste de qualité, mais surtout, une bonne perception du mouvement visuel (e.g. le glissement rétinien, Chapitre 1). Par exemple, si le mouvement visuel consécutif aux oscillations posturales est mal ou peu détecté, la boucle de « re-stabilisation » du corps pourrait ne pas fonctionner efficacement. D'autre part, nous avons vu que la distance de fixation, et donc la perception de la profondeur, joue un rôle important dans la stabilisation posturale (voir Chapitre 1 partie 3). Notons toutefois que des études directes démontrant le rôle respectif de chacune de ces fonctions visuelles et oculomotrices n'ont pas encore été réalisées.

En résumé, la détérioration des fonctions visuelles ou oculomotrices ou de la combinaison des deux, avec l'âge, pourrait agir sur la posture. Plus généralement, une vision moins nette et moins sensible au mouvement pourrait réduire la perception des objets d'intérêt entraînant des mouvements oculaires inadaptés. Réciproquement, des mouvements oculaires lents et imprécis pourraient induire une vision floue des objets d'intérêt. Par exemple, la lenteur de la vergence (Rambold et al. 2006) chez le sujet âgé pourrait entraîner un ajustement de l'angle de la convergence inadapté. La personne âgée ne percevrait pas, dans sa navigation spatiale, les obstacles potentiellement dangereux dans son environnement et susceptibles d'entraîner une chute. Dans plusieurs travaux expérimentaux de cette thèse, nous avons

examiné la posture du sujet âgé selon différentes distances impliquant des angles de vergence différents.

Le chapitre suivant présente la problématique de la thèse, les différentes questions qui en découlent, et les travaux expérimentaux mis en œuvre afin d'apporter des éléments de réponses.

Chapitre 5 :

Problématique du travail expérimental

1 – Rôle de l'angle de la convergence dans l'effet de la distance sur la posture	53
2 – Rôle de l'angle de la convergence dans le contrôle postural en interaction avec l'entrée visuelle	54
3 – Signes précoces du vieillissement dans la posture et influence de l'angle de la convergence.....	56
4 – Effet des saccades en interaction avec l'angle de la convergence sur le contrôle de la posture	57
5 – Trouble fonctionnel de la vergence, fatigue visuelle, céphalées, vertiges et contrôle postural	57

V – Problématique du travail expérimental

Le maintien de l'équilibre postural repose, comme nous l'avons dit, sur l'implication de divers systèmes sensoriels : la vision, le système vestibulaire, la somesthésie et la proprioception. L'objectif de la thèse consiste à examiner le rôle spécifique du système de la vergence oculaire avec une attention particulière sur l'angle de la convergence. L'implication de l'angle de la convergence dans la stabilité posturale sera étudiée à travers cinq questions :

- _ Quel est le rôle de l'angle de convergence dans l'effet de la distance sur la posture ?
- _ Quelle interaction existe-t-il entre l'angle de convergence et l'entrée visuelle sur la posture ?
- _ Quels sont les signes du vieillissement dans l'équilibre postural et quelle influence l'angle de convergence exerce-t-il sur la posture du sujet âgé ?
- _ Quelle influence exerce l'angle de convergence sur la posture durant les saccades ?
- _ Comment est assuré le contrôle postural chez le sujet ayant des troubles de la vergence ?

L'ensemble des travaux expérimentaux inclus dans cette thèse indique l'importance de l'angle de la vergence, que l'on peut considérer comme une source d'information majeure (efférente et proprioceptive) pour le maintien de l'équilibre postural orthostatique. Tout au long de cette thèse, nous défendons l'argument selon lequel les signaux binoculaires de la vergence (efférents ou proprioceptifs) agissent sur le contrôle postural via leur synergie avec les muscles du cou, partie constitutive du système proprioceptif général. En effet, la stabilisation posturale, même orthostatique, se réalise dans un espace tridimensionnel qui inclut la distance entre le sujet et la cible de fixation. Or, la vergence oculaire est une base sensori-motrice solide pour le codage, au niveau du SNC, de la distance du sujet par rapport à son environnement.

1 – Rôle de l'angle de la convergence dans l'effet de la distance sur la posture

Le premier versant concerne les mécanismes qui sous-tendent l'effet de la distance sur la posture. Selon l'équipe de Brandt (Bles et al., 1980; Paulus et al., 1984; Brandt et al., 1986; Paulus et al., 1989), les oscillations posturales du sujet produisent un glissement rétinien

utilisé par le système nerveux central afin de stabiliser la posture. Pour une oscillation d'amplitude égale, la taille angulaire du glissement rétinien est plus élevée en distance proche qu'en distance lointaine (Fig. 9). Le glissement rétinien se détecte plus aisément en vision proche. En conséquence, la stabilisation de la posture est plus importante en fixation proche qu'en fixation lointaine. Néanmoins, remarquons qu'en fixation proche l'angle de la convergence est plus élevé qu'en fixation lointaine (Fig. 23). Ainsi, il est possible que la convergence soit une source importante dans l'amélioration de la stabilité posturale.

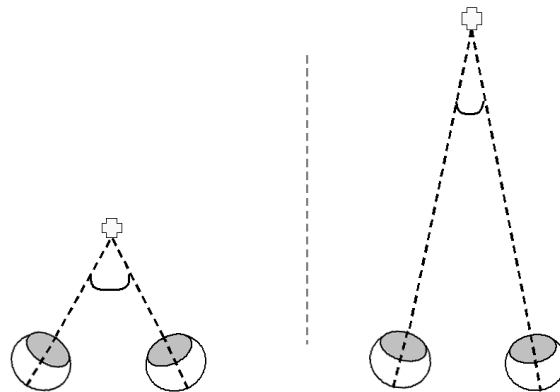


Figure 23 : Angles de la convergence en vision proche et en vision lointaine

Pour traiter la question du rôle de l'angle de convergence dans l'effet de distance sur la posture, deux expériences ont été menées. Dans la première, des prismes convergents ont été utilisés afin d'augmenter l'angle de convergence. Avec une telle augmentation, la posture est-elle plus stable (étude 1) ? Dans la seconde, nous avons évalué la stabilité posturale et mesuré l'angle de vergence par vidéo-oculographie. Est-ce qu'un angle de convergence élevé est corrélé à une posture plus stable (étude 3) ?

2 – Rôle de l'angle de la convergence dans le contrôle postural en interaction avec l'entrée visuelle

L'interaction entre l'angle de convergence et l'entrée visuelle a été examinée dans deux études : modulation de l'angle de vergence soit entre la vision binoculaire et monoculaire (étude 2), soit entre la condition yeux ouverts et yeux fermés (étude 3).

a – Angle de la convergence et vision binoculaire versus monoculaire

Diverses études tendent à montrer que la vision binoculaire privilégie certaines fonctions visuelles. En effet, avec la vision binoculaire, nous jugeons mieux la distance des objets que nous fixons (McKnight et coll. 1991), notre acuité visuelle est meilleure (McKnight et coll. 1991) et nous atteignons les objets avec plus de précision (Magne et Coello 2002 ; Servos 1992, 2000). Par contre, il n'a pas été démontré de façon reproductible que la vision binoculaire soit supérieure à la vision monoculaire sur l'équilibre postural. En effet, Fox (1990) a observé une amélioration de la stabilité posturale en vision binoculaire par rapport à la vision monoculaire, alors qu'Isotalo et collaborateurs (2004) ont obtenu une telle amélioration seulement pour un sujet sur deux. La distance utilisée par Fox (1990) diffère de celle d'Isotalo et collaborateurs (2004) : 140 et 90 cm respectivement. Ces différentes distances pourraient expliquer la divergence de résultats entre les deux études. Ainsi, nous avons entrepris une étude ayant pour objectif de réévaluer la posture entre les conditions vision binoculaire *versus* vision monoculaire en modulant la distance de fixation, et donc l'angle de convergence (étude 2).

L'œil directeur est celui s'alignant le mieux avec la cible durant sa fixation en vision binoculaire. Isotalo et al. (2004) ont rapporté une absence de différence, au niveau postural, entre la condition œil directeur ouvert seul *versus* œil non directeur avec un angle de convergence de $3,8^\circ$. Dans l'étude 2, nous avons réexaminé l'effet de l'œil directeur *versus* l'œil non directeur sur la posture dans un protocole plus riche en conditions expérimentales et en paramètres par rapport à l'étude d'Isotalo et al. (2004). En effet, nous avons réalisé les comparaisons entre l'œil directeur *versus* l'œil non directeur avec des angles de convergence différents (i.e. $8,6^\circ$ et $1,7^\circ$). Enfin, en complément de l'analyse de la surface du CdP, paramètre étudié par Isotalo et al. (2004), nous avons examiné les écarts-types des oscillations dans le plan antéropostérieur et médio-latéral et la variance de vitesse.

b – Angle de la convergence et test de Romberg

La vision joue un rôle majeur dans le contrôle postural. En effet, le test de Romberg, qui compare la condition yeux ouverts *versus* yeux fermés, montre en général une posture plus stable dans la première condition (Gagey et Weber 1999). L'amélioration est

traditionnellement attribuée au rôle de la vision. A notre connaissance, les études examinant la posture avec le test de Romberg ont utilisé une distance unique qui diffère entre les travaux (Gerr et al., 2000; Corriveau et al., 2001; Doyle et al., 2004; Lafond et al., 2004; Ouaknine et al., 2004; Bosek et al., 2005). Or, rappelons que la stabilité posturale dépend aussi de la distance de fixation. L'objectif de l'étude 3 était de réexaminer le test de Romberg en modulant l'angle de convergence selon deux distances de fixation : 40 et 200 cm. Les résultats montrent que la valeur du quotient de Romberg dépend de l'angle de vergence et appellent une interprétation visuo-motrice de ce quotient plutôt qu'une interprétation purement visuelle.

3 – Signes précoces du vieillissement dans la posture et influence de l'angle de la convergence

De nombreuses études ont mis en évidence une augmentation de l'instabilité posturale chez le sujet âgé ne présentant pas de troubles ou de pathologies (Murray et al 1975; Pyykkö et al. 1990; Teasdale et al. 1991; Amiridis et al. 2003; Choy et al. 2003; Du Pasquier et al. 2003; Rogind et al. 2003; Doyle et al. 2004). Cependant, l'effet de l'âge a été détecté par des paramètres posturographiques différents entre les études : la longueur (Murray et al. 1975), la vitesse (Pyykkö et al. 1990; Teasdale et al. 1991; Choy et al. 2003; Du Pasquier et al. 2003), la surface du CdP (Rogind et al. 2003) et les oscillations antéropostérieures et médio-latérales (Teasdale et al. 1991; Amiridis et al. 2003). Enfin, la plupart de ces travaux ont examiné des septuagénaires ou des sujets plus âgés qui n'exerçaient plus d'activité professionnelle.

Nous avons examiné l'équilibre postural de sujets âgés de 55 à 70 ans, ne présentant pas de pathologies et ayant une activité professionnelle et/ou sportive (études 1, 2 et 3). Par ailleurs, contrairement aux études citées précédemment, nous avons analysé plusieurs paramètres posturographiques (surface, écarts-types des oscillations antéropostérieures et médio-latérales et variance de vitesse) afin de déterminer lequel serait susceptible d'être le plus sensible à l'âge.

Une autre question sur la posture et le vieillissement concerne l'angle de convergence. Avec l'âge, les capacités à converger s'affaiblissent (Rambold et al. 2006). Il est possible qu'une telle diminution puisse induire une certaine instabilité posturale lorsque la vergence

oculomotrice est sollicitée (e.g. en fixation proche). L'objectif consiste à examiner l'équilibre postural de personnes âgées de 55 à 71 ans en modulant l'angle de convergence. Comme pour les sujets jeunes, deux méthodes ont été utilisées pour réaliser une telle modification : la distance de fixation (études 1, 2 et 3) et l'utilisation des prismes convergents (étude 1).

4 – Effet des saccades en interaction avec l'angle de la convergence sur le contrôle de la posture

Il n'existe pas, comme nous l'avons vu, de consensus concernant l'effet des saccades sur la stabilité posturale : une absence d'effet par rapport à la tâche de fixation (voir White et al. 1980), une amélioration (voir Uchida et al. 1979; Kikukawa et Taguchi 1985; Oblak et al. 1985; Stoffregen et al. 2007) ou une détérioration (voir Brandt et al. 1999) ont été rapportées.

Ces travaux ont étudié les saccades réflexes (déclenchées par des diodes ou des points sur écran qui s'allument par alternance). Qu'en est-il lorsque les saccades sont réalisées volontairement (par exemple lorsque les cibles nécessaires à la réalisation de la saccade sont constamment présentes) ? Les saccades ont souvent été réalisées sur un seul axe (horizontal ou vertical) et à une seule distance. Or nous savons que la distance influence l'équilibre postural. Cette influence peut être expliquée par l'amplitude de l'angle de convergence. Dans l'étude 4, nous avons examiné l'effet de saccades volontaires (horizontales ou verticales) sur la posture à deux distances (40 et 200 cm) correspondant à des angles de vergence différents (1,7° et 8,6° respectivement).

5 – Trouble fonctionnel de la vergence, fatigue visuelle, céphalées, vertiges et contrôle postural

Il existe un ensemble de symptômes qui concerne une partie de la population active : fatigue visuelle, céphalées et vertiges (FVCV). Ces symptômes surviennent surtout chez des personnes ayant travaillé de façon prolongée devant des ordinateurs. Ces individus s'adressent, généralement, aux services d'ophtalmologie, d'orthoptie et d'ORL. L'équipe (Groupe Iris, CNRS) ayant une antenne au sein de l'Hôpital Européen Georges Pompidou (HEGP), nous avons pu étudier un certain nombre de sujets. Nos études précédentes ayant

montré l'importance de la vergence oculomotrice dans le contrôle postural, nous avons donc entrepris une étude posturographique. Nous avons comparé l'équilibre postural à différentes distances, donc avec différents angles de vergence, entre des personnes présentant cette symptomatologie et des sujets contrôles d'âge similaire (étude 5).

Les capacités de vergence anormalement faibles peuvent être améliorées par un entraînement orthoptique. La prescription de douze séances de rééducation orthoptique peut améliorer les capacités de vergence mesurées subjectivement par des tests cliniques (cover test et test de Maddox qui mesurent les phories et la barre prismatique qui évalue les amplitudes de vergence). Des études ont apporté des preuves objectives des effets bénéfiques de la rééducation orthoptique, par des enregistrements oculographiques et des analyses de la latence, de la précision et de la vitesse des vergences et des saccades (Bucci et al., 2004a; Bucci et al., 2004b). Dans notre étude, certains sujets présentant les symptômes FVCV ont été réexaminés sur le plan postural après douze séances de rééducation orthoptique.

Partie

Expérimentale

Méthodologie générale

Questionnaire général.....	62
Examen visuel clinique	62
Test de Fukuda	63
Plate-forme de posturographie	63
Vidéo oculographie	64
Cibles visuelles.....	64
Procédure.....	64
Paramètres	64
Analyses statistiques	65

Les études expérimentales ont fait l'objet de cinq articles : quatre publiés et un en cours de soumission. Les études, nommées de 1 à 5, correspondent respectivement aux articles suivants :

1 - Kapoula Z et Lê TT (2006) Effects of distance and gaze position on postural stability in young and old subjects. *Experimental Brain Research*. 173:438-445. doi:10.1007/s00221-006-0382-1.

2 - Lê TT et Kapoula Z (2006) Distance impairs postural stability only under binocular viewing. *Vision Research*. 46: 3586-3593. doi:10.1016/j.visres.2006.06.018.

3 - Lê TT et Kapoula Z (2008) Role of ocular convergence in the Romberg quotient. *Gait and Posture*. 27:493-500. doi:10.1016/j.gaitpost.2007.06.003.

4 - Rey F, Lê TT, Bertin R et Kapoula Z (2007) Saccades horizontal or vertical at near or at far do not deteriorate postural control. *Auris Nasus Larynx*. doi:10.1016/j.anl.2007.07.001.

5 - Lê TT, Berbey N, Orssaud C et Kapoula Z. (2007) Postural stability in subjects with visual fatigue, headaches and vertigo symptoms (soumis).

Lors de la deuxième année de doctorat, j'ai participé à la réalisation, à l'analyse ainsi qu'à la rédaction d'un travail expérimental mené par un autre doctorant de l'équipe. Cette collaboration a donné lieu à une publication :

Matheron E, Lê TT, Yang Q, Kapoula Z. (2007) Effects of two diopter vertical prism on posture. *Neuroscience Letters* 423: 236-240.

L'étude 1 a fait l'objet d'un chapitre en français pour le grand public (i.e. Journal Français d'Orthoptique) ainsi que les études 2 et 3 dans l'ouvrage « Posture et Équilibre ».

Dans la section suivante, sera décrite la méthodologie générale commune aux cinq études, suivie d'une présentation détaillée de chaque étude.

Méthodologie générale

Questionnaire général

Pour tous les sujets, jeunes et âgés, un questionnaire a été réalisé afin d'exclure les sujets qui présentaient des fractures des membres inférieurs, une entorse de la cheville datant de moins de trois mois, des pathologies pouvant influencer le système vestibulaire (otites fréquentes par exemple) et des problèmes de dentition (plus de trois dents manquantes ou importante déviation des dents). Enfin, les sujets ne consommaient pas plus d'un verre d'alcool par jour et aucuns ne suivaient de traitements médicaux incluant des neuroleptiques.

Examen visuel clinique

La vision a été examinée au préalable. L'examen comportait la mesure de l'acuité visuelle en distance lointaine (5 mètres) et proche (33 cm avec le test de Parinaud), et de la stéréoacuité (avec le test des pions de Wirt). Tous les sujets ont présenté une acuité visuelle d'au moins huit dixièmes pour chaque œil (sauf pour deux sujets âgés de 55 à 71 ans des études 1, 2 et 3) et une stéréoacuité normale avec un seuil inférieur ou égal à 60 sec d'arc (sauf pour quatre sujets âgés de 55 à 71 ans des études 1, 2 et 3 dont la stéréoacuité était entre 100 et 60 sec d'arc). Pour des personnes de cet âge, une stéréoacuité de 100 sec d'arc reste dans les normes (von Noorden, 1996).

La phorie correspond au désalignement latent des axes visuels, compensé par un effort oculomoteur lors de la vision binoculaire. Nous avons déterminé la phorie horizontale des sujets avec le test d'occlusion alternée d'un œil (cover test), en distance lointaine et en distance proche. La présence de phories est manifestée par la direction et l'ampleur du mouvement de l'œil rattrapant la fixation au moment où du retrait du cache. La plupart des sujets étaient exophoriques (déviation vers l'extérieur de l'axe visuel) et tous avaient une phorie en dessous de 3 dioptries prismatiques (Δ). L'exophorie est la forme la plus fréquente de phorie horizontale (von Noorden 1996).

Nous avons mesuré la capacité des sujets à effectuer des mouvements de vergence oculaire suivant deux tests : le point proximal de convergence (PPC) et les amplitudes de vergences (mesurées avec la barre prismatique). Le PPC détermine la distance la plus proche à laquelle le sujet continue à fusionner l'image visuelle. Tous les sujets présentaient un PPC en dessous de 10 cm à l'exception de trois sujets âgés de 55 à 71 ans (PPC entre 11 et 13 cm). L'ensemble de ces valeurs est dans la normalité (voir l'ouvrage de von Noorden, 1996). La distance minimale utilisée dans nos expériences étant de 20 cm, tous les sujets étaient donc capables de converger correctement à cette distance. Pour les études 1, 2, 3 et 4, tous les tests ont été réalisés par l'auteur de la thèse, ayant été formé auprès des orthoptistes. Pour l'étude 5, le bilan orthoptique a été réalisé par des orthoptistes.

Test de Fukuda

Nous avons examiné les aptitudes d'équilibration des sujets durant 40 sec de piétinement, avec les bras tendus droit devant, et les yeux fermés. Le test permet d'identifier une asymétrie de répartition du tonus postural qui serait la conséquence d'un trouble vestibulaire (Bonanni et Newton, 1998). Tous les sujets ont réalisé le test sans chuter.

Plate-forme de posturographie

La plate-forme utilisée pour nos expériences est un modèle fabriqué par le groupe TechnoConcept (Céreste, France, voir Chap. 1). L'appareil est homologué par l'Association Française de Posturologie (AFP). La plate-forme est composée de deux sabots, un pour chaque pied. Chaque sabot est composé de deux éléments : une partie avant, correspondant au métatarse et une partie arrière, correspondant au talon. La position des sabots respecte les normes de l'AFP : talons séparés de 4 cm, pieds écartés de façon symétrique par rapport à l'axe sagittal du sujet en formant un angle de 30°. L'appareil est doté d'un convertisseur analogique digital permettant d'acquérir la position du centre de pression (CdP) à une fréquence de 40 Hz. Nous avons utilisé le logiciel PostureWin pour l'acquisition des données posturographiques.

Vidéo oculographie

Dans l'étude 3, nous avons mesuré la position des yeux des sujets avec le système Chronos (Skalar, Pays-Bas). L'appareil est composé de caméras infrarouges permettant de mesurer les composantes horizontales et verticales des mouvements des yeux (Clarke et al., 2002). La fréquence d'échantillonnage était de 50 Hz, fréquence adéquate pour mesurer l'angle de la convergence en fixation. Dans l'étude 4, nous avons enregistré les saccades avec le système vidéo-oculographique EyeLink 2 (van der Geest et Frens, 2002), l'étude des saccades oculaires nécessitant une fréquence d'échantillonnage plus élevée (i.e. 250 Hz).

Cibles visuelles

Les cibles visuelles étaient placées sur un écran blanc. Il s'agissait d'une croix en forme de « x » située entre deux segments verticaux. La taille angulaire de la croix était de 1° quelque soit la distance de fixation. Dans la plupart des études, la cible était positionnée au centre, au niveau des yeux du sujet et dans son plan sagittal.

Procédure

Nous avons mesuré la posture en position orthostatique. Durant l'acquisition d'une durée de 51,2 secondes, les sujets devaient fixer la cible. Pour les études 3 et 5, une phase de calibrage de l'appareil oculographique était réalisée avant et après chaque enregistrement.

Paramètres

Nous avons analysé les paramètres posturographiques suivants : la surface des excursions du CdP, les écarts-types de ces excursions dans le plan antéropostérieur (SDy) et le plan médio-latéral (SDx), et la variance de vitesse du CdP. La surface permet d'évaluer la stabilité posturale sur le plan spatial et de manière globale. Les excursions du CdP dans les plans antéropostérieur et médio-latéral permettent d'évaluer la contribution respective des

stratégies de cheville et de hanche dans le contrôle de la posture. Quant à la variance de vitesse, elle permet d'évaluer l'activité des muscles des membres inférieurs durant le maintien de la posture.

Dans les études 3 et 5, nous avons mesuré l'angle de la convergence. Pour l'étude 5, nous avons aussi examiné l'amplitude des saccades et la fréquence des saccades correctives.

Analyses statistiques

Dans toutes les études, la normalité de la distribution des données ainsi que le grand nombre de sujets (entre 15 à 35 sujets) nous ont permis de réaliser une analyse de la variance (ANOVA). Pour l'étude 5, certaines analyses portaient sur un nombre limité de sujets par groupe (tests non paramétriques Kruskal-Wallis et de Wilcoxon ainsi que le test de Student ont été employés). Le détail des différentes analyses sera décrit ultérieurement.

Les expériences incluses dans cette thèse ont été réalisées après accord du comité local d'éthique conformément à la Déclaration de Helsinki.

Dans les chapitres suivants, chacune de ces études sera présentée de façon synthétique. Les manuscrits publiés figureront en annexe dans leur intégralité.

Etude 1 :

Effets de la distance et de la position du regard sur la stabilité posturale chez le sujet jeune et âgé

1 – Introduction	67
2 – Matériels et méthodes.....	67
3 – Résultats	68
4 – Discussion	70

Etude 1 - Effets de la distance et de la position du regard sur la stabilité posturale chez le sujet jeune et le sujet âgé.

1 - Introduction

Bles et al. (1980), Brandt et al. (1986) et Paulus et al. (1984, 1989) ont montré que la posture en vision proche est plus stable que celle en vision lointaine. Les auteurs ont attribué l'effet de la distance à la taille angulaire du glissement rétinien consécutif aux oscillations posturales : pour une oscillation posturale d'amplitude égale, la taille angulaire du glissement rétinien est plus faible en distance lointaine que celle en distance proche. Ainsi, le glissement rétinien en fixation lointaine serait détecté plus difficilement et, par conséquent, les oscillations posturales correctives seraient plus faibles (voir Chapitre 1, Fig. 9).

L'objectif de l'étude était d'évaluer le rôle de l'angle de convergence dans l'effet de la distance sur la stabilité posturale. En effet, l'angle de convergence, s'ajustant à la distance de fixation, est plus élevé en vision proche qu'en vision lointaine. Les signaux efférents oculomoteurs et les signaux afférents proprioceptifs des muscles extraoculaires pourraient influencer la stabilité posturale directement ou indirectement (Chap. 3). Le second objectif était d'examiner l'effet de la distance chez des sujets jeunes et âgés. Avec l'âge, l'acuité visuelle diminue (Ivers et al. 2004) ainsi que la sensibilité au mouvement visuel (Tran et al. 1998) et les capacités à converger (Rambold et al. 2006). Les sujets âgés pourraient donc ne pas présenter d'amélioration de la stabilité posturale en vision proche.

2 - Matériels et méthodes

a - Sujets

Dix-huit sujets âgés de plus de 55 ans (âge moyen $61,6 \pm 2,7$ ans) ainsi que dix-sept sujets âgés de 25 à 33 ans (âge moyen $25,3 \pm 2,7$ ans) ont été inclus dans l'étude.

b- Conditions expérimentales

Les sujets étaient sur la plate-forme en position orthostatique. La tâche consistait à fixer la cible placée à 40 ou à 200 cm. L'angle de convergence était respectivement de 8,6° et 1,7°. L'ordre des distances était randomisé entre les sujets.

Dans une seconde expérience, les sujets fixaient la cible au centre à 200 cm de distance selon deux conditions : fixation à travers des prismes convergents de 5 Δ sur chaque œil *versus* fixation sans les prismes. Notons que la fixation à 200 cm réduit l'influence du glissement rétinien et que la vision à travers des prismes induit une augmentation de l'angle de convergence.

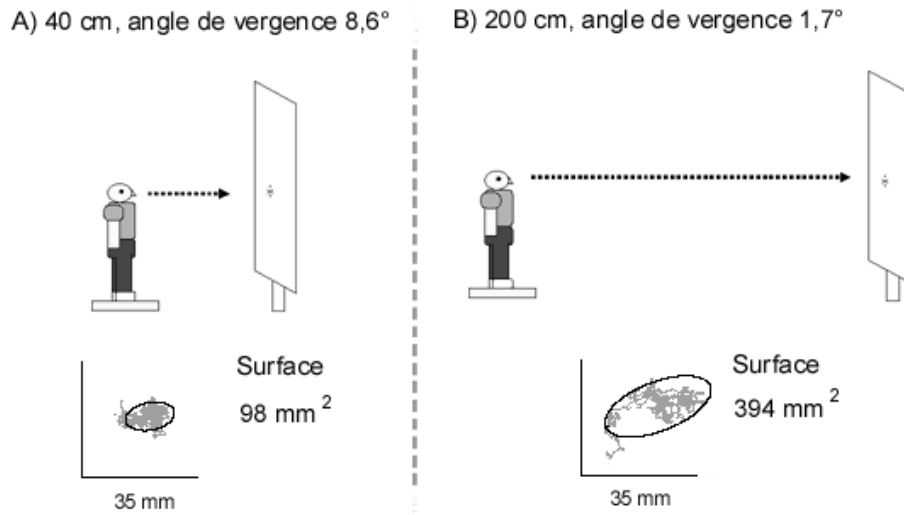
c - Analyse statistique

Pour chaque paramètre posturographique (surface, écarts-types des oscillations antéropostérieures « SDy » et médio-latérales « SDx » et variance de vitesse), une ANOVA a été réalisée. Pour la première expérience, l'ANOVA comprenait le facteur distance (40 et 200 cm) et groupe (sujets jeunes *versus* âgés). Pour la seconde expérience, l'ANOVA incluait le facteur prisme (avec ou sans) et le facteur groupe (sujets jeunes *versus* âgés). Le test *a posteriori* de Fischer (PSLD) était appliqué par comparaison deux à deux.

3 – Résultats

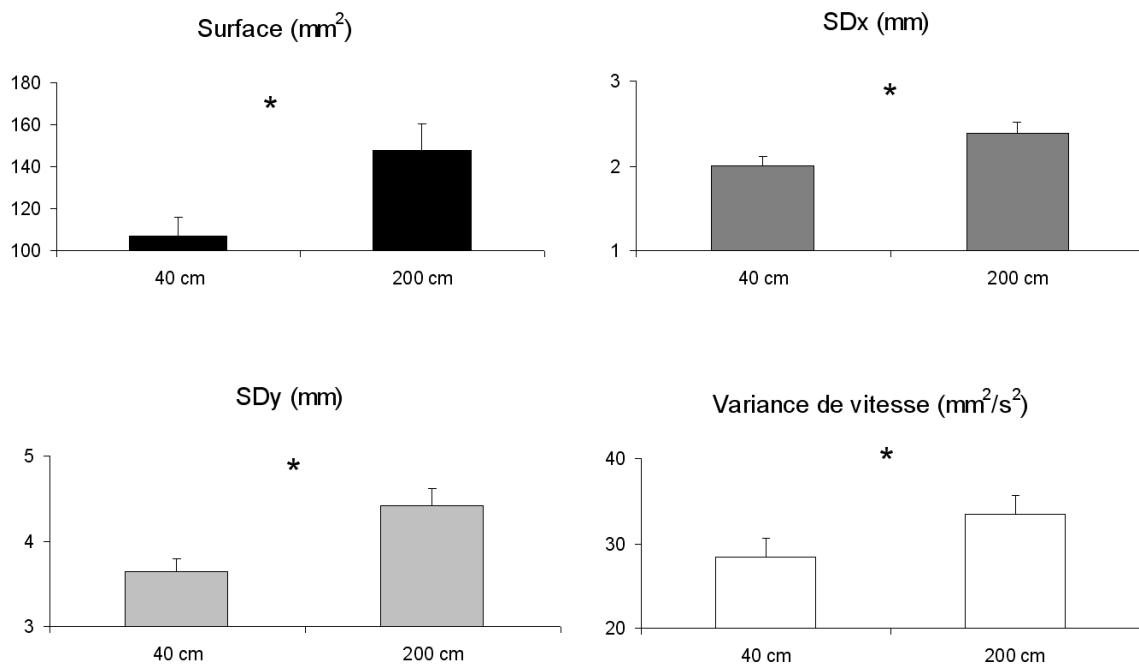
a – Effet de la distance

L'ANOVA a révélé un effet principal de la distance pour tous les sujets (jeunes ou âgés) et pour tous les paramètres : leurs valeurs moyennes étaient significativement plus faibles en fixation proche par rapport à celles en fixation lointaine (Fig. 24 et 25).



Surface du centre de pression d'un sujet âgé de 25 ans (♂) fixant à 40 cm (8,6° d'angle de la vergence, Fig. A) et à 200 cm (1,7° d'angle de la vergence, Fig. B). En vision lointaine, la surface des oscillations du sujet a augmenté.

Figure 24



Surface, écarts-types des oscillations dans le plan antéropostérieur (SDy) et médio-latéral (SDx) et variance de vitesse du centre de pression à 40 et à 200 cm de distance. Tous les paramètres ont augmenté significativement avec la distance (astérisques).

Figure 25

b – Rôle de la convergence (prisme)

L'ANOVA a montré un effet principal des prismes pour tous les sujets (jeunes ou âgés) : les valeurs moyennes de la surface du CdP, du SDx et du SDy en condition prisme ont diminué significativement par rapport à celle en condition sans prisme (Fig. 26 et 27).

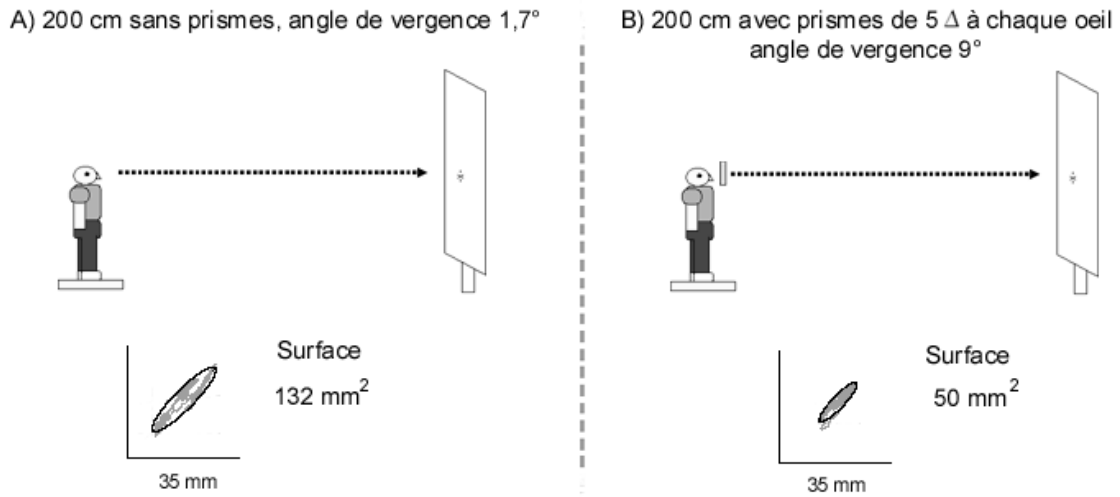
c- Effets du vieillissement

L'ANOVA a montré un effet principal de l'âge aussi bien pour l'expérience 1 traitant l'aspect distance que pour l'expérience 2 traitant l'effet des prismes : les sujets âgés de 55 à 71 ans ont présenté une variance de vitesse significativement plus grande par rapport à la variance des sujets âgés de 25 à 33 ans.

4 – Discussion

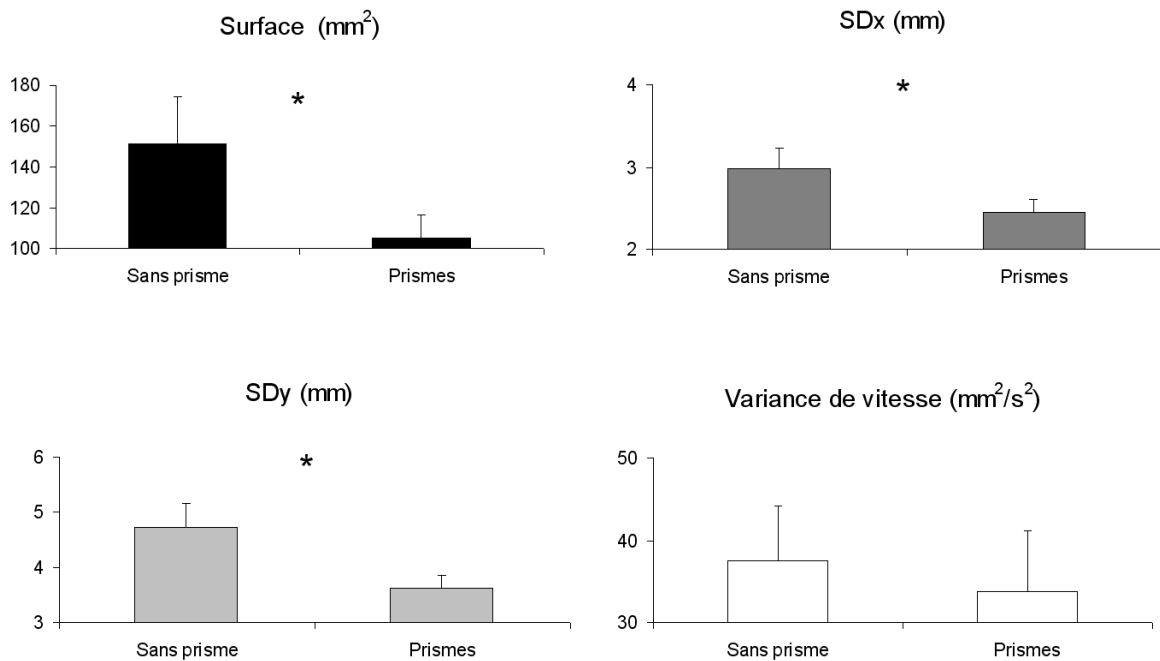
a – Effet de distance, rôle de l'angle de convergence

La première expérience a montré une amélioration de la stabilité posturale, pour tous les paramètres et pour tous les sujets, en vision proche par rapport à la vision lointaine. Cette amélioration pourrait être attribuée à la taille angulaire plus élevée des signaux visuels (Brandt et al. 1999). Néanmoins, avec la distance, la vergence change également et elle pourrait aussi y contribuer. L'expérience avec les prismes convergents a apporté des arguments en faveur du rôle de la vergence. En effet, le port des prismes en fixation à 200 cm a augmenté l'angle de convergence des sujets à une valeur proche de celle en fixation naturelle à 40 cm (i.e. $\approx 9^\circ$). Bien que nous n'ayons pas enregistré les mouvements des yeux et l'angle de la vergence dans cette expérience, le fait que les sujets ne voyaient pas double suggère que l'angle de leur vergence a été modifié à la valeur appropriée d'environ 9° . En vision avec les prismes, les sujets jeunes et âgés ont présenté une meilleure stabilité posturale qu'en condition sans prisme. Cette amélioration ne peut pas être expliquée par la taille du glissement rétinien car la distance physique de fixation était de 200 cm dans les deux conditions.



Surface du centre de pression d'un sujet de 24 ans (♀) fixant à 200 cm sans les prismes (1,7°, Fig. A) et avec les prismes convergents de 5 dioptries à chaque oeil (Fig. B). L'angle requis pour fusionner la cible visuelle est de 9°.

Figure 26



Surface, écarts-types des oscillations dans le plan antéropostérieur (SDy) et médio-latéral (SDx) et variance de vitesse du centre de pression en vision à 200 cm de distance avec ou sans les prismes convergents. La surface, les SDx et les SDy ont diminué significativement dans la condition prisme (astérisques).

Figure 27

Ainsi, seule l'augmentation de l'angle de convergence induite par les prismes peut rendre compte de cette amélioration de la posture. Nous pouvons ainsi conclure que l'effet de la distance, en général, pourrait aussi être dû à la valeur de l'angle de convergence. Autrement dit, la distance agit aussi bien sur les propriétés des signaux visuels que des signaux oculomoteurs ; les deux pouvant influencer la qualité de la stabilité posturale.

Les mécanismes par lesquels l'angle de la convergence serait impliqué dans l'amélioration de la stabilité seraient l'intégration des signaux efférents oculomoteurs et afférents proprioceptifs par le système postural. Les études citées dans l'Introduction (Chapitre 3) suggèrent que les signaux oculomoteurs auraient une influence sur le contrôle postural via le couplage entre l'activité oculomotrice et celle des muscles du cou (Lestienne et al. 1984; André-Deshays et al. 1988, 1991; Corneil et al. 2004). Par ailleurs, Han et Lennerstrand (1998) ont montré que la vibration des muscles de la nuque accélérât la vergence accommodative. Le rôle des signaux oculomoteurs semble être confirmé par les résultats concernant l'effet de la position du regard (droit devant, élévation et abaissement du regard en fixation à 40 et à 200 cm) étudié dans la même étude. En distance proche, la posture était aussi stable quelque soit la position du regard. En distance lointaine, le regard excentré vers le haut ou vers le bas a amélioré la stabilité posturale par rapport à la position droit devant. L'élévation du regard implique une contraction du droit supérieur et de l'oblique inférieur et l'abaissement du regard implique la contraction du droit inférieur et de l'oblique supérieur. Notons également que l'excentration verticale du regard implique aussi une vergence : l'élévation est généralement associée à une divergence et l'abaissement à une convergence. Concernant la fixation droit devant, elle entraîne un relâchement de ces muscles. Il est possible que les signaux efférents et proprioceptifs issus de ces muscles apportent une source d'information utile dans l'amélioration de la stabilité posturale. Ainsi, de manière similaire à l'effet de la distance, l'amélioration de la posture par élévation ou abaissement du regard pourrait être attribuée aux signaux efférents et/ou proprioceptifs issus des muscles extraoculaires.

Les mécanismes attentionnels pourraient aussi expliquer l'implication de la convergence dans l'effet de la distance. En effet, la convergence en vision proximale nécessite un effort attentionnel. Deux études en électrophysiologie ont montré que l'activité des potentiels évoqués était plus élevée durant la préparation de la vergence oculaire que durant la préparation de la saccade (Kapoula et al., 2002; Tzelepi et al., 2004). De plus, les auteurs ont montré que cette activité était plus forte avant la convergence oculaire qu'avant la divergence.

b – Effet de l'âge

L'effet de la distance (i.e. amélioration de la stabilité en vision proche) a été observé pour les deux groupes de sujets. Ainsi, contrairement à ce qui était attendu, la diminution de certaines fonctions visuelles (l'acuité visuelle, voir Ivers et al. 2004 ; la sensibilité aux mouvements, voir Tran et al. 1998) et oculomotrices (la convergence, voir Rambold et al. 2006) chez la personne plus âgée n'interfère pas sur l'effet de la distance. La préservation de cet effet chez le sujet âgé pourrait être due à leur capacité de converger à 40 cm. En effet, au test du PPC, les sujets âgés convergeaient sans vision double entre 6 à 14 cm ; distances inférieures à la distance minimale utilisée dans nos expériences (40 cm). De nouvelles études avec des angles de convergence plus élevés (e.g. en fixant à 10 cm) auraient un intérêt pour tester la fragilité éventuelle de la personne âgée.

Bien que les sujets âgés aient présenté des valeurs moyennes de la surface du CdP, du SDx et du SDy proches de celles des sujets jeunes, leur variance de vitesse du CdP était significativement plus élevée. L'augmentation spécifique à la variance de vitesse suggère que les sujets âgés solliciteraient davantage que les sujets jeunes leurs muscles des membres inférieurs pour maintenir leur posture stable. D'ailleurs, Wang et al. (2006) ont observé une corrélation entre l'augmentation de l'activité des membres inférieurs et le taux de changement de position du centre de pression induisant une vitesse importante du centre. Cette interprétation est en accord avec les résultats des travaux d'Amiridis et al. (2003) et Jonsson et al. (2005) qui ont observé une activité plus élevée des muscles *anterior tibialis* et gastrocnémien chez les sujets âgés par rapport aux sujets jeunes. Enfin, nos données contrastent avec les résultats issus d'autres travaux (Doyle et al., 2004; Aufauvre et al., 2005) qui ont observé une augmentation de la surface chez les sujets âgés, dont l'âge moyen était supérieur (≈ 70 ans) à celui de notre groupe de sujets âgés (61,6 ans). Ainsi, nous pouvons conclure que la variance de vitesse est un paramètre sensible aux effets de l'âge sur la posture chez les sexagénaires.

En résumé, nous avons examiné les mécanismes pouvant sous-tendre l'effet de la distance sur la posture. Notre étude nous a permis de mettre en évidence le rôle de l'angle de convergence. Cette influence se baserait sur les signaux extraoculaires efférents (commandes oculomotrices) et afférents (proprioception). Par ailleurs, le rôle de ces signaux dans le contrôle postural peut être envisagé de manière générale (effet de la position du regard). En outre, il est possible que le rôle de la convergence dans l'effet de la distance implique aussi

des processus attentionnels. Avec l'âge, l'influence de ces signaux semble préservée. Cependant à la soixantaine, il existerait des premiers signes d'instabilité posturale en termes d'élévation de l'activité des muscles des membres inférieurs détectée en posturographie par la variance de vitesse.

Valorisation

Cette étude a été publiée dans la revue *Experimental Brain Research* (Kapoula et Le, 2006, voir article 1 en annexe). L'étude a aussi fait l'objet d'un chapitre dans la revue grand public *Journal Français d'Orthoptique* (Kapoula et al., 2006)

Etude 2 :

La distance détériore la stabilité posturale seulement en vision binoculaire

1 – Introduction	76
2 – Matériels et méthodes.....	76
3 – Résultats	77
4 – Discussion	79

Etude 2 - La distance détériore la stabilité posturale seulement en vision binoculaire.

1 – Introduction

L'effet de la vision binoculaire *versus* monoculaire sur la stabilité posturale diffère selon les études : Fox (1990) a observé une amélioration de la stabilité posturale en vision binoculaire alors qu'Isotalo et collaborateurs (2004) n'ont rapporté le même effet que chez un sujet sur deux. Notons que la distance de fixation était différente entre les deux travaux (145 cm dans Fox 1990 et 90 cm dans Isotalo et al. 2004). Notre objectif était de réexaminer le contrôle postural en vision binoculaire *versus* monoculaire chez des sujets jeunes et âgés selon deux distances : 40 cm *versus* 200 cm. Isotalo et al. (2004) ont rapporté une absence de différence sur la stabilité posturale entre la fixation avec l'œil directeur ouvert *versus* l'œil non directeur ouvert avec une distance de 90 cm. L'autre objectif de cette étude était de réexaminer l'influence de l'œil directeur *versus* l'œil non directeur à 40 et 200 cm sur la posture de sujets jeunes et âgés.

2 – Matériels et méthodes

a - Sujets

Nous avons recruté 14 sujets âgés de 55 à 71 ans (âge moyen $61,4 \pm 4,6$ ans) et 16 sujets âgés de 25 à 33 ans (âge moyen $25,7 \pm 2,7$ ans). Tous les sujets avaient pour œil directeur l'œil droit.

b – Conditions expérimentales

Les sujets fixaient une cible selon trois conditions : en vision binoculaire (VB) ou monoculaire avec l'œil directeur ou l'œil non directeur ouvert (OD et OND respectivement).

Les trois conditions étaient réalisées à deux distances de fixation : 40 et 200 cm correspondant à des angles de convergence respectifs de $8,6^\circ$ et $1,7^\circ$ (voir Fig. 28). Les deux distances étaient randomisées entre les sujets et, pour chaque distance, les trois conditions de vision (VB, OD, OND) étaient randomisées.

c – Analyse statistique

Une ANOVA était effectuée pour chacun des paramètres posturographiques (surface, SDx, SDy et variance de vitesse). L'ANOVA comprenait le facteur condition de vision (VB, OD, OND), la distance (40 et 200 cm) ainsi que le groupe d'âge (sujets âgés de 55 à 71 ans *versus* de 25 à 33 ans). Concernant l'analyse *a posteriori*, nous avons utilisé le test de Scheffé.

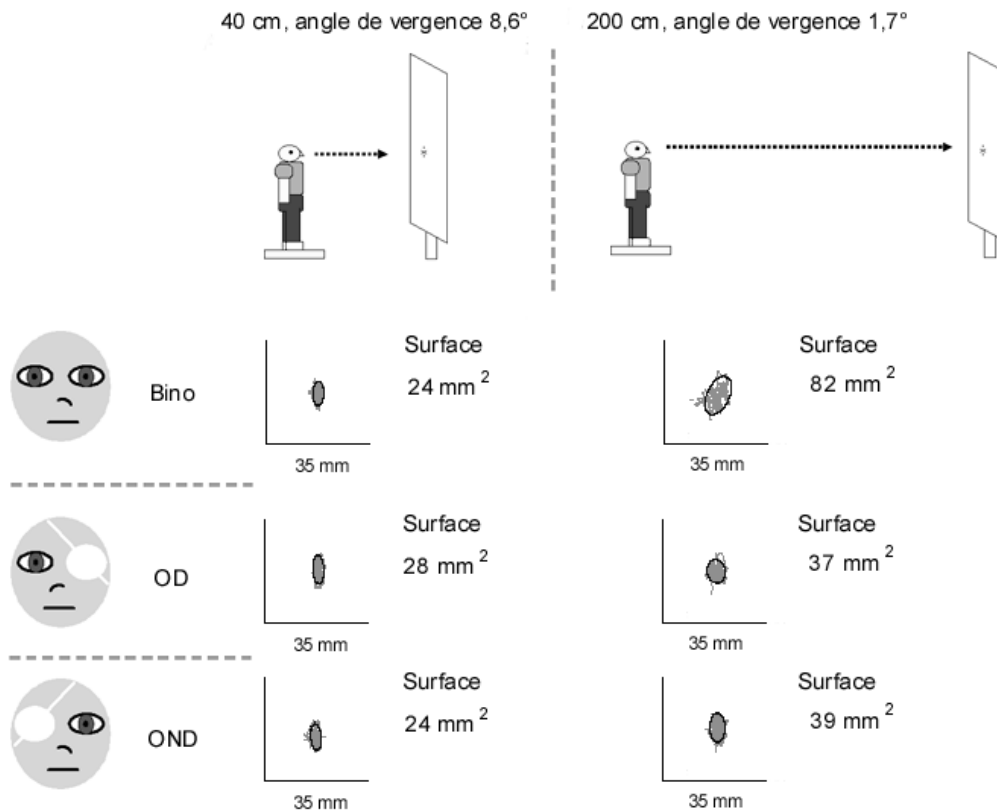
3 – Résultats

a – Effet de l'âge avec la distance

L'ANOVA a montré une interaction significative entre le groupe d'âge et la distance. Les sujets de plus de 55 ans ont présenté significativement une plus grande variance de vitesse par rapport aux sujets plus jeunes ; et ceci, particulièrement en distance lointaine.

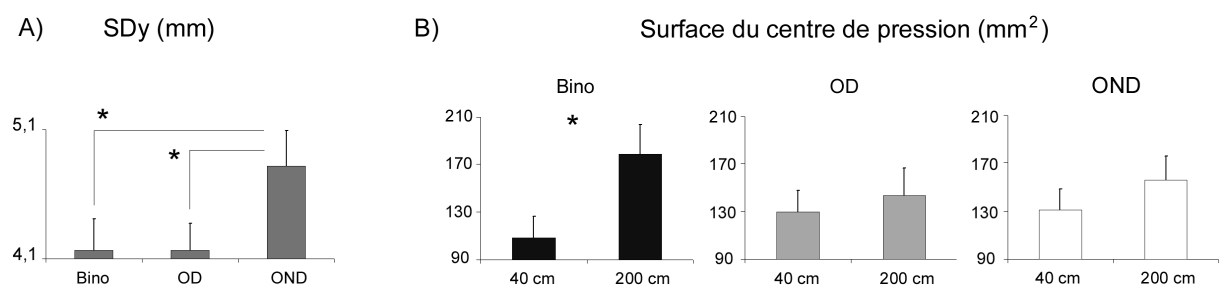
b – Effet principal de la distance et de la condition de vision et interaction

Comme pour la première étude, l'ANOVA a révélé un effet principal de la distance pour les deux groupes de sujets : la surface, les SDy et la variance de vitesse étaient significativement plus importants à 200 cm de distance qu'à 40 cm. L'ANOVA a montré un autre résultat plus important : le facteur condition de vision était significatif pour les SDy. En effet, la valeur moyenne des SDy était significativement plus faible en vision binoculaire ou avec l'oeil directeur ouvert en comparaison avec l'oeil non directeur ouvert (Fig. 29A). Enfin, l'interaction entre la distance et la condition de vision était significative pour la surface du CdP : l'effet de distance (i.e. augmentation de la surface en distance lointaine) a été observé autant en condition VB, OD et OND (Fig. 28). Cependant, l'effet était significatif uniquement en vision binoculaire (Fig. 29B).



Surface du CdP d'un sujet de 59 ans (♀) en vision binoculaire (Bino) et en vision monoculaire avec l'œil directeur (OD) ou l'œil non directeur (OND) fixant une cible soit à 40 cm (8,6° d'angle de vergence) soit à 200 cm (1,7°). La surface du CdP a augmenté avec la distance, particulièrement, en vision binoculaire.

Figure 28



(A) Moyennes des écarts-types des oscillations antéropostérieures (SDy) en condition vision binoculaire (Bino), œil directeur (OD) ou non directeur (OND) ouvert. Les SDy sont significativement plus faibles en Bino et OD par rapport à OND (astérisques). (B) Moyennes de la surface du centre de pression en condition Bino, OD et OND à 40 ou à 200 cm de distance. L'effet de la distance (augmentation de la surface à 200 cm) est significatif seulement en vision binoculaire (astérisque).

Figure 29

4 – Discussion

a - Effet de l'âge

Les sujets âgés de 55 à 71 ans ont présenté une plus grande variance de vitesse par rapport aux sujets plus jeunes, particulièrement en distance lointaine. Le résultat reste très similaire de celui obtenu dans la première étude (Kapoula et Le, 2006) ; nous l'attribuons à une activité plus élevée des muscles des membres inférieurs chez les sujets âgés que chez les sujets jeunes.

b – Effet principal de la distance et de la condition de vision

Nous avons obtenu l'effet classique de la distance (i.e. amélioration de la stabilité posturale en vision proche) ce qui est en accord avec les études antérieures (Bles et al. 1980; Paulus et al. 1984; Brandt et al. 1986; Paulus et al. 1989; Kapoula et Lê 2006).

Le résultat majeur est l'effet principal de la condition de vision : les oscillations antéropostérieures étaient significativement plus faibles en vision binoculaire ou avec l'œil directeur ouvert par rapport à la condition œil non directeur ouvert. Ainsi, il semblerait que le contrôle des oscillations antéropostérieures soit meilleur avec l'OD ouvert, que ce soit en vision monoculaire ou binoculaire. Quels sont les mécanismes par lesquels l'œil directeur exerce un tel contrôle ? Les oscillations antéropostérieures induisent une modification de la taille angulaire de l'image perçue par le sujet alors que les oscillations dans le plan médio-latéral entraînent un déplacement de l'image dans le même plan fronto-parallèle. Le contrôle des oscillations dans le plan antéropostérieur implique une stratégie de cheville alors que le contrôle des oscillations médio-latérales implique une stratégie de hanche. Il est possible que l'œil directeur soit plus sensible aux changements de la taille angulaire de l'image rétinienne par rapport à l'œil non directeur ; permettant un meilleur contrôle, par les chevilles, des oscillations antéropostérieures. Une étude, chez le singe, a montré que la détection du mouvement visuel latéral était asymétrique entre les deux yeux : un œil détectait mieux le mouvement latéral que l'autre œil (Fu et Boothe, 2001). Cependant les auteurs de cette étude n'ont pas déterminé l'œil directeur de leurs animaux. Il est possible qu'une telle asymétrie existe dans la détection des mouvements visuels en profondeur et qu'elle ait un lien avec la

dominance oculaire. Cependant, il n'existe pas à, notre connaissance, de travaux ayant examiné cette hypothèse.

c – Effet de la distance en vision binoculaire seulement

L'interaction entre la distance et la condition de vision montre que la stabilité en vision binoculaire se détériore avec la distance alors qu'en vision monoculaire, la stabilité varie peu avec la distance (Fig. 29). Les mécanismes qui sous-tendent ces résultats peuvent être multiples : l'angle de vergence, la sensibilité aux mouvements visuels et les mécanismes cognitifs comme les processus attentionnels.

La convergence

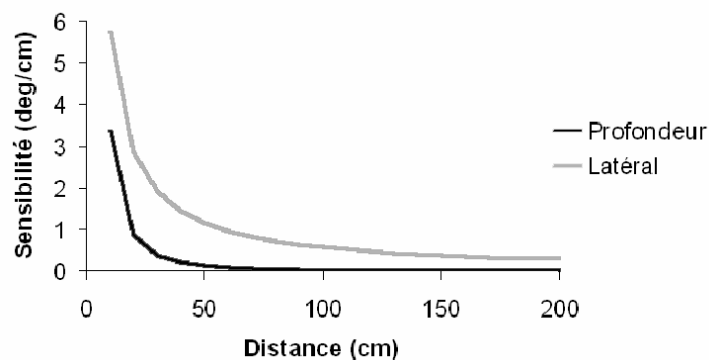
L'effet de la distance en vision binoculaire peut être dû à la valeur de l'angle de convergence : en vision proche, l'angle est élevé alors qu'en vision lointaine, l'angle est faible. Cette différence d'angle entre les deux distances pourrait expliquer l'effet de la distance en vision binoculaire. En vision monoculaire, la différence d'angle de vergence entre la distance proche et lointaine pourrait être plus faible que celle en vision binoculaire, expliquant ainsi l'absence d'effet significatif de la distance en vision monoculaire.

Sensibilité aux mouvements visuels en profondeur basée sur la disparité binoculaire

Les oscillations antéropostérieures entraînent un mouvement visuel en profondeur qui modifie la disparité. Cette modification est détectée uniquement en vision binoculaire. La sensibilité à la modification de la disparité binoculaire décroît très rapidement avec la distance (Fig. 30). Les oscillations latérales du corps produisent un mouvement visuel en latéralité qui se détecte aussi bien en vision binoculaire que monoculaire. Comme pour la sensibilité au mouvement visuel en profondeur, celle au mouvement visuel en latéralité diminue avec la distance. Cependant, cette baisse est moins importante par rapport à celle de la sensibilité au mouvement visuel en profondeur, basée sur la modification de la disparité binoculaire (Fig. 30).

Mécanismes cognitifs attentionnels

Une étude a montré que l'exécution d'une seconde tâche avec le maintien de la posture, telle que la discrimination visuo-spatiale, la catégorisation des mots ou la génération de nombres aléatoire, a entraîné une diminution de la surface du centre de pression (Dault et al., 2001). Les auteurs ont suggéré que cette amélioration liée à la seconde tâche impliquerait davantage des mécanismes attentionnels ainsi que la mémoire de travail. Dans notre étude, en condition « vision lointaine et monoculaire », l'entrée visuelle liée à l'œil couvert était interrompue et les signaux visuels (glissement rétinien) ont diminué avec la distance. Les sujets pourraient ainsi mettre en place un autre mode de contrôle des oscillations posturales basé sur les mécanismes attentionnels. Dans ce mode de contrôle, les oscillations seraient plus serrées et la posture plus rigide.



Sensibilité au mouvement en profondeur basée sur la disparité binoculaire et au mouvement visuel en latéralité en fonction de la distance.

Figure 30

En résumé, cette étude montre que les oscillations antéropostérieures sont mieux contrôlées lorsque l'œil directeur est ouvert (en vision binoculaire et monoculaire) en comparaison avec l'œil non directeur ouvert. En vision binoculaire, la stabilité posturale se détériore avec l'augmentation de la distance alors qu'en vision monoculaire, la stabilité reste bonne quelque soit la distance. Ces effets inattendus sont contre l'idée d'un bénéfice général de la vision binoculaire pour une meilleure stabilisation posturale. Nous proposons donc trois interprétations possibles pouvant, par ailleurs, être complémentaires : l'angle de la vergence,

la sensibilité au mouvement visuel consécutif aux oscillations posturales et les processus attentionnels.

Valorisation

Cette étude a fait l'objet d'un article dans la revue *Vision Research* (Le et Kapoula, 2006, voir article 2 en annexe) et d'un chapitre dans l'ouvrage *Posture et Équilibre* (Lê et Kapoula, 2007).

Etude 3 :

Rôle de la convergence oculaire dans le quotient de Romberg

1 – Introduction	84
2 – Matériels et Méthodes	85
3 – Résultats	86
4 – Discussion	90

Etude 3 - Rôle de la convergence oculaire dans le quotient de Romberg

1 – Introduction

La vision joue un rôle majeur dans le contrôle postural. En effet, le test de Romberg montre, en général, une posture plus stable en condition yeux ouverts qu'en condition yeux fermés. Le quotient de Romberg (QR) de la surface du CdP, correspondant au ratio yeux fermés / yeux ouverts, est de l'ordre de 2,5 selon les normes 85 de l'AFP (Gagey et Weber 1999).

Nous avons calculé le quotient de Romberg chez des groupes de sujets sains, jeunes et âgés, d'une quinzaine d'études. Pour six études, le QR était égal ou supérieur à la valeur de 2,5 (Bles et al., 1980; Paulus et al., 1984; Brandt et al., 1986; Paulus et al., 1989; Gagey et Weber, 1999; Bosek et al., 2005) alors que pour les neuf autres, la valeur était plus faible (Blaszczyk et al., 2000; Gerr et al., 2000; Corriveau et al., 2001; Corriveau et al., 2004b; Doyle et al., 2004; Lafond et al., 2004; Nagahori et al., 2004; Ouaknine et al., 2004; Bryant et al., 2005). L'angle de la vergence, dont nous avons montré son influence sur la posture (Kapoula et Lê 2006), différait entre ces études. Par exemple, l'angle était de 3,4° dans l'étude de Bles et al. (1980) alors qu'il était de 1,4° dans l'étude de Gerr et al. (2000).

L'objectif de l'étude était de réexaminer le test de Romberg en prenant en compte l'angle de la vergence. Dans une première expérience, le test de Romberg a été réalisé chez des sujets jeunes et âgés, à 40 et 200 cm, correspondant à un angle de convergence respectif de 8,6° et 1,7°. Dans une seconde expérience, nous avons examiné seulement des sujets jeunes qui ont effectué le même test (yeux ouverts dans une pièce normalement éclairée et dans le noir) à 20, 40, 90, 200 et 350 cm, correspondant respectivement à un angle de vergence de 17° ; 8,6° ; 3,8° ; 1,7° et 1°. Durant l'expérience 2, les acquisitions posturographiques ont été couplées avec les enregistrements oculographiques afin de mesurer l'angle de la convergence.

2 – Matériels et Méthodes

a - Sujets

Dix-huit sujets âgés de 25 à 33 ans (âge moyen $25,3 \pm 2,7$ ans) et dix-sept sujets âgés de plus de 55 ans (âge moyen $61,6 \pm 2,7$ ans) ont été inclus dans l'expérience 1. Quinze sujets âgés de 20 à 41 ans (âge moyen $26,7 \pm 5,5$ ans) ont été recrutés pour l'expérience 2.

b – Conditions expérimentales

Les sujets étaient debout sur la plate-forme avec, pour la seconde expérience, le vidéo-oculographe placé sur la tête (Fig. 31). Durant la première expérience, les sujets ont réalisé quatre conditions : yeux ouverts fixant une cible placée à 40 et à 200 cm, et yeux fermés après avoir fixé, au préalable, la cible située à 40 et à 200 cm. Dans l'expérience 2, les sujets ont effectué dix conditions : yeux ouverts dans une pièce éclairée ou dans le noir fixant une cible placée à 20, 40, 90, 200 et 350 cm. La fixation avec les yeux ouverts dans la lumière ou dans le noir permettait d'enregistrer l'angle de vergence avec l'appareil vidéo-oculographique. Un calibrage était réalisé avant et après la mesure posturographique, durant lequel, le sujet fixait une cible au centre et à différentes excentricités (i.e. à gauche, à droite, en haut ou en bas).

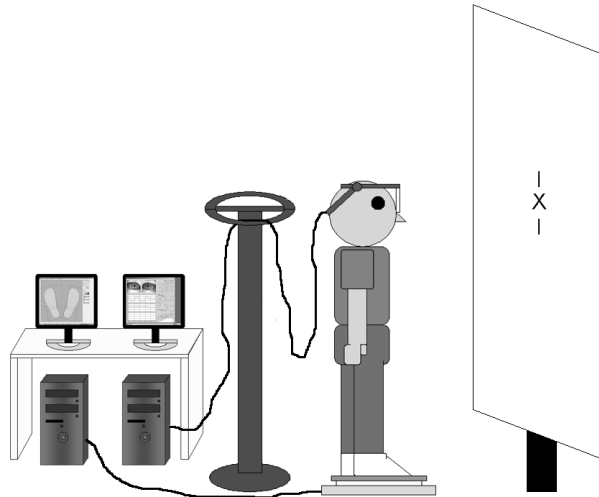
c – Paramètres

Comme pour les autres études, les paramètres posturographiques analysés étaient la surface du CdP, les SDx, les SDy et la variance de vitesse. Pour chaque paramètre, nous avons déterminé le quotient de Romberg (yeux fermés / yeux ouverts). Dans l'expérience 2, l'angle de vergence moyen a été calculé pour chaque distance (20, 40, 90, 200 et 350 cm) et chaque condition (lumière et noir). Ainsi, pour chaque distance, nous avons calculé la différence de l'angle de convergence (lumière - noir).

d – Analyses statistiques

Pour l'expérience 1, une ANOVA a été effectuée sur les quotients de Romberg. L'analyse comportait les facteurs distance (40 et 200 cm) et groupes d'âge (25-33 ans *versus*

55-71 ans). Pour l'expérience 2, une ANOVA a été réalisée sur les QRs (noir / lumière) avec pour facteur la distance (20, 40, 90, 200 et 350 cm). Une ANOVA a été réalisée sur l'angle de vergence. L'analyse comprenait les facteurs distance (20, 40, 90, 200 et 350 cm) et condition (lumière *versus* noir). Une analyse de la co-variance (ANCOVA) a été effectuée. Elle comportait le facteur distance (20, 40, 90, 200 et 350 cm), le co-variant différence de l'angle de vergence (lumière – noir) et la variable dépendante quotient de Romberg.



Le sujet est debout sur la plate-forme avec le vidéo-oculographe placé sur la tête. Le poids du vidéo-oculographe est allégé avec la fixation du câble de l'appareil sur une barre verticale. Le sujet fixe une cible au centre et au niveau du regard.

Figure 31 : Dispositif expérimental

3 – Résultats

Expérience 1

Effet de l'âge sur le quotient de Romberg

Les sujets âgés de 55 à 71 ans ont présenté une variance de vitesse plus élevée que les sujets âgés de 25 à 33 ans aussi bien en condition yeux ouverts que yeux fermés. Cependant, l'ANOVA, appliquée sur les quotients de Romberg de la variance de vitesse, n'a pas révélé

d'effet significatif de l'âge : la variance était élevée quelque soit la condition (yeux ouverts, yeux fermés) chez les sujets âgés.

Effet de la distance sur le quotient de Romberg

La Figure 32 représente les surfaces du CdP d'un sujet en condition yeux ouverts et yeux fermés à 40 et 200 cm. A 40 cm, sa surface était plus faible en condition yeux ouverts que yeux fermés. Le quotient de Romberg du sujet était donc supérieur à 1 à 40 cm. A 200 cm, sa surface était similaire entre la condition yeux ouverts et la condition yeux fermés. Son QR était donc proche de 1. L'effet de la distance sur le QR était confirmé par l'ANOVA : le facteur distance était significatif sur le QR de la surface du CdP, les SDx et les SDy. Les quotients de ces paramètres étaient significativement supérieurs à 40 cm qu'à 200 cm (Fig. 33).

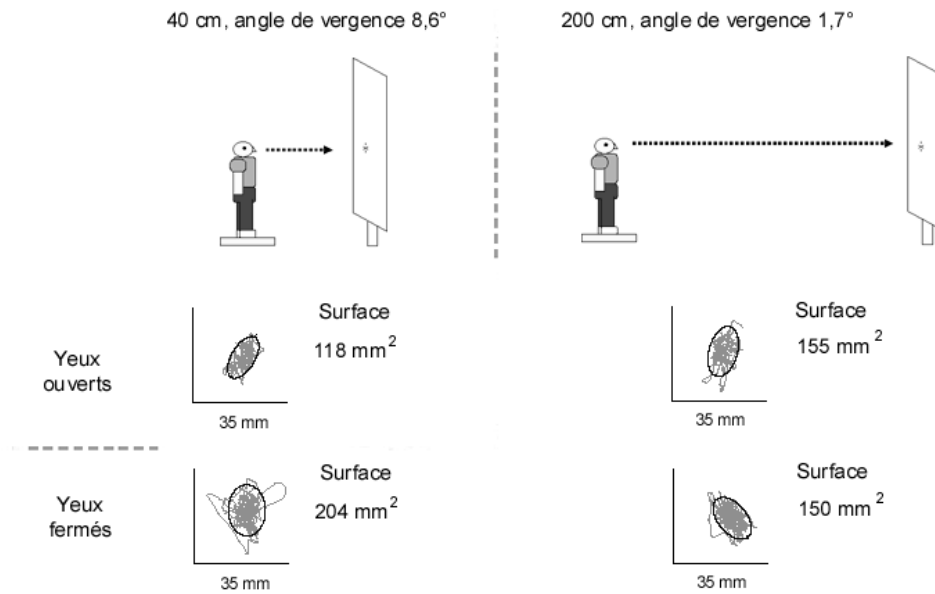
Expérience 2

Effet de la distance sur le quotient de Romberg

Comme pour l'expérience 1, l'effet de la distance était significatif sur le quotient de Romberg pour tous les paramètres. Les quotients de Romberg étaient plus élevés pour les distances proches (i.e. 20 et 40 cm) que pour les distances lointaines (i.e. 90, 200 et 350 cm).

Interaction distance et condition sur l'angle de la convergence

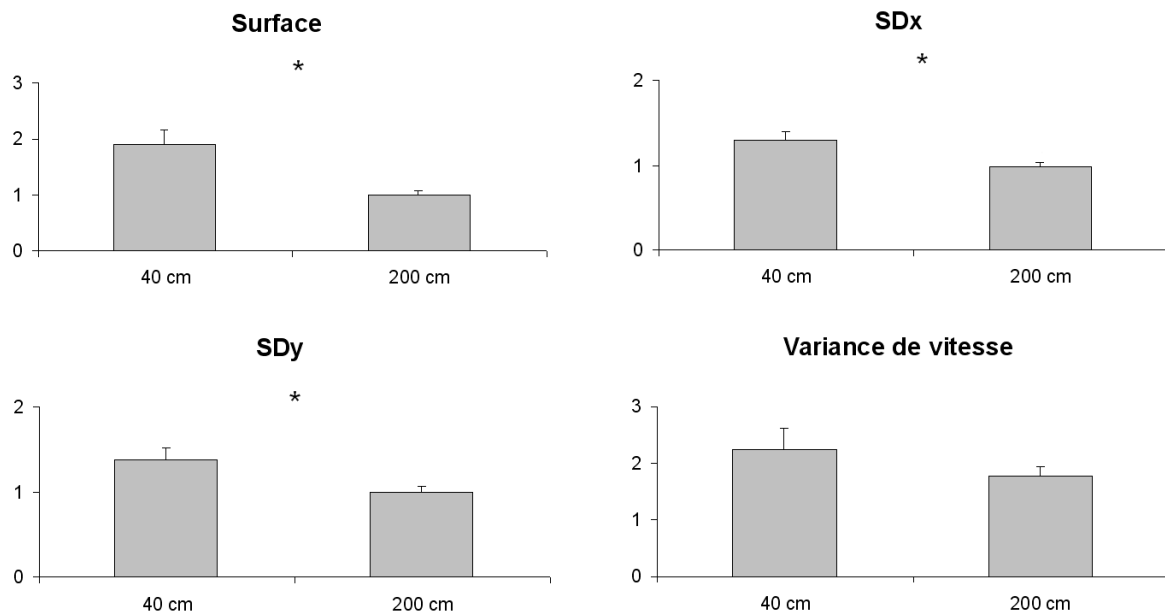
L'ANOVA appliquée sur l'angle de convergence a révélé une interaction significative entre la distance et la condition (lumière et noir). Pour les distances de 20 et 40 cm, l'angle était significativement plus élevé en condition « lumière » qu'en condition « noir » (17° versus $8,4^\circ$ et $8,4^\circ$ versus $4,4^\circ$ respectivement, voir Fig. 34A). Au contraire, pour les distances intermédiaires et lointaines (supérieures ou égales à 90 cm), les angles étaient faibles (i.e. $< 4^\circ$) et variaient peu entre les conditions « lumière » et « noir » (Fig. 34A).



Surface du centre de pression d'un sujet âgé de 27 ans (β) fixant une cible les yeux ouverts ou tentant de garder la fixation avec les yeux fermés sur une cible placée à 40 cm ou à 200 cm

Figure 32

Quotient de Romberg

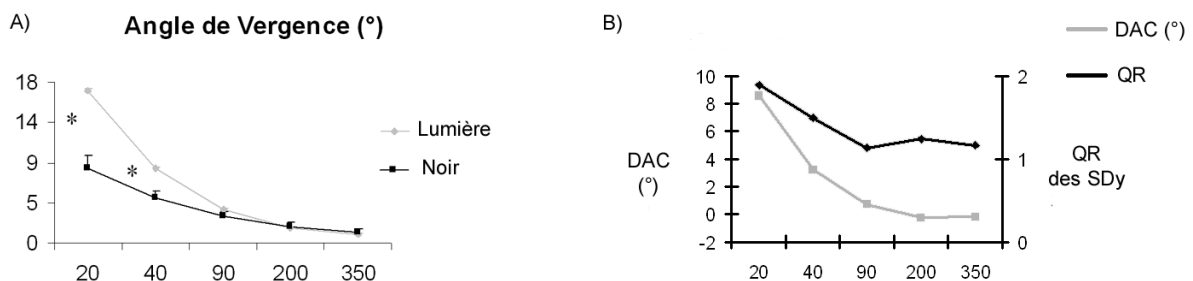


Quotient de Romberg de la surface du CdP, de l'écart-type des oscillations latérales (SDx) et antéropostérieures (SDy) et de la variance de vitesse. Le QR était significativement plus élevé à 40 cm qu'à 200 cm (astérisques).

Figure 33

Covariation du quotient de Romberg avec la différence de l'angle de la convergence en fonction de la distance

Comme nous l'avons mentionné, pour les distances proches (20 et 40 cm), l'angle de vergence était très différent entre les conditions lumière et noir. Ainsi la différence d'angle entre les conditions lumière et noir était élevée (Fig. 34B). De même, le quotient de Romberg était important pour les distances proches (Fig. 34B). Pour les distances intermédiaires et lointaines (≥ 90 cm), l'angle de vergence était faible et variait peu entre les conditions lumière et noir, d'où une différence d'angle (lumière – noir) faible. Pour ces mêmes distances, les quotients de Romberg étaient proches de 1 (Fig. 34B). Ainsi, l'angle de vergence co-variait avec le quotient de Romberg en fonction de la distance : avec la diminution de la distance, l'angle de vergence en condition lumière et le QR augmentaient. L'ANCOVA a montré que l'effet de la distance sur la co-variation entre la différence de l'angle de vergence et le QR des oscillations antéropostérieures (SDy) était significatif. L'analyse *a posteriori* a indiqué que le QR des SDy et la différence de l'angle de vergence étaient significativement plus élevés en vision à 20 cm par rapport aux autres distances plus lointaines (Fig. 34B).



(A) Valeurs moyennes de l'angle de vergence en condition lumière et noir à 20, 40, 90, 200 et 350 cm. L'angle de vergence à 20 et 40 cm est significativement plus élevé en condition lumière qu'en condition noir (astérisques). (B) Moyennes de la différence de l'angle de convergence (DAC, lumière - noir) et le quotient de Romberg (QR) des écarts-types des oscillations antéropostérieures (SDy) en fonction de la distance. La DAC et le QR co-varient significativement avec la distance : plus la distance augmente, plus la DAC et le QR diminuent.

Figure 34

4 – Discussion

Absence d'effet de l'âge sur le quotient de Romberg

Nous avons observé une augmentation de la variance de vitesse chez les sujets de plus de 60 ans autant en condition yeux ouverts qu'en condition yeux fermés. Cette augmentation est en accord avec nos précédents résultats (Kapoula et Lê 2006 ; Lê et Kapoula 2006) et suggère une activité élevée des muscles des membres inférieurs. Cependant, lorsque nous avons analysé le quotient de Romberg (yeux fermés / yeux ouverts), nous n'avons pas obtenu un effet de l'âge. L'absence d'effet de l'âge sur le quotient de Romberg est en accord avec les travaux d'Amiridis et al. (2003) qui ont observé une faible augmentation du QR des oscillations antéropostérieures et médio-latérales chez les sujets âgés étudiés. Cependant, Doyle et al (2004) ont obtenu des QR très élevés également chez des sujets âgés. Remarquons que l'âge moyen des sujets de Doyle et al. (2004) est supérieur à celui de notre groupe (i.e. respectivement 69 ans et 60 ans). En résumé, le QR des sujets âgés d'une soixantaine d'années reste similaire à celui des sujets plus jeunes.

Effet de la distance

L'expérience 1 montre qu'en distance lointaine (200 cm), le quotient de Romberg diminue vers des valeurs proches de 1 pour tous les sujets, quelque soit leur groupe d'âge. Ainsi, en distance lointaine, la condition yeux fermés n'induit pas davantage d'instabilité posturale par rapport à la condition yeux ouverts. Les résultats de l'expérience 2 sont similaires à ceux de l'expérience 1 : le QR commence à diminuer à partir de 90 cm. Cette dépendance à la distance suggère que d'autres facteurs que la vision, puissent influencer le contrôle de la posture dans l'obscurité ou dans la lumière, et donc les valeurs du QR. Les enregistrements oculographiques, réalisés dans l'expérience 2, apportent des informations concernant les possibles mécanismes physiologiques qui seront discutés.

Rôle de l'angle de convergence et des signaux proprioceptifs

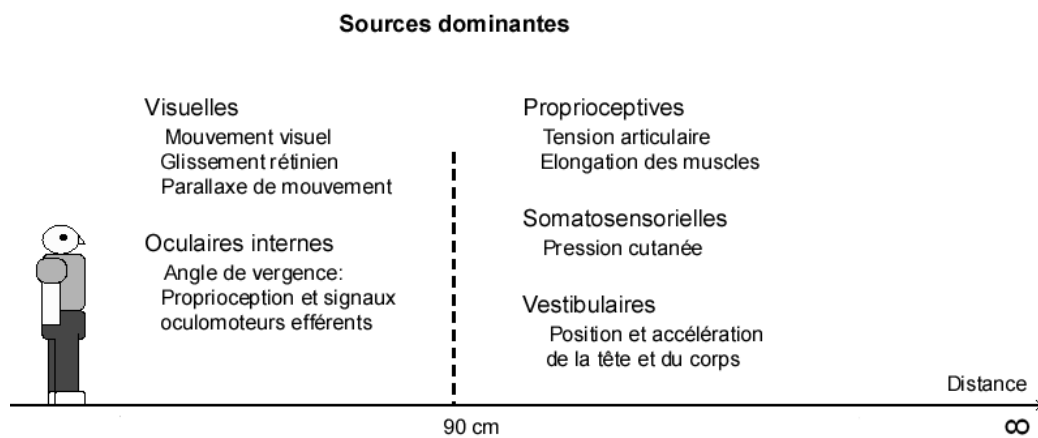
Les enregistrements oculographiques ont montré qu'en dépit de la consigne de maintenir la fixation de la cible, préalablement présentée dans la lumière, les sujets n'étaient

plus capables de garder l'angle de convergence dans le noir à la distance appropriée. En effet, le haut degré de convergence nécessaire à la fixation à 20 et 40 cm diminuait progressivement dans le noir. Pour les distances plus élevées (à partir de 90 cm), l'angle de vergence était faible et variait peu entre les conditions lumière et noir. La covariation entre l'angle de vergence et le quotient de Romberg des oscillations antéropostérieures en fonction de la distance était statistiquement significative (ANCOVA). Ce résultat confirme ainsi l'implication de l'angle de la convergence dans le contrôle postural, en particulier, dans le contrôle des oscillations antéropostérieures : les oscillations antéropostérieures modifient la profondeur (distance) de fixation entraînant alors un réajustement de l'angle de la convergence.

Ainsi, l'explication serait la suivante : dans la lumière et en distance proche, les yeux convergent. Les signaux oculomoteurs et proprioceptifs liés à cette convergence pourraient contribuer, de la même manière que les signaux visuels, à la stabilisation de la posture. Cette interprétation est en accord avec notre précédente étude (Kapoula et Lê 2006, étude 1) qui a montré l'effet stabilisateur des prismes convergents sur la posture de sujets fixant une cible physiquement éloignée. Les bases neurales impliquant la vergence dans le contrôle de la posture seraient multiples : la proprioception des muscles extraoculaires extrêmement riche (Büttner-Ennever 2006, voir Fig. 6 Chap. 1), le couplage muscles extraoculaires/muscles nucaux fortement impliqué dans le contrôle postural (Lestienne et al. 1984; André-Deshays et al. 1988, 1991; Corneil et al. 2004, voir Chapitre 3) et des aires centrales et postérieures du cortex (Tzelepi et al. 2004).

Cette étude amène à une nouvelle interprétation du quotient de Romberg. Puisque le QR est proche de 1 à des distances intermédiaires et lointaines, nous pouvons conclure que les signaux visuels sont moins importants pour ces distances. En effet, la taille angulaire du mouvement visuel et la sensibilité à la profondeur diminuent avec la distance. Les signaux extraoculaires (efférents et proprioceptifs) liés à l'angle de vergence seraient aussi impliqués dans le contrôle des oscillations posturales, particulièrement antéropostérieures. Ainsi, dans la lumière et en distance proche, le système nerveux central utiliserait la vision couplée avec les signaux oculomoteurs de la convergence afin de réduire les oscillations antéropostérieures, entraînant ainsi un quotient de Romberg élevé pour le paramètre SDy. Dans la lumière, en distance intermédiaire et lointaine, le SNC utiliserait davantage les entrées somatosensorielles, vestibulaires et proprioceptives pour stabiliser le corps. Le contrôle postural orthostatique ne serait donc pas « uniforme » dans l'espace ; le poids des différentes

modalités (visuo-motrices, proprioceptives, somatosensorielles et vestibulaires) varierait en fonction de la distance (Fig. 35).



Le contrôle postural utiliserait davantage les signaux visuels et oculomoteurs (efférents et proprioceptifs issus des muscles extraoculaires) en distance proche (< 90 cm). En distance lointaine (≥ 90 cm), le système postural utiliserait davantage les signaux proprioceptifs, somatosensoriels et vestibulaires.

Figure 35

Valorisation

Cette étude a été publiée dans la revue *Gait and Posture* (Lê et Kapoula, 2008, voir article 3 en annexe). L'étude a aussi fait l'objet d'un chapitre dans l'ouvrage *Posture et Equilibre* (Kapoula et Lê, 2007).

Etude 4 :

Les saccades horizontales ou verticales réalisées en distance proche ou lointaine ne détériorent pas la stabilité posturale

1 – Introduction	94
2 – Matériels et méthodes.....	95
3 – Résultats de l’oculographie	97
4 – Résultats de la posturographie.....	97
5 – Discussion	99

Etude 4 - Les saccades horizontales ou verticales réalisées en distance proche ou lointaine ne détériorent pas la stabilité posturale

1 – Introduction

La présente étude a examiné l'effet des saccades sur la stabilité posturale. La grande vitesse de la saccade oculaire (i.e. plus de 500°/sec. chez l'homme) rend la perception et l'analyse visuelle quasi impossible entraînant ainsi une suppression saccadique transitoire. Cette suppression pourrait théoriquement induire une instabilité posturale. Cependant, cet effet déstabilisateur des saccades sur la posture n'a été observé que par l'équipe de Brandt (1999). En effet, les autres études ont montré soit une absence d'effet des saccades (White et al. 1980), soit une influence stabilisatrice (Uchida et al. 1979; Kikukawa et Taguchi 1985; Oblak et al. 1985; Stoffregen et al. 2007). L'instabilité durant les saccades pourrait être attribuée à leur amplitude. En effet, Brandt et al. (1999) ont commencé à observer la déstabilisation lorsque les sujets produisaient des saccades d'amplitude supérieure ou égale à 40°. Cependant, Oblak et al. (1985) ont étudié des saccades d'amplitude similaire (i.e. 45°) et ont obtenu, une amélioration de la stabilité posturale. Notons que toutes ces études ont examiné les saccades réflexes (déclenchées par des diodes ou des points sur écran qui s'allumaient de manière alternée).

Un autre aspect pouvant influencer la posture est la distance : en distance proche la posture est plus stable qu'en distance lointaine. L'effet de la distance peut être attribué à la taille angulaire du glissement rétinien consécutif aux oscillations posturales (voir Bles et al. 1980; Paulus et al. 1984; Brandt et al. 1986; Paulus et al. 1989). Kapoula et Lê (2006) ont montré que la convergence oculaire serait aussi impliquée dans l'effet de la distance : les auteurs ont utilisé des prismes convergents qui ont amélioré la stabilité posturale des sujets (voir étude 1).

L'objectif consistait à apporter une vision intégrée de l'influence des saccades, réalisées volontairement, sur la posture en étudiant les saccades horizontales et verticales en

fonction de l'angle de vergence. Pour cela, les saccades ont été exécutées à deux distances différentes.

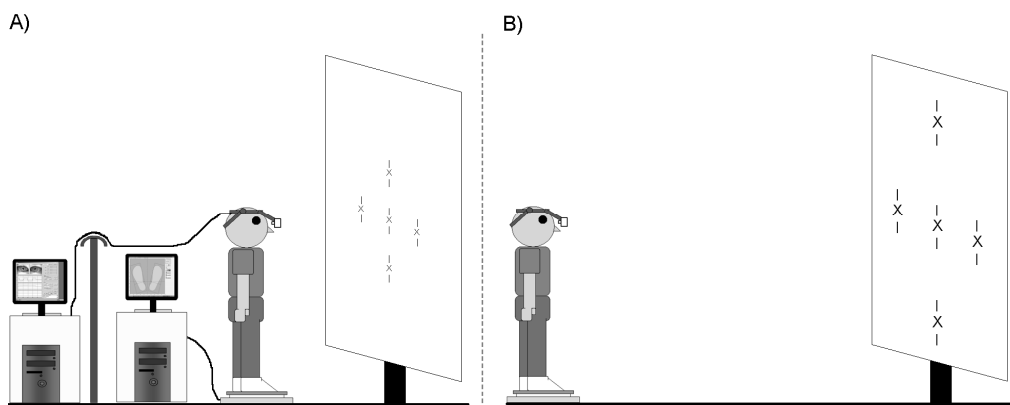
2 – Matériels et méthodes

a - Sujets

Onze sujets âgés de 22 à 29 ans (âge moyen $25,5 \pm 2,5$ ans) ont été recrutés.

b - Procédure

Les sujets étaient assis les pieds posés sur la plate-forme (TechnoConcept) et le vidéo-oculographe (EyeLink 2) placé sur leur tête. Un écran contenant les cibles visuelles était placé devant le sujet. En début de procédure, les sujets se mettaient debout sur la plate-forme en position standard de Romberg. Face à l'écran, les sujets réalisaient un calibrage des mouvements oculaires suivi de l'acquisition posturographique durant 51,2 s (Fig. 36).



Le sujet est debout sur la plate-forme avec le vidéo-oculographe placé sur la tête. Le poids du vidéo-oculographe est allégé par la fixation du câble de l'appareil avec une barre verticale (A). Le sujet est face à un écran, placé à 40 cm (A) ou à 200 cm (B), composé d'une cible centrale au niveau du regard et de 4 cibles excentrées (gauche, droite, haut et bas) à 15°.

Figure 36 : Dispositif expérimental

Trois conditions étaient réalisées durant l'acquisition posturographique : exécution de saccades horizontales, verticales et fixation au centre. Les saccades horizontales et verticales étaient d'une amplitude de 30°. En effet, elles étaient exécutées volontairement à partir de deux cibles excentrées de 15°, au rythme d'un métronome (i.e. 1 Hz). Les trois conditions étaient réalisées à 40 et à 200 cm correspondant à un angle de convergence respectif de 8,6° et 1,7°.

c - Paramètres

Les paramètres posturographiques étaient la surface du centre de pression, les SDx, les SDy et la variance de vitesse du CdP. Pour chaque condition (saccades horizontales, verticales et fixation à 40 et 200 cm), nous avons calculé le signal conjugué (position horizontale ou verticale de l'œil gauche + position horizontale ou verticale de l'œil droit / 2) et le signal de vergence (position horizontale de l'œil gauche – position horizontale de l'œil droit) permettant d'analyser les amplitudes des saccades, le nombre de saccades correctives et l'angle de convergence.

d – Analyse statistique

Une ANOVA a été réalisée sur les paramètres posturographiques : elle comprenait le facteur « tâche oculomotrice » (saccades horizontales, verticales et fixation) et distance (40 et 200 cm). L'analyse des données oculographiques portait sur 9 des 11 sujets initiaux. En effet, les données oculographiques de 2 sujets présentaient des problèmes de calibrage ne permettant pas de les analyser. Cette analyse était qualitative ; elle avait pour objectif de « vérifier » si, d'une part, le sujet exécutait le nombre adéquat de saccades durant la posturographie (i.e. 51) avec une amplitude de 30°, et d'autre part, si l'angle de la convergence calculé correspondait à l'angle de convergence théorique (8,6° à 40 cm et 1,7° à 200 cm).

3 – Résultats de l’oculographie

La Figure 37 présente le tracé moyen du signal conjugué pour les trois conditions (fixation, saccades horizontales et verticales) à 40 et 200 cm. En effet, les tracés oculographiques des 9 sujets étaient très similaires dans chaque condition.

En condition fixation, la position des yeux des sujets était quasiment stable pour les 2 distances. En condition saccade, les sujets ont réalisé les mouvements à la fréquence appropriée (i.e. 1 Hz). L’amplitude moyenne des saccades était proche de l’amplitude requise ($30,3^\circ$ et $29,9^\circ$ pour les saccades horizontales et verticales exécutées à 40 cm et $30,1^\circ$ et $30,5^\circ$ pour les saccades produites à 200 cm) et l’angle de vergence moyen était proche de l’angle requis pour chaque distance ($8,3^\circ$ à 40 cm et $1,7^\circ$ à 200 cm). Ainsi, l’analyse des tracés oculographiques a confirmé la stabilité de la fixation, l’exécution correcte des saccades (horizontales et verticales) ainsi que le bon ajustement de l’angle de vergence.

4 – Résultats de la posturographie

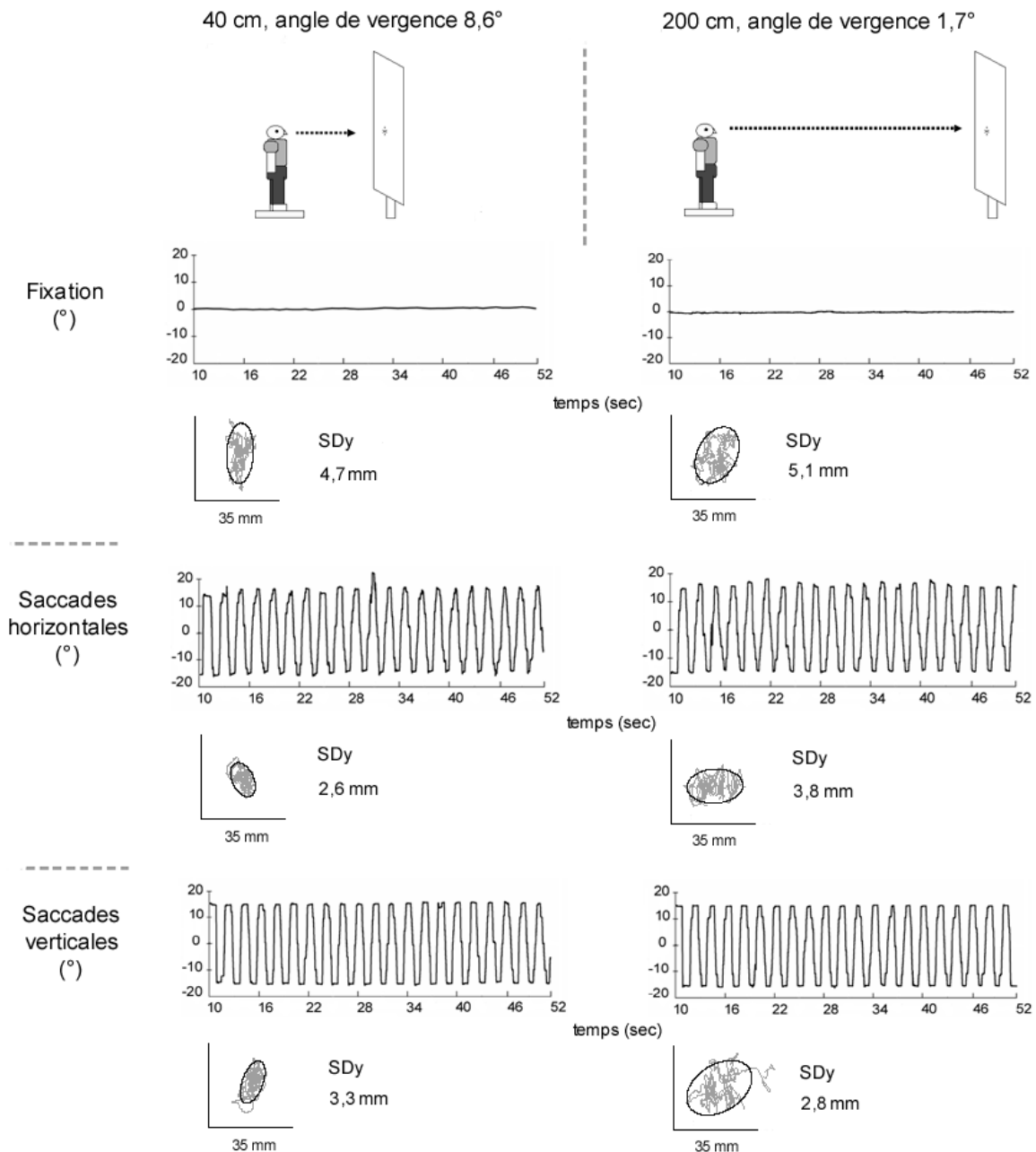
a – Effet de la distance

La Figure 37 représente les statokinésigrammes d’un des 11 sujets dans les trois conditions (fixation, saccades horizontales ou verticales) à 40 et à 200 cm. Les excursions du centre de pression du sujet semblent plus étendues pour les conditions réalisées à 200 cm qu’à 40 cm. L’ANOVA a confirmé l’effet de la distance sur la surface du CdP, les écarts-types des oscillations médio-latérales (SDx) et la variance de vitesse : les paramètres étaient significativement plus élevés en vision à 200 cm qu’en vision à 40 cm.

b – Condition tâche oculomotrice : fixation *versus* saccades

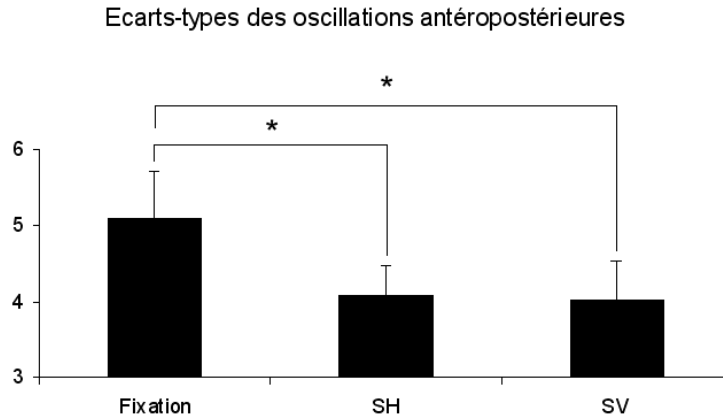
La Figure 37 présente les valeurs des écarts-types des oscillations dans le plan antéropostérieur (SDy) d’un des 11 sujets. Ces valeurs étaient plus faibles lorsque le sujet a exécuté des saccades (horizontales et verticales) par rapport à la fixation. L’ANOVA a montré que le facteur tâche oculomotrice était significatif sur les SDy : en moyenne, les sujets ont

présenté des SDy significativement plus faibles en condition saccade horizontale et verticale par rapport à la condition fixation (Fig. 38).



Signaux conjugués (moyennés sur 9 sujets) de la position des yeux, statokinésigrammes et valeurs des écarts-types des oscillations antéropostérieures (SDy) d'un sujet âgé de 29 ans (♂) réalisant une fixation oculaire, des saccades horizontales et verticales à une distance de 40 et 200 cm.

Figure 37



Écart-types moyens des oscillations dans le plan antéropostérieur (SDy) en condition fixation, saccade horizontale (SH) et verticale (SV). Les SDy étaient significativement plus faibles durant les saccades (horizontales et verticales) que durant la fixation (astérisques).

Figure 38

c – Effet de la fréquence des saccades

La fréquence des saccades étant à un 1 Hz, il est probable que la composante à la même fréquence des oscillations posturales soit influencée par l'exécution des saccades. L'ANOVA, appliquée sur la transformée de Fourier de la composante à 1 Hz des oscillations antéropostérieures et médio-latérales, a montré un effet non-significatif de la distance et de la tâche oculomotrice.

5 – Discussion

Le résultat majeur de l'étude est le suivant : l'exécution des saccades a diminué les oscillations dans le plan antéropostérieur. Nos résultats sont en accord avec les travaux d'Uchida et al. (1979) et Kikukawa et Taguchi (1985) et s'opposent aux résultats de Brandt et al. (1999). Par ailleurs, notre étude complète ces précédents travaux puisque nous avons démontré que l'effet stabilisateur des saccades existait aussi pour les saccades volontaires, réalisées dans un espace comprenant les trois dimensions : l'horizontalité, la verticalité et la profondeur. En effet, dans des conditions naturelles, nous réalisons des saccades à différentes distances. En vision proche, la saccade entraîne un glissement rétinien de grande vélocité qui

pourrait être une source importante d'instabilité posturale. De même, comme nous l'avons mentionné dans l'Introduction, la suppression saccadique induit une absence de vision qui aurait pu provoquer une instabilité posturale. Or, nos résultats ont démontré le contraire.

Quels sont donc les mécanismes responsables d'une telle stabilisation de la posture durant les saccades ? Il est probable que les signaux oculomoteurs tels que la décharge corollaire ou les signaux oculomoteurs efférents puissent contribuer à cette stabilisation du corps durant la saccade. Divers travaux ont identifié le substrat neuronal des décharges corollaires (Sommer et Wurtz, 2002; Sommer et Wurtz, 2004a; Sommer et Wurtz, 2004b; Colby et al., 2005). Ce réseau impliquerait des projections entre le colliculus supérieur et le champ oculomoteur frontal et des relais thalamiques. Ce type de signal pourrait intervenir sur le système postural via son interaction avec la proprioception cervicale (André-Deshays et al. 1988, 1991; Corneil et al. 2004, Chapitre 3). Rappelons que la proprioception cervicale est impliquée dans le contrôle de la posture (Buckley et al. 2005, Chapitre 3). La proprioception extraoculaire, nous l'avons dit, est la source proprioceptive la plus riche concernant les effecteurs moteurs chez l'homme (Buttner-Ennever et Buttner, 1992). Elle pourrait aussi intervenir dans la stabilisation du corps.

L'effet stabilisateur des saccades pourrait aussi être attribué à des facteurs attentionnels. Il est possible que l'exécution répétée de saccades entraîne un mode de contrôle de la posture plus attentionnel que durant la fixation. Les oscillations seraient alors plus serrées et la posture plus rigide en condition saccade. Kapoula et Bucci (2007) ont examiné la posture d'enfants dyslexiques et non dyslexiques. Ils ont montré que les enfants dyslexiques étaient plus instables que les enfants non dyslexiques en condition fixation. Cependant, avec la consigne de réaliser des mouvements répétés de vergences (vers des cibles situées en distance proche et lointaine), les enfants dyslexiques ont montré une posture aussi stable que les enfants non dyslexiques.

L'effet stabilisateur des saccades sur la posture n'a été observé que sur les écarts-types des oscillations dans le plan antéropostérieur (SDy). Une raison possible serait la suivante : les oscillations antéropostérieures pourraient modifier la taille angulaire des cibles et entraîner des saccades d'amplitudes incorrectes. Ainsi, la réduction des oscillations antéropostérieures permettrait un « calcul » correct de l'amplitude des saccades.

En résumé, l'étude met en évidence un effet stabilisateur des saccades volontaires sur la posture par rapport à la fixation oculaire, en particulier en réduisant les oscillations dans le

plan antéropostérieur. Les signaux extraoculaires efférents et proprioceptifs, ainsi que les processus attentionnels, semblent intervenir dans la mise en place d'un tel effet.

Valorisation

Cette étude a été publiée dans la revue *Auris Nasus Larynx* (Rey et al., 2007, voir article 4 en annexe).

Etude 5 :

Stabilité posturale chez des personnes présentant les symptômes de fatigue visuelle, céphalées et vertiges

1 – Introduction	103
2 – Matériels et méthodes.....	104
3 – Résultats	107
4 – Discussion	110

Etude 5 - Stabilité posturale chez des personnes présentant les symptômes de fatigue visuelle, céphalées et vertiges

1 – Introduction

La fatigue visuelle associée aux céphalées et vertiges (ensemble de symptômes que nous appellerons FVCV) est fréquemment rencontrée dans les services d'ophtalmologie et d'ORL (Anoh-Tanon et al., 2000). Les symptômes FVCV, dans les pays développés, peuvent être associés à des troubles de la vergence dus à une activité prolongée en distance proche (lecture, écran d'ordinateur). Par exemple, l'insuffisance de la convergence (IC) est un trouble oculomoteur caractérisé par une faible capacité à converger correctement. Les signes cliniques les plus fréquents d'une IC sont un recul du Point Proximal de Convergence (PPC), une amplitude de vergence faible mesurée par la barre prismatique, et une exophorie anormalement élevée lors du test d'occlusion alternée. Les valeurs seuils de ces tests, permettant de diagnostiquer un déficit, varient en fonction des études. Par exemple, le seuil du PPC serait de 10 cm (Capobianco, 1952; Passmore et Maclean, 1957; Oguz et Iskeleli, 1985; von Noorden, 1996) ou de 5 cm (Shippman et al., 1983; Scheiman et al., 2003).

Anoh-Tanon et al. (2000) ont observé que sur 520 enfants, consultant pour des vertiges, céphalées et trouble de l'équilibre, 5% ne présentaient pas d'anormalité vestibulaire. En revanche, ils montraient des troubles de la convergence aux tests orthoptiques. Des études objectives, avec des enregistrements oculographiques, ont montré que des enfants ayant ces troubles présentaient des latences longues de la convergence, et de la saccade combinée avec la convergence et la divergence (par rapport à des enfants témoins d'âge similaire, voir Bucci et al 2004b). Par ailleurs, une précision faible, une durée élevée et une vitesse lente de la convergence ont aussi été rapportées chez ces enfants (Bucci et al. 2004a). Les enfants ont suivi douze séances de rééducation orthoptique qui ont, d'une part, réduit les symptômes de vertiges et céphalées, et d'autre part, amélioré les performances oculomotrices (i.e. diminution des latences pour tous les mouvements, voir Bucci et al. 2004b, et amélioration de la précision pour tous les mouvements sauf pour la divergence pure ou combinée avec la saccade, voir

Bucci et al. 2004a). En résumé, ces deux études ont mis en évidence une corrélation entre des anomalies de la vergence mesurée cliniquement (PPC, barre prismatique), et des déficits de la vergence oculomotrice évaluée par des enregistrements oculographiques.

L'objectif de l'étude était d'examiner la stabilité posturale de sujets avec FVCV et trouble de la vergence, avant et après rééducation orthoptique. Les sujets ont été testés en fixant une cible placée, d'une part, en distance proche avec les yeux ouverts ou fermés, et d'autre part, en distance lointaine avec des prismes convergents ou sans les prismes. Avant la rééducation, les données des sujets avec FVCV ont été comparées avec les résultats de sujets témoins d'âge similaire. Étant donné l'importance de la vergence dans le contrôle de la posture (voir étude 1), il est possible que la stabilité posturale chez les personnes avec FVCV soit réduite.

2 – Matériels et méthodes

a - Sujets

Douze personnes (âge moyen $40,8 \pm 12,2$ ans), admises au service ophtalmologique de l'Hôpital Européen Georges Pompidou, ont participé à l'étude. Les personnes se plaignaient de fatigue visuelle avec une vision floue intermittente associée à des céphalées et des vertiges. Douze personnes (âge moyen $41,7 \pm 11,8$ ans) qui ne présentaient pas les symptômes FVCV ont été incluses en tant que groupe contrôle.

b – Examens orthoptiques

L'examen orthoptique était réalisé par l'orthoptiste de l'HEGP, co-auteur de l'étude (Berbey, N.). L'examen comprenait la mesure de l'acuité visuelle, la stéréoacuité, le PPC, la phorie (avec le cover test et la barre de Maddox) de près et de loin, et les amplitudes de convergence et de divergence (avec la barre prismatique et le synoptophore). Les angles subjectifs et objectifs ont aussi été mesurés avec le synoptophore afin de déterminer la présence de strabisme. Le synoptophore est un appareil de type stéréoscopique permettant d'évaluer la qualité de la vision binoculaire. Il est aussi destiné à la rééducation orthoptique.

Nous avons également calculé le ratio convergence accommodative / accommodation (i.e. CA / A = 6 + (phorie de près – phorie de loin) / 3, Von Noorden 1996).

Les sujets témoins avaient une acuité visuelle correcte, des valeurs de stéréoaucuité normales, ainsi qu'un PPC, une phorie et des amplitudes de vergences normaux. Les résultats des sujets avec FVCV sont dans le tableau suivant :

A)

Sujets (âge)	PPC (cm)	Cover test	Maddox	Diverg.	Converg.	CA/A
VFHV						
S1 (23)	5	O;X' ₄	E ₂ ;O'	D₄ ;D' ₁₆	C ₂₀ ;C' ₃₀	4.7
S2 (26)	10	X ₁ ;X' ₈	X ₄	D₂ ;D' ₆₋₄	C₄ ;C' ₄	3.7
S3 (30)	12	O;X' ₆	E ₂ ;E' ₆	D₄₋₂ ;D' ₁₄	C₁₄ ;C' ₈	4.0
S4 (33)	5	O;X' ₆	E₁ ;X' ₈	D₂ ;D' ₁₆	C₁₆ ;C' ₁₈	4.0
S5 (39)	3	O;X' ₂	E ₂ ;E' ₄	D ₄₋₆ ;D' ₁₈	C ₂₀ ;C' ₄₀	5.3
S6 (40)	3	O;X' ₂	E ₁ ;X' ₁	D ₈₋₆ ;D' ₁₂₋₁₀	C₁₀ ;C' ₂₅	5.3
S7 (42)	3	O;O'	E ₁ ;E' ₂	D₂ ;D' ₁₈₋₁₆	C₁₀ ;C' ₄₀	6.0
S8 (42)	3	O;X' ₄	E₁ ;X' ₄	D₄ ;D' ₁₈	C₁₄ ;C' ₄₀	4.7
S9 (46)	4	EE^{T6}E'₈	E ₈ ;E' ₂	D₀ ;D' ₁₆₋₁₄	C ₄₀ ;C' ₃₀₋₄₀	
S10 (48)	4	O;E' ₂₋₄	E ₂ ;E' ₈	D ₆ ;D' ₁₄	C₆ ;C' ₂₅	7.3
S11 (55)	15	O;X' ₂	E₂ ;X' ₂	D₄ ;D' ₁₂₋₁₀	C ₂₀ ;C' ₃₀	5.3
S12 (66)	5	O;X' ₂₀	E ₁ ;E' ₁₀	D₂ ;D' ₁₈	C ₃₀ ;C' ₄₀	-0.7

B)

PPC	Phorie	Divergence	Convergence	CA/A
< 10 cm	Loin:0-2	Loin: 5-9	Loin:18-24	3-4
	Près ('):4-6	Près ('):15-23	Près ('):18-24	

(A) Les sujets avec les symptômes FVCV ont présenté des signes cliniques de trouble de la vergence (en gras) par rapport aux normes (Von Noorden 1996, tableau B). PPC : point proximal de convergence; O, X, E : respectivement orthophorie, exophorie et ésoptorie ; D et C : respectivement amplitude de la divergence et de la convergence ; CA/A : rapport de la convergence accommodative sur l'accommodation.

La plupart des sujets avec FVCV avaient des spasmes accommodatifs (spasme du muscle ciliaire associé à une incapacité de relâcher l'accommodation). La présence de spasmes accommodatifs est fréquente chez des sujets avec fatigue visuelle et céphalées

(Daum, 1983; Daum, 1984; Airiani et Braunstein, 2006). Les signes d'un spasme seront décrits ultérieurement. Les sujets avec FVCV présentaient une acuité ($> 8/10$) et une stéréoacuité normales (> 50 sec d'arc). Leurs angles objectifs et subjectifs étaient similaires indiquant un alignement correct de leurs yeux. Lors du test de Maddox, tous les sujets (sauf le sujet 2) présentaient une ésochorie de loin et 5 une exophorie de près alors qu'avec le « cover test », la plupart des sujets avaient une exophorie importante. Une telle différence de résultats entre les deux tests suggère la présence de spasmes accommodatifs. La mesure des amplitudes de vergence avec la barre prismatique a montré que 4 sujets avec FVCV présentaient une faible divergence (S1, S9, S11 et S12), 4 avaient un trouble de convergence (S3, S5, S8 et S10) ; les 4 restants montraient un trouble de divergence et de convergence. Le test de fusion avec le synoptophore a confirmé la présence de ces troubles de la vergence. Les valeurs du ratio CA / A étaient élevées (> 4), et ceci, particulièrement pour les sujets présentant des spasmes accommodatifs (1, 5, 6, 7, 10 et 11). Enfin, les sujets S2, S3 et S11 ont montré un PPC éloigné (supérieur ou égal 10 cm).

c – Protocole expérimental

Les sujets étaient en position orthostatique sur la plate-forme en fixant une cible placée au niveau de leur regard durant 51,2 s.

Test de Romberg

Le test de Romberg examine la condition yeux ouverts et yeux fermés à 40 cm de distance afin d'évaluer l'influence de l'entrée visuelle.

Test de prisme

Les sujets fixaient une cible à 200 cm de distance soit à travers deux prismes convergents de 5 Δ chacun, soit sans les prismes (voir étude 1).

Les sujets qui ont réalisé les douze séances de rééducation orthoptique ont effectué le même bilan postural.

d - Paramètres

Nous avons analysé la surface, les SDx, les SDy et la variance de vitesse du CdP. Pour le test de Romberg, nous avons calculé le quotient de Romberg (yeux fermés / yeux ouverts) pour tous les paramètres.

e - Analyse statistique

Pour le test de Romberg, une ANOVA a été réalisée. Elle comportait le facteur groupe (FVCV *versus* contrôles) et la condition (yeux ouverts *versus* yeux fermés). Pour le test avec les prismes, une ANOVA a été effectuée. Elle comprenait le facteur groupe (FVCV *versus* contrôles) et la condition (avec ou sans prismes). Sur la base des données issues de ces deux expériences, nous avons effectué une ANOVA incluant le facteur groupe (FVCV et contrôles) et distance (yeux ouverts à 40 cm et yeux ouverts sans les prismes à 200 cm). Les tests *a posteriori* étaient le « Fisher's PLSD ».

3 - Résultats

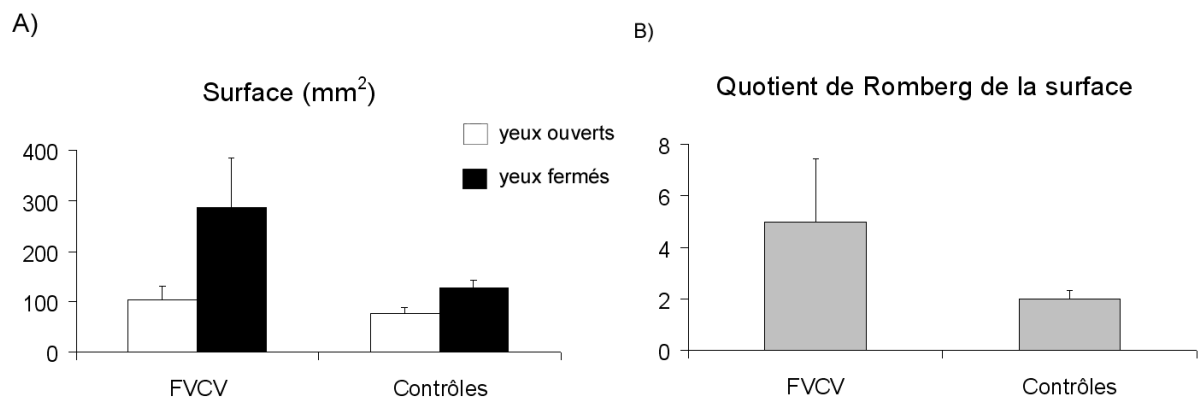
a – Test de Romberg

L'effet du groupe était significatif pour les SDx et la variance de vitesse. Les sujets avec FVCV ont présenté, en moyenne, un SDx et une variance de vitesse significativement plus élevés que les sujets témoins.

L'effet de la condition (yeux ouverts et yeux fermés) était significatif pour tous les paramètres. Les sujets, quelque soit leur groupe, ont montré des valeurs significativement plus élevées en condition yeux fermés qu'en condition yeux ouverts (Fig. 39a).

Est-ce que le quotient de Romberg (yeux ouverts / yeux fermés) entre les deux groupes était différent ? Compte tenu des troubles de vergence que présentaient les sujets avec FVCV, deux possibilités pouvaient être envisagées : (a) les troubles de vergence, induits par les anomalies oculomotrices, pourraient réduire la qualité des signaux visuels. La posture en condition yeux ouverts serait aussi instable qu'en condition yeux fermés entraînant un quotient proche de 1. (b) Les troubles de la vergence induiraient des signaux internes anormaux, de type oculomoteur et proprioceptif, qui affecteraient l'ensemble du système

proprioceptif. L'atteinte du système proprioceptif pourrait « aggraver » l'instabilité posturale en condition yeux fermés. En revanche, en condition yeux ouverts, les signaux visuels pourraient compenser les effets néfastes des signaux internes anormaux, assurant une bonne stabilité posturale. Dans ce cas, le quotient de Romberg des sujets avec FVCV serait supérieur à 1 et supérieur à celui des sujets témoins. Qualitativement, le quotient moyen des sujets avec FVCV était, effectivement, supérieur à 1, et supérieur à celui des témoins (Fig. 39b) : 5 sujets avec FVCV avaient un QR supérieur à 3 pour un seul témoin.



(A) Surface du CdP moyen des sujets avec FVCV et des sujets contrôles en condition yeux ouverts et yeux fermés. (B) quotient de Romberg moyen de la surface des sujets FVCV et des sujets contrôles. (A) Les sujets ont présenté, en moyenne, une surface plus élevée en condition yeux fermés qu'en condition yeux ouverts. En condition yeux ouverts, les sujets avec FVCV ont présenté une surface, en moyenne, proche de celle des sujets contrôles (105 mm² et 76 mm² respectivement). Au contraire, en condition yeux fermés, la surface était, en moyenne, plus élevée chez les sujets avec FVCV que les sujets contrôles (286 mm² et 128 mm² respectivement). (B) En conséquence, le quotient de Romberg des sujets FVCV était plus élevé que celui des sujets contrôles.

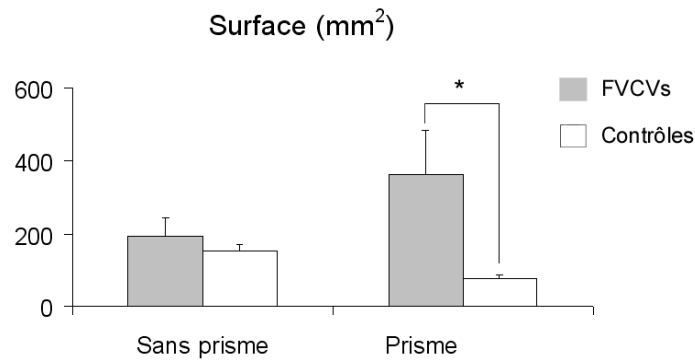
Figure 39

b – Test de prisme

L'effet de groupe était significatif pour la surface du CdP, les SDx et de la variance de vitesse : la valeur moyenne de ces paramètres était significativement plus élevée chez les sujets avec FVCV par rapport à celle chez les sujets témoins.

L'effet simple du facteur prisme était non significatif. Cependant, l'interaction entre le facteur groupe et prisme était significatif pour la surface du CdP, les SDx et les SDy. En condition prisme, la valeur moyenne des trois paramètres était significativement plus élevée

chez les sujets avec FVCV que celle chez les témoins (Fig. 40). Le port des prismes a donc détérioré la stabilité posturale des sujets avec FVCV alors qu'il l'a améliorée chez les témoins.



Surface du CdP des sujets avec FVCV et des sujets contrôles pour les conditions avec et sans prisme convergent. En condition sans prisme, les sujets avec FVCV et contrôles ont montré des résultats similaires (193 mm² et 153 mm² respectivement). En condition prisme, les sujets avec FVCV ont présenté une augmentation de la surface (364 mm²) alors que les témoins ont montré une diminution de la surface (77 mm²) par rapport à la condition sans prisme. Ainsi, en condition prisme, la surface des sujets avec FVCV était significativement plus élevée que celle des sujets contrôles (astérisque).

Figure 40

c – Effet de la distance

L'effet de la distance était significatif pour la surface du CdP, les SDx et SDy : la valeur moyenne de ces trois paramètres était significativement plus faible en vision proche qu'en vision lointaine.

d – La rééducation orthoptique

Six sujets avec FVCV ont suivi les 12 séances de rééducation orthoptique. Après les 12 séances, les sujets étaient devenus asymptomatiques et présentaient des valeurs normales lors de l'examen orthoptique. Les valeurs posturographiques ont, en général, diminué suite à la rééducation. Cependant, l'amélioration n'était pas significative selon le test de Wilcoxon. L'examen des données individuelles a révélé que 4 sujets parmi les 6 ont présenté une amélioration (en termes de baisse de la surface du CdP, des SDx et des SDy).

4 – Discussion

Les sujets avec FVCV ont montré des similitudes au niveau postural avec les sujets contrôles : ils ont présenté une posture plus stable en condition yeux ouverts par rapport à la condition yeux fermés, et une amélioration de la stabilité en vision à 40 cm en comparaison avec la vision à 200 cm. Cependant, les sujets avec FVCV ont présenté une posture, en général, plus instable (en termes d'augmentation des oscillations dans le plan médio-latéral et de variance de vitesse plus élevée) dans toutes les conditions. Nous allons discuter de ces différences.

Instabilité dans le test de Romberg

Plusieurs sujets avec FVCV ont montré un quotient de Romberg supérieur à 3 contre 1 seul sujet parmi les contrôles. Le QR plus élevé chez les sujets avec FVCV résultait de l'instabilité posturale, en condition yeux fermés, plus importante chez ces sujets que chez les sujets contrôles. Cette observation appuie l'hypothèse selon laquelle les troubles de la vergence chez les sujets avec FVCV réduiraient la qualité des signaux oculomoteurs et proprioceptifs, en particulier en condition yeux fermés (voir para 3a, p. 107).

Les prismes convergents déstabilisent la posture chez les sujets avec FVCV

Les sujets avec FVCV ont montré une posture plus instable en condition prisme par rapport à la condition sans prisme. Cette instabilité est en opposition avec les résultats des sujets contrôles de cette étude, et en opposition avec les résultats rapportés dans notre étude précédente (Kapoula et Lê 2006, voir étude 1). Lors du port des prismes convergents, les yeux doivent converger à une amplitude appropriée. Kapoula et Lê (2006) suggèrent que les signaux efférents et proprioceptifs liés à l'augmentation de l'angle de la convergence contribuent à l'amélioration de la stabilité posturale. Une telle implication pourrait faire intervenir des connexions entre les muscles extraoculaires et ceux de la nuque. Les travaux de Han et Lennerstrand (1998) soutiennent l'existence de ces connexions : ils ont montré que la vergence accommodative était accélérée par la vibration des muscles de la nuque. Lê et Kapoula (2008, étude 3) ont montré une corrélation entre l'angle de la convergence mesuré

par vidéo-oculographie et la stabilité posturale évaluée sur un continuum de plusieurs distances. Ainsi, il existe des preuves d'une l'influence de la convergence sur la stabilité posturale chez les sujets contrôles.

L'effet négatif des prismes chez les sujets avec FVCV peut avoir une origine visuelle, oculomotrice ou les deux à la fois. Cependant, les sujets n'ont pas rapporté de vision floue, double ou inconfortable en condition prisme. Nous pouvons donc supposer qu'avec les prismes, les sujets avec FVCV ont, soit fusionné correctement les images rétiniennes, soit supprimé une des deux images. Etant donné la normalité de la stéréoaocuité et de l'alignement binoculaire chez les sujets avec FVCV, ainsi que la faible puissance des prismes, il est peu probable d'envisager la suppression visuelle monoculaire. Les sujets étaient donc capables de fusionner et d'obtenir une vision unique de la cible fixée. Néanmoins, malgré l'amplitude adéquate de la vergence durant le port des prismes, les propriétés dynamiques de la vergence pourraient être anormales. Par exemple, une lenteur de la vergence, comme il a été montré chez des enfants avec vertiges et céphalées (Bucci et al. 2004a; Bucci et al. 2004b; Bucci et al. 2006). La vergence des sujets avec FVCV, en réponse aux prismes, pourrait présenter une lenteur similaire pouvant compromettre, au niveau visuel, la capacité de maintenir la fusion de la cible fixée.

En résumé, le fait que les sujets avec FVCV soient plus instables en condition prisme apporte la preuve que la vergence de disparité est responsable d'une telle détérioration de la posture.

Effet de la rééducation orthoptique

Suite aux 12 séances de rééducation orthoptique, les sujets étaient devenus asymptomatiques et présentaient des valeurs de vergence, mesurée cliniquement, normales. Cependant, l'amélioration au niveau postural a été observée sur peu de sujets et concernait principalement ceux avec un trouble de la convergence. Ce résultat n'exclut pas le bénéfice qu'apporte par la rééducation orthoptique au niveau postural. Cependant, il montre que l'entraînement traditionnel de la vergence ne suffit pas pour améliorer systématiquement la stabilité posturale. Il est possible que la part d'instabilité restante chez les sujets avec FVCV soit due (encore une fois) à la lenteur hypothétique de la trajectoire de la vergence. Il serait nécessaire de développer de nouvelles techniques qui entraîneraient cette trajectoire de façon dynamique.

En conclusion, l'étude montre, pour la première fois, que les symptômes de fatigue visuelle, céphalées, et vertiges, couplés avec des résultats orthoptiques anormaux, sont associés à une faible stabilité posturale. Une telle instabilité serait liée aux troubles de la vergence de disparité. La rééducation classique de la vergence ne suffirait pas pour réduire totalement cette instabilité d'où la nécessité de développement de nouvelles techniques de rééducation, qui accéléreraient la trajectoire de la vergence.

Discussion générale

I - Synthèse.....	114
1 – Rôle de l'angle de la convergence dans l'effet de la distance sur la posture	114
2 – Interaction entre l'angle de la convergence et l'entrée visuelle	117
3 – Signes précoces du vieillissement sur la posture et rôle de l'angle de la convergence sur le contrôle postural chez le sujet âgé.....	120
4 – Rôle de l'angle de la convergence durant l'exécution de saccades oculaires	124
5 – Rôle de l'angle de la convergence chez le sujet présentant des symptômes de fatigue visuelle, céphalées et vertiges	125
II – Rôle de l'oculomotricité et de la proprioception des muscles extraoculaires dans le contrôle de la posture.	125

Discussion générale

Le présent chapitre rappelle les interrogations soulevées lors de la problématique (Chapitre 5) concernant le rôle de l'angle de convergence sur la stabilité posturale. Pour chacune de ces questions, une synthèse des résultats principaux apportant des éléments de réponses ainsi que des perspectives possibles seront présentées.

I – Synthèse

L'implication de l'angle de la convergence dans la stabilité posturale a été examinée selon 5 questions :

- _ Quel est le rôle de l'angle de convergence dans l'effet de la distance sur la posture ?
- _ Quelle interaction existe-t-il entre l'angle de convergence et l'entrée visuelle sur la posture ?
- _ Quels sont les signes du vieillissement dans l'équilibre postural, et quelle influence l'angle de convergence exerce-t-il sur la posture du sujet âgé ?
- _ Comment est assuré le contrôle postural chez le sujet ayant des troubles de la vergence ?
- _ Quelle influence exerce l'angle de convergence sur la posture durant les saccades ?

1 – Rôle de l'angle de la convergence dans l'effet de la distance sur la posture

La posture est plus stable en vision proche qu'en vision lointaine. Selon le groupe de Brandt (Bles et al. 1980; Paulus et al. 1984; Brandt et al. 1986; Paulus et al. 1989), l'effet de la distance serait attribué à la taille angulaire du glissement rétinien consécutif aux oscillations posturales (Chapitre 1). Dans cette thèse, nous avons défendu l'hypothèse selon laquelle l'effet de distance serait aussi attribué à la valeur de l'angle de convergence. En effet, l'angle de convergence est plus élevé en distance proche qu'en distance lointaine. Les résultats de l'étude 1 et de l'étude 3 confirment notre hypothèse.

Dans l'étude 1, nous avons utilisé des prismes convergents de 5Δ sur chaque œil de sujets qui fixaient une cible à 200 cm. A une telle distance, la taille angulaire du glissement

rétinien était faible. Par contre, le port des prismes convergents a amplifié l'angle de convergence à une valeur proche de celle en fixation à 40 cm (i.e. approximativement 9°). Nous avons observé une posture plus stable en condition prisme qu'en condition sans prisme. Sur la base de ce résultat, nous pouvons conclure que l'angle de la convergence (en particulier son augmentation) serait impliqué dans l'amélioration de la stabilité posturale en vision proche. Les résultats observés dans l'étude 3 renforcent cette conclusion.

Dans cette étude, nous avons mesuré l'équilibre postural et enregistré l'angle de vergence de sujets qui fixaient une cible à 20, 40, 90, 200 et 350 cm. L'angle de convergence était élevé pour les distances proches (17° à 20 cm et 8,4° à 40 cm) et faible (i.e. < 4°) pour les distances intermédiaires et lointaines (i.e. > 90 cm). Concernant la stabilité posturale, elle était meilleure pour les distances proches que pour les distances lointaines. L'angle de vergence co-variait donc avec la stabilité posturale : plus l'angle de vergence était important, plus la posture était stable. Par ailleurs, la co-variation était significative. Ainsi sur la base de ces résultats, nous pouvons conclure que la dépendance de la stabilité posturale par rapport à la distance de fixation fait intervenir l'angle de convergence : un angle de convergence élevé en fixation proche induit une posture plus stable.

Les mécanismes impliquant l'angle de convergence dans l'effet de la distance sur la posture pourraient être les signaux oculomoteurs efférents et proprioceptifs afférents issus des muscles extraoculaires. Ces signaux interviendraient sur le contrôle postural via leur interaction avec les signaux proprioceptifs des muscles de la nuque (André-Deshays et al. 1988, 1991; Han et Lennerstrand 1998; Corneil et al. 2004; Chapitre 3), dont nous connaissons l'importance dans le contrôle de la posture (Jackson et Epstein 1995; Buckley et al. 2005; Paloski et al. 2006, Chapitre 3). La contribution respective de ces deux types de signaux oculaires (oculomoteurs efférents et proprioceptifs afférents) reste encore à déterminer. En effet, le rôle des signaux oculaires (efférents et proprioceptifs) dans l'implication de l'angle de vergence dans l'effet de la distance est hypothétique ; de même en ce qui concerne leur interaction avec l'activité des muscles cervicaux.

Pour examiner le rôle des signaux proprioceptifs, la méthode par vibration peut être employée. Roll et al. (1989) ont montré que la vibration des muscles extraoculaires modifie l'orientation de la posture. La vibration influence la proprioception extraoculaire qui, à son tour, modifie l'orientation du corps. Notons que les auteurs rapportent que la vibration des muscles extraoculaires n'entraîne pas de mouvements oculaires (Roll et al., 1991). Ainsi, il est

possible d'induire des signaux oculaires proprioceptifs afférents signalant une convergence « illusoire » en l'absence de signaux oculomoteurs efférents.

Le couplage éventuel entre les signaux proprioceptifs extraoculaires et les signaux proprioceptifs des muscles de la nuque peut être examiné par électromyographie. L'électromyographie est destinée à mesurer l'activité des muscles de la nuque et la vibration, appliquée sur les muscles extraoculaires, sert à provoquer la sensation illusoire de convergence oculaire. Si le couplage existe, le pattern d'activité des muscles de la nuque devrait être similaire entre une situation où les sujets réalisent une convergence et la situation où la vibration entraîne l'envoi de signaux proprioceptifs extraoculaires équivalents à ceux pendant une réelle convergence des yeux.

Pour examiner le rôle des signaux oculomoteurs en l'absence de signaux afférents, nous pouvons coupler l'usage des prismes convergents avec la vibration extraoculaire. Rappelons que les prismes stimulent la convergence oculaire, et donc implique l'envoi de signaux oculomoteurs efférents (voir étude 1). Cependant, la convergence oculaire entraîne aussi l'envoi de signaux proprioceptifs extraoculaires. Pour « atténuer » l'information des signaux proprioceptifs lors de la convergence réelle, la vibration des muscles extraoculaires informant le SNC d'un relâchement « illusoire » de la convergence peut être envisagée.

L'expérience avec les prismes (étude 1) a montré que la convergence de disparité (ou fusionnelle) améliore la stabilité posturale. Cependant, hormis la disparité, la convergence oculaire est aussi stimulée par d'autres signaux tels que la sensation de proximité (vergence proximale) et l'accommodation (vergence accommodative, voir Chap. 2). Le rôle respectif de ces deux types de vergence sur le contrôle postural reste à déterminer. Par exemple, la stimulation de la vergence accommodative, en l'absence de vergence de disparité, peut être réalisée selon le protocole de Han et Lennerstrand (1998, voir Fig. 20, Chap. 3). En effet, les auteurs ont utilisé des diodes de stimulation et ont recouvert un œil de manière à entraîner une vergence accommodative en absence de disparité binoculaire. Pour résumer, les perspectives d'études nouvelles, ayant pour objectif d'approfondir les mécanismes d'action et d'interaction entre la vergence oculaire et le contrôle postural, sont multiples.

2 – Interaction entre l'angle de la convergence et l'entrée visuelle

Vision binoculaire versus monoculaire

Plusieurs fonctions visuelles sont supérieures en vision binoculaire qu'en vision monoculaire (McKnight et al., 1991). Cependant, la supériorité de la vision binoculaire ne semble pas systématique au niveau postural (Fox 1990; Isotalo et al. 2004). Dans l'étude 2, nous avons réexaminé l'influence de la vision binoculaire *versus* monoculaire sur la posture en tenant compte de l'angle de vergence : $8,6^\circ$ à une distance de 40 cm et $1,7^\circ$ à 200 cm. En vision binoculaire, la stabilité posturale a diminué significativement avec l'augmentation de la distance alors qu'en vision monoculaire, la posture était aussi stable en distance proche qu'en distance lointaine. L'effet différentiel de la distance entre la vision binoculaire et monoculaire peut être attribué à l'angle de convergence, à la sensibilité au mouvement visuel consécutif aux oscillations posturales ou aux facteurs attentionnels.

En vision binoculaire, la différence d'angle de vergence entre la fixation à 40 cm et à 200 cm est de l'ordre de 6° . Une telle différence pourrait ainsi entraîner un effet significatif de la distance sur la posture. En vision monoculaire, la différence de l'angle de vergence entre les deux distances pourrait être moins importante (i.e. $< 6^\circ$). L'effet de la distance serait alors moins marqué en vision monoculaire qu'en vision binoculaire. Pour valider une telle hypothèse, des enregistrements oculographiques seraient donc nécessaires.

Les oscillations posturales dans le plan antéropostérieur et médio-latéral engendrent respectivement un mouvement visuel en profondeur et en latéralité. La sensibilité au mouvement visuel en profondeur est basée sur la disparité binoculaire alors que celle au mouvement en latéralité repose sur des indices monoculaires. La sensibilité des deux types de mouvement décroît avec la distance. Cependant, la diminution est plus forte pour la sensibilité au mouvement en profondeur basée sur la disparité binoculaire (voir Fig. 30), d'où une posture plus instable avec la distance en vision binoculaire. Pour tester une telle hypothèse, un dispositif permettant de moduler la sensibilité au mouvement en profondeur serait nécessaire. Ce dispositif pourrait, à une distance donnée, augmenter la sensibilité au mouvement en profondeur au même niveau que celui de la sensibilité au mouvement en latéralité. Ainsi, pour une sensibilité au mouvement en profondeur et en latéralité similaire, à une distance donnée, la posture devrait être aussi stable entre la vision binoculaire et monoculaire.

Il est possible qu'en vision monoculaire et lointaine, le système postural, ayant peu d'indices visuels, utilise un mode plus « attentionnel » du contrôle de la posture. Les

oscillations posturales seraient plus serrées et la posture plus stable atténuant ainsi l'effet de la distance. Pour mettre en évidence la composante attentionnelle, le paradigme double tâche (posture et tâche cognitive) pourrait être envisagé. En effet, l'exécution de deux tâches (posture et tâche cognitive) mobilise plus de ressources attentionnelles que celles durant la posture seulement. Ainsi, l'addition d'une tâche cognitive au contrôle postural en vision binoculaire devrait entraîner une absence d'effet de distance de la même manière qu'en vision monoculaire, mais sans seconde tâche.

Ainsi, l'étude 2 suggère que le privilège de la vision binoculaire ne s'observe pas au niveau postural : avec la distance, la surface du CdP a significativement augmenté en vision binoculaire. Cependant, doit-on considérer cette augmentation comme anormale ? En effet, dans le premier chapitre, nous avons présenté l'effet de la distance se traduisant par une augmentation des oscillations posturales. Selon cette considération, il serait donc plus approprié de qualifier l'absence d'effet de distance en vision monoculaire comme « anormale ». L'examen des données posturographiques montre, cependant, que les valeurs des différents paramètres (i.e. surface, SDx, SDy et variance de vitesse) en vision binoculaire et monoculaire restent physiologiques. Par exemple, la surface moyenne des différentes conditions de l'étude 2 est dans les normes de l'AFP (i.e. entre 31 et 210 mm²). L'absence d'effet de distance en vision monoculaire ne résulte pas de valeurs posturographiques particulièrement faibles. Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'absence d'effet de distance pourrait être attribuée à des facteurs attentionnels qui entraîneraient une rigidité de la posture. Une étude récente a montré que la peur de chuter induisait, chez les sujets, un état d'anxiété se traduisant par une posture plus rigide (Brown et al., 2006). Une autre étude a observé que les facteurs émotionnels liés à l'anxiété ont atténué l'amplitude du réflexe musculaire du *soleus* suggérant des contractions musculaires volontaires du sujet (Sibley et al., 2007). Autrement dit, au même titre que les signes d'instabilité posturale, il existerait aussi des signes anormaux de stabilité posturale liés à la rigidité. Ainsi, la présence de l'effet de distance en vision binoculaire serait un comportement normal lié à un mode « relâché » du contrôle de la posture. Dans la suite de cette problématique vision binoculaire/monoculaire, distance et attention, il serait intéressant d'entreprendre des études chez des sujets avec des pathologies oculaires affectant les fonctions visuo-motrices (e.g. strabisme avant et après chirurgie).

Test de Romberg : signaux visuels et signaux oculomoteurs

La vision joue un rôle majeur dans la stabilité posturale. En effet, le test de Romberg montre, en général, une posture plus stable en condition yeux ouverts qu'en condition yeux fermés. La distance influence aussi la stabilité posturale (Bles et al. 1980; Brandt et al. 1986; Paulus et al. 1989). Dans l'étude 3, nous avons réexaminé le test de Romberg (yeux ouverts *versus* yeux fermés) à 40 et à 200 cm dont nous avons calculé, pour chacune des distances, le quotient de Romberg (yeux ouverts / yeux fermés). Le quotient était significativement plus élevé à 40 cm qu'à 200 cm. Le résultat suggère donc que l'utilisation d'indices visuels n'est pas systématiquement source de stabilité posturale. Elle dépendrait de la distance et pourrait impliquer les signaux oculomoteurs et proprioceptifs issus des muscles extraoculaires liés à l'angle de convergence (voir partie 1 du chapitre). En effet, l'angle de convergence est plus élevé à 40 cm qu'à 200 cm (i.e. 8,6° et 1,7° respectivement). Un angle de convergence plus important pourrait expliquer une posture plus stable ainsi qu'un quotient de Romberg plus élevé à 40 cm qu'à 200 cm.

L'étude 3 apporte ainsi un éclairage nouveau sur le test de Romberg : en distance proche, le système postural n'utiliserait pas seulement les indices visuels mais aussi des indices oculomoteurs pour contrôler la stabilité du corps. Pour les distances lointaines et intermédiaires, le système postural pourrait utiliser davantage d'autres signaux tels que les signaux proprioceptifs, somesthésiques et vestibulaires (voir le modèle conceptuel Fig. 35). Notre étude soulève des enjeux importants puisque le test de Romberg est couramment employé dans divers travaux de recherche qui utilisent rarement la même distance. Enfin, la distance (critique) à partir de laquelle le système postural utilise peu les indices visuo-moteurs reste à déterminer. Selon la seconde expérience de l'étude 3, cette distance serait comprise entre 40 et 90 cm chez le sujet jeune et sain. Bien qu'elle puisse varier d'une personne à une autre, il est possible qu'elle soit comprise dans cette fourchette de distances faible. Cependant, il est possible que la distance critique diffère en fonction des populations étudiées (personnes âgées ou sujets présentant une pathologie). Par exemple, les sujets âgés et sans pathologie, ayant une diminution de plusieurs fonctions visuelles, devraient présenter une distance critique plus faible que celle de sujets plus jeunes et sains. Notons que la distance maximale d'accommodation chez la personne âgée est d'environ 60 cm (soit 1,67 dioptries sphériques). Sur la base de l'étude 3, nous suggérons une nouvelle interprétation du test de Romberg. Le test ne reflète pas uniquement l'influence de la vision mais la prépondérance de certaines entrées sensorielles par rapport à d'autres à une distance donnée (voir le modèle conceptuel

Fig. 35). Nous appelons donc à un déploiement systématique du test de Romberg sur différentes distances (e.g. 20 à 300 cm), afin de déterminer plus précisément la nature des différentes sources prépondérantes dans le contrôle postural en fonction de la distance.

3 – Signes précoces du vieillissement sur la posture et rôle de l'angle de la convergence sur le contrôle postural chez le sujet âgé

Les études antérieures en posture orthostatique ont observé que divers paramètres posturographiques étaient sensibles aux effets du vieillissement (Chapitre 4). Par exemple, Teasdale et al. (1991) ont observé que la vitesse du centre de pression était sensible à l'âge alors que pour Rogind et al. (2003), le paramètre sensible était la surface du CdP. Afin de déterminer quel serait le paramètre le plus sensible à l'âge, dans les études 1, 2 et 3, nous avons comparé la stabilité posturale entre des sexagénaires et des sujets jeunes (âgés de 25 à 33 ans). L'intérêt de ces trois études réside d'une part, sur l'âge moyen des sujets âgés qui était inférieur à celui des études menées dans ce domaine et, d'autre part, sur l'analyse qui portait sur plusieurs paramètres (i.e. la surface du centre de pression, les écarts-types des oscillations antéropostérieures et médio-latérales et la variance de vitesse). En effet, les travaux menés dans ce domaine n'ont, en général, examiné qu'un seul paramètre. Notons que nos sujets âgés étaient en bonne santé et exerçaient une activité professionnelle et/ou physique. Pour les trois études, nous avons montré que, chez les sexagénaires, la variance de vitesse était le paramètre le plus sensible à l'âge. Pour les paramètres spatiaux (i.e. surface, SDx et SDy), les sujets âgés et les sujets jeunes ont présenté des résultats similaires. Ainsi, l'effet du vieillissement sur la posture affecterait, dans un premier temps, la dynamique des excursions du CdP en termes de variation de la vitesse. Ce paramètre est lié à l'activité des muscles des membres inférieurs. En effet, Wang et al. (2006) ont montré une corrélation entre le taux élevé de changement de la position du CdP et l'augmentation de l'activité des muscles des membres inférieurs avec l'âge. Cette interprétation est en accord avec les travaux d'Amiridis et al. (2003), Benjuya et al. (2004) et Jonsson et al. (2005) qui ont montré que les personnes âgées présentaient une forte activité des muscles *anterior tibialis* et du gastrocnémien. Il serait important de suivre l'évolution de l'équilibre postural des mêmes sujets avec des examens oculomoteurs pour déterminer les processus physiologiques du vieillissement normal.

Nos études sur les paramètres sensibles au vieillissement soulèvent, d'une manière générale, la pertinence des paramètres posturographiques. Par exemple, dans la littérature, une distinction est faite entre les oscillations antéropostérieures et médio-latérales en termes de stratégies de contrôle. Par exemple, en position standard de Romberg, les oscillations avant/arrière seraient contrôlées par une stratégie de cheville alors que la gestion des oscillations gauche/droite serait basée sur une stratégie des hanches (Winter et al., 1996, Chap. 1). Par ailleurs, il existe un paramètre permettant d'évaluer l'indépendance des oscillations antéropostérieures par rapport aux oscillations médio-latérales : l'inter corrélation X Y. Selon les normes 85 de l'A.F.P., une telle indépendance est représentée par un tracé non sinusoïdal de l'inter corrélation X-Y durant l'acquisition posturographique (Gagey et Weber 1999). Certaines données de la littérature semblent en faveur d'une indépendance des deux stratégies. Par exemple, Brandt (1999) a observé que l'effet de la distance était significatif autant pour les oscillations dans le plan antéropostérieur que dans le plan médio-latéral. Cependant, l'effet de distance était plus marqué pour les oscillations avant/arrière. D'autres travaux, plus récents, utilisant les deux paramètres ont aussi obtenu des effets plus importants dans leurs conditions expérimentales sur un des deux paramètres. Par exemple, Prado et al. (2007) ont montré que les sujets âgés présentaient une augmentation des oscillations dans les deux plans en condition yeux fermés par rapport à la condition yeux ouverts, alors que les sujets jeunes présentaient une augmentation similaire seulement sur les oscillations antéropostérieures. De même, Nagy et al. (2007) ont examiné l'effet d'un entraînement de huit semaines sur l'équilibre postural de sujets âgés. L'effet de l'entraînement était significatif seulement sur les oscillations médio-latérales. Une récente étude menée par l'équipe de Prince (Savoie et al. 2007) modère, cependant, la relative indépendance des deux systèmes. En effet, les auteurs ont observé que l'utilisation d'appareils chirurgicaux tels que le laparoscope entraînait une augmentation des oscillations autant dans le plan antéropostérieur que médio-latéral. De même, Hong et al. (2007) modèrent aussi la notion d'indépendance des deux stratégies et suggèrent qu'elle serait fonction de la position des pieds. Les deux stratégies seraient plus dépendantes en position sensibilisée de Romberg (un pied devant l'autre) qu'en position standard de Romberg (les deux pieds face à face et écartés à 30°). Enfin, deux autres études ont obtenu des résultats qui pourraient profondément remettre en cause la notion d'indépendance des deux stratégies. Wang et al. (2006) ont étudié la relation entre l'amplitude des oscillations dans le plan antéropostérieur et médio-latéral, mesurée en début de saison, et la blessure de la cheville acquise en cours de saison chez quarante-deux joueurs de basket-ball. Les auteurs ont constaté que les joueurs qui, en début de saison, ont présenté de fortes

oscillations posturales dans les deux plans ont eu, plus tard, une blessure de la cheville. Si la stratégie de cheville était responsable du contrôle des oscillations avant arrière, seule l'augmentation des oscillations dans ce plan aurait dû être observée chez les joueurs qui allaient se blesser. Or, les auteurs de l'étude concluent que l'augmentation des oscillations dans les deux plans serait prédictive d'une blessure à la cheville. Les résultats de Vaillant et al. (2008) suggèrent une incohérence similaire. Les auteurs ont examiné l'effet d'un traitement thérapeutique des chevilles sur l'équilibre postural de sujets âgés. Suite au traitement, les auteurs ont observé une diminution des oscillations autant dans le plan avant arrière que gauche droite. Or, l'indépendance des deux stratégies aurait dû entraîner une amélioration uniquement pour les oscillations antéropostérieures. Concernant nos études, les différentes conditions expérimentales ont eu des effets différents sur les oscillations antéropostérieures et médio-latérales. Par exemple, l'effet stabilisateur de l'œil directeur ouvert par rapport à l'œil non directeur ouvert a été observé seulement pour les SDy (étude 2). De même, l'effet stabilisateur des saccades n'a été obtenu que sur les SDy (étude 4). Ainsi, nos résultats sont en faveur d'une relative indépendance des oscillations A/P vis-à-vis des oscillations M/L. Cependant, nos données ne permettent pas de déterminer si les oscillations A/P et M/L sont contrôlées respectivement par une stratégie des chevilles et des hanches. Des travaux permettant de mieux comprendre la relation entre les stratégies de chevilles, et de hanches et les oscillations dans le plan A/P et M/L, seraient nécessaires.

La surface du CdP contient 90% des positions du CdP les plus proches de la position moyenne du CdP. Sa taille dépend donc de l'amplitude des oscillations antéropostérieures et des oscillations médio-latérales. Une telle dépendance suggère qu'une élévation des oscillations antéropostérieures et/ou médio-latérales devrait entraîner systématiquement une élévation de la surface du CdP. Autrement dit, la surface et les oscillations A/P et M/L apporteraient des informations redondantes. Les résultats de nos études montrent le contraire. En effet, seule l'étude 1 a montré un effet significatif de la distance sur tous ces paramètres. Dans les autres études, nos conditions expérimentales ont eu une influence significative sur certains de nos paramètres. Par exemple, l'effet spécifique de la distance sur la vision binoculaire par rapport à la vision monoculaire n'a été observé que pour la surface du CdP (étude 2).

Sur la base de nos études, les paramètres utilisés (i.e. surface, SDx, SDy et variance de vitesse) n'apportent donc pas d'informations redondantes. En conséquence, la signification physiologique de chacun de nos paramètres devrait être différente. La surface correspond à la qualité de l'équilibre général du corps : une surface élevée est signe d'une posture

globalement instable. Le paramètre de la surface a été très sensible aux nombreuses conditions examinées dans nos études. Le paramètre a toujours augmenté avec la distance (études 1, 2, 3, 4 et 5), en condition yeux fermés par rapport à la condition yeux ouverts (étude 3) et a diminué lors du port de prismes convergents chez des sujets sans pathologie (études 1 et 4). Les oscillations posturales dans le plan antéropostérieur permettent d'évaluer la qualité de la stratégie des chevilles. Ce paramètre était particulièrement discriminant dans les études 2, 3 et 4. Les oscillations dans le plan antéropostérieur étaient plus faibles en vision incluant l'œil directeur (étude 2). De plus, elles étaient corrélées avec la valeur de l'angle de vergence (étude 3) et diminuaient en condition saccade par rapport à la condition fixation. Les interprétations de ces résultats faisaient toujours intervenir la notion de profondeur. En effet, la détection de la modification de la taille angulaire de la cible fixée durant la posture serait meilleure avec l'œil directeur ouvert (étude 2). L'angle de vergence s'ajuste en fonction de la distance de fixation ; elle implique donc les oscillations dans le plan A/P (étude 3). Enfin, la réduction des oscillations dans le plan A/P durant les saccades serait attribuée au maintien de la taille angulaire et de la distance angulaire des cibles qui induisent les saccades (étude 4). Le contrôle des oscillations dans le plan médio-latéral est lié aux stratégies des hanches. Ce paramètre était sensible à l'effet de la distance mais de manière moins systématique que la surface. Enfin, comme il a été mentionné précédemment, la variance de vitesse est le paramètre le plus sensible au vieillissement (études 1, 2 et 3). En résumé, hormis les écarts-types des oscillations médio-latérales, les différents paramètres ont apporté des informations spécifiques et complémentaires dans le contrôle de la posture : la surface, en ce qui concerne l'équilibre général de la posture, les oscillations antéropostérieures associées aux composantes visuelles et oculomotrices liées à la profondeur et la variance de vitesse qui correspond à l'énergie « dépensée » par les muscles des jambes dans le maintien de la posture. Suite à ces considérations concernant les paramètres posturographiques, nous allons aborder l'effet de l'angle de vergence chez le sujet âgé.

Les sexagénaires, au même titre que les sujets jeunes, ont montré une stabilité posturale plus élevée en vision proche qu'en vision lointaine (études 1, 2 et 3), et une posture plus stable en vision lointaine à travers les prismes convergents qu'en vision lointaine sans prisme (étude 1). Ces résultats indiquent qu'en dépit de la baisse de certaines fonctions visuelles (Tran et al. 1998; Ivers et al. 2000; Wist et al. 2000; Laitinen et al. 2005) et oculomotrices avec l'âge (Leibowitz et Shupert 1985; Rambold et al. 2006; Yang et Kapoula. 2006a, 2006b; Yang et al. 2006), l'influence de l'angle de convergence sur la stabilité

posturale reste préservée chez le sujet âgé. Cependant, la préservation de l'effet de l'angle de vergence n'a été constatée que pour une distance de 40 cm et que pour des prismes de faible puissance (5 Δ sur chaque œil). Des investigations futures sur l'effet de distances plus faibles (e.g. entre 10 et 40 cm) ou de prismes convergents plus importants (> 5 Δ par œil) entre des sujets jeunes et des sujets âgés de profil proche de celui de nos études 1, 2 et 3 seraient nécessaires. Il est possible que dans ces conditions où l'effort de vergence est très important, les sujets âgés présentent des signes d'instabilité posturale sur d'autres paramètres que la variance de vitesse seulement ; ou bien, au contraire, des signes de rigidité. Cela reste à montrer.

4 – Rôle de l'angle de la convergence durant l'exécution de saccades oculaires

L'influence des saccades oculaires sur la posture diffère selon les études : absence d'effet (White et al. 1980), influence stabilisatrice (Uchida et al. 1979) ou déstabilisatrice (Brandt et al. 1999). Nous avons mené une étude qui s'inscrit dans la continuité de ces différents travaux en examinant les saccades horizontales et verticales par rapport à la fixation, et en prenant en compte l'angle de convergence (8,6° à 40 cm et 1,7° à 200 cm, étude 4). Nous avons retrouvé l'effet classique de la distance (i.e. amélioration de la stabilité posturale en vision proche) aussi bien en condition saccade qu'en condition fixation. Enfin, le résultat majeur de l'étude est la meilleure stabilisation de la posture durant les saccades (horizontales et verticales) en comparaison avec la fixation. L'amélioration s'est traduite par une réduction des oscillations dans le plan antéropostérieur. Notre résultat suggère donc un effet plutôt stabilisateur des saccades sur la posture. L'effet stabilisateur des saccades peut être attribué à l'intégration par le système postural des signaux oculomoteurs, proprioceptifs issus des muscles extraoculaires, et les décharges corollaires liées à la réalisation de la saccade. De plus, la stabilisation plus importante de la posture durant les saccades pourrait aussi être attribuée à des facteurs attentionnels. En effet, la réalisation répétée de saccades pourrait entraîner le système postural à utiliser un mode de contrôle de la posture « plus attentionnel » que durant la fixation. Des études nouvelles, testant les saccades avec ou sans couplage avec l'attention visuelle (e.g. paradigme de Posner), seraient intéressantes à étudier.

5 – Rôle de l'angle de la convergence chez le sujet présentant des symptômes de fatigue visuelle, céphalées et vertiges

Les symptômes de fatigue visuelle, céphalées et vertiges (FVCV) sont associés à des troubles de la vergence. Sachant l'importance de l'angle de vergence sur la stabilité posturale (voir études 1, 2, et 3), nous avons comparé le contrôle postural entre des sujets avec FVCV et des sujets asymptomatiques (étude 5).

Les sujets avec FVCV étaient plus instables en condition yeux fermés par rapport aux sujets témoins dans la même condition. De même, les sujets avec FVCV ont présenté une posture plus instable durant la condition prisme que durant la condition sans prisme, alors que les sujets témoins ont montré une posture plus stable en condition prisme qu'en condition sans prisme. Enfin, suite à la rééducation orthoptique, les performances posturales des sujets avec FVCV ont été améliorées partiellement. Ces résultats seraient attribués à l'appauvrissement des signaux oculomoteurs de la vergence chez les sujets avec FVCV. Ces signaux constitueraient ainsi une source importante d'instabilité en condition yeux fermés. La détérioration de la posture provoquée par les prismes chez les sujets avec FVCV pourrait être liée à des anomalies de la vergence (i.e. latence longue, vitesse lente et durée longue). La rééducation orthoptique n'a amélioré ces anomalies que partiellement. Des techniques de rééducation dynamiques et spécifiques doivent être développées. Par ailleurs, des études futures avec des enregistrements oculomoteurs seraient nécessaires pour objectiver le lien entre le dysfonctionnement de la vergence et l'équilibre postural.

Nous avons examiné l'effet d'une hétérophorie verticale, induite expérimentalement par le port d'un prisme de 2Δ devant un œil, sur l'équilibre postural chez des sujets sains (i.e. orthophoriques, voir Matheron et al., 2007). Le prisme a entraîné, entre autres, une diminution de la stabilité posturale lorsqu'il était posé devant l'œil non directeur. Ainsi, comme pour les troubles de la vergence, la vergence en réponse à l'hétérophorie verticale induite par le prisme aurait une influence sur la stabilité posturale chez des sujets sains. Les futures études menées par Matheron, dans le cadre de sa thèse, visent à démontrer la relation directe entre l'hétérophorie verticale et la posture chez des personnes présentant des douleurs chroniques.

II – Conclusion

Dans le domaine de la posture orthostatique, la plupart des études menées jusqu'à présent ont examiné l'influence de la vision, du système vestibulaire, de la somesthésie et de la proprioception générale sur le contrôle postural. Les travaux menés dans cette thèse mettent en évidence le rôle de systèmes peu étudiés dans ce domaine : la vergence oculomotrice et sa proprioception. Nos travaux s'inscrivent parmi des études récentes qui montrent que l'oculomotricité et la proprioception des muscles extraoculaires jouent un véritable rôle dans le contrôle postural. Les muscles extraoculaires sont riches en récepteurs proprioceptifs (fuseaux neuromusculaires, terminaisons en palissade, organes de Golgi, voir Buttner-Ennever et Buttner, 1992; Büttner-Ennever, 2006) dont l'intégration de la position du regard, chez le singe, est réalisée au niveau du cortex somatosensoriel (Wang et al., 2007). Nos données encouragent le développement de travaux permettant de quantifier davantage la contribution de la proprioception extraoculaires et des signaux efférents oculomoteurs dans le contrôle de la posture.

Les perspectives possibles issues des études réalisées dans cette thèse peuvent être multiples. Rappelons, par exemple, les différents travaux qu'il faudrait mener pour déterminer le rôle respectif des signaux oculomoteurs, des signaux proprioceptifs extraoculaires, de la vergence accommodative, et de l'attention. Tout reste à démontrer. Concernant les travaux que nous avons menés en clinique (étude 5), on voit l'intérêt de protocoles expérimentaux destinés à objectiver et à confirmer la présence de troubles de vergence, mesurées actuellement par des tests cliniques subjectifs. Enfin, l'examen de la vergence oculomotrice chez la personne âgée ainsi qu'un bilan postural, en relation avec la vergence, peuvent constituer des outils importants dans le diagnostic et la prise en charge de personnes susceptibles de faire une chute. Le système de la vergence, impliqué dans la perception de la profondeur, constituerait une véritable source de « calibrage » pour le système postural.

Références

- A.F.P (1985) Normes 85. In: Gagey PM, Gentaz R, Guillanon JL, Bizzo G, Bodot-Brégeard C, Debruille C, Baudry J (eds), Paris
- Airiani S, Braunstein RE (2006) Accommodative spasm after laser-assisted in situ keratomileusis (LASIK). *Am J Ophthalmol*, 141: 1163-1164
- Amiridis IG, Hatzitaki V, Arabatzi F (2003) Age-induced modifications of static postural control in humans. *Neurosci Lett*, 350: 137-140
- André-Deshays C, Berthoz A, Revel M (1988) Eye-head coupling in humans. I. Simultaneous recording of isolated motor units in dorsal neck muscles and horizontal eye movements. *Exp Brain Res*, 69: 399-406
- André-Deshays C, Revel M, Berthoz A (1991) Eye-head coupling in humans. II. Phasic components. *Exp Brain Res*, 84: 359-366
- Anoh-Tanon MJ, Bremond-Gignac D, Wiener-Vacher SR (2000) Vertigo is an underestimated symptom of ocular disorders: dizzy children do not always need MRI. *Pediatr Neurol*, 23: 49-53
- Aufauvre V, Kemoun G, Carette P, Bergeal E (2005) [Home postural evaluation in the elderly: comparison between fallers and non fallers]. *Ann Readapt Med Phys*, 48: 165-171
- Benjuya N, Melzer I, Kaplanski J (2004) Aging-induced shifts from a reliance on sensory input to muscle cocontraction during balanced standing. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 59: 166-171
- Berthoz A, Vidal PP, Corvisier (1982) Brain stem neurons mediating horizontal eye position signals to the dorsal neck muscles. In: Roucoux A, Crommelink M (eds) *Physiological and pathological aspects of eye movements*. Junk, The Hague, Boston, London, pp 383-398
- Berthoz A, Yoshida K, Vidal PP (1981) Horizontal eye movement sensitivity in the second order vestibular nuclei neurons in the cat. In: Cohen B (ed) *Vestibular and oculomotor physiology*. ANYAS, New York, pp 144-156
- Blaszczyk JW, Klonowski W (2001) Postural stability and fractal dynamics. *Acta Neurobiol Exp (Wars)*, 61: 105-112
- Blaszczyk JW, Prince F, Raiche M, Hebert R (2000) Effect of ageing and vision on limb load asymmetry during quiet stance. *J Biomech*, 33: 1243-1248
- Bles W, Kapteyn TS, Brandt T, Arnold F (1980) The mechanism of physiological height vertigo. II. Posturography. *Acta Otolaryngol*, 89: 534-540

- Blumer R, Lukas JR, Aigner M, Bittner R, Baumgartner I, Mayr R (1999) Fine structural analysis of extraocular muscle spindles of a two-year-old human infant. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 40: 55-64
- Blumer R, Lukas JR, Wasicky R, Mayr R (2000) Presence and morphological variability of Golgi tendon organs in the distal portion of sheep extraocular muscle. *Anat Rec*, 258: 359-368
- Bonanni M, Newton R (1998) Test-retest reliability of the Fukuda Stepping Test. *Physiother Res Int*, 3: 58-68
- Bosek M, Grzegorzewski B, Kowalczyk A, Lubinski I (2005) Degradation of postural control system as a consequence of Parkinson's disease and ageing. *Neurosci Lett*, 376: 215-220
- Brandt T (1999) Vision and posture. In: Brandt T (ed) *Vertigo: Its Multisensory Syndromes*. Springer, London, Univ. of Munich, Germany.
- Brandt T, Paulus W, Straube A (1986) In: Bles W, Brandt T (eds) *Disorders of posture*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, New-York, Oxford
- Bronstein AM, Buckwell D (1997) Automatic control of postural sway by visual motion parallax. *Exp Brain Res*, 113: 243-248
- Brown LA, Polych MA, Doan JB (2006) The effect of anxiety on the regulation of upright standing among younger and older adults. *Gait Posture*, 24: 397-405
- Bryant EC, Trew ME, Bruce AM, Kuisma RM, Smith AW (2005) Gender differences in balance performance at the time of retirement. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 20: 330-335
- Bucci MP, Kapoula Z, Bremond-Gignac D, Wiener-Vacher S (2006) Binocular coordination of saccades in children with vertigo: dependency on the vergence state. *Vision Res*, 46: 3594-3602
- Bucci MP, Kapoula Z, Yang Q, Bremond-Gignac D, Wiener-Vacher S (2004a) Speed-accuracy of saccades, vergence and combined eye movements in children with vertigo. *Exp Brain Res*, 157: 286-295
- Bucci MP, Kapoula Z, Yang Q, Wiener-Vacher S, Bremond-Gignac D (2004b) Abnormality of vergence latency in children with vertigo. *J Neurol*, 251: 204-213
- Buckley JG, Anand V, Scally A, Elliott DB (2005) Does head extension and flexion increase postural instability in elderly subjects when visual information is kept constant? *Gait Posture*, 21: 59-64
- Büttner-Ennever JA (2006) In: Büttner-Ennever JA (ed) *Progress in brain research: Neuroanatomy of the oculomotor system*, vol 151. Elsevier Science Publishing Company
- Buttner-Ennever JA, Buttner U (1992) Neuroanatomy of the ocular motor pathways. *Baillieres Clin Neurol*, 1: 263-287

Capobianco NM (1952) The subjective measurement of the near point of convergence and its significance in the diagnosis of convergence insufficiency. *Am Orthopt J*, 2: 40-42

Carpenter MG, Frank JS, Silcher CP (1999) Surface height effects on postural control: a hypothesis for a stiffness strategy for stance. *J Vestib Res*, 9: 277-286

Choy NL, Brauer S, Nitz J (2003) Changes in postural stability in women aged 20 to 80 years. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 58: 525-530

Clarke AH, Ditterich J, Druen K, Schonfeld U, Steineke C (2002) Using high frame rate CMOS sensors for three-dimensional eye tracking. *Behav Res Methods Instrum Comput*, 34: 549-560

Colby CL, Berman RA, Heiser LM, Saunders RC (2005) Corollary discharge and spatial updating: when the brain is split, is space still unified? *Prog Brain Res*, 149: 187-205

Collins JJ, De Luca CJ (1995) The effects of visual input on open-loop and closed-loop postural control mechanisms. *Exp Brain Res*, 103: 151-163

Corneil BD, Olivier E, Munoz DP (2004) Visual responses on neck muscles reveal selective gating that prevents express saccades. *Neuron*, 42: 831-841

Corriveau H, Hebert R, Prince F, Raiche M (2001) Postural control in the elderly: an analysis of test-retest and interrater reliability of the COP-COM variable. *Arch Phys Med Rehabil*, 82: 80-85

Corriveau H, Hebert R, Raiche M, Dubois MF, Prince F (2004a) Postural stability in the elderly: empirical confirmation of a theoretical model. *Arch Gerontol Geriatr*, 39: 163-177

Corriveau H, Hebert R, Raiche M, Prince F (2004b) Evaluation of postural stability in the elderly with stroke. *Arch Phys Med Rehabil*, 85: 1095-1101

Coubard OA, Kapoula Z (2006) Dorsolateral prefrontal cortex prevents short-latency saccade and vergence: a TMS study. *Cereb Cortex*, 16: 425-436

Dault MC, Frank JS, Allard F (2001) Influence of a visuo-spatial, verbal and central executive working memory task on postural control. *Gait Posture*, 14: 110-116

Daum KM (1983) Accommodative dysfunction. *Doc Ophthalmol*, 55: 177-198

Daum KM (1984) Predicting results in the orthoptic treatment of accommodative dysfunction. *Am J Optom Physiol Opt*, 61: 184-189

Doyle TL, Dugan EL, Humphries B, Newton RU (2004) Discriminating between elderly and young using a fractal dimension analysis of centre of pressure. *Int J Med Sci*, 1: 11-20

Du Pasquier RA, Blanc Y, Sinnreich M, Landis T, Burkhard P, Vingerhoets FJ (2003) The effect of aging on postural stability: a cross sectional and longitudinal study. *Neurophysiol Clin*, 33: 213-218

- Fitzpatrick RC, Taylor JL, McCloskey DI (1992) Ankle stiffness of standing humans in response to imperceptible perturbation: reflex and task-dependent components. *J Physiol*, 454: 533-547
- Fox CR (1990) Some visual influences on human postural equilibrium: binocular versus monocular fixation. *Percept Psychophys*, 47: 409-422
- Fu LN, Boothe RG (2001) A psychophysical measurement and analysis of motion perception in normal and binocularly deprived monkeys. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 42: 2547-2553
- Fuchs AF, Kaneko CR, Scudder CA (1985) Brainstem control of saccadic eye movements. *Annu Rev Neurosci*, 8: 307-337
- Gagey PM, Ouaknine M, Sasaki O (2001) Pour manifester la dynamique de la stabilisation: la plate-forme AFP40/16. In: Lacour M (ed) *Posture et Équilibre*. Nouveautés 2001, conceptuelles, instrumentales et cliniques. Solal, Marseille, pp 95-106
- Gagey PM, Weber B (1999) Stabilométrie. In: Masson E (ed) *Posturologie: régulation et dérèglements de la station debout*. Masson, Paris, pp 45-59
- Gentaz R (1988) [The postural eye]. *Agressologie*, 29: 685-686
- Gerr F, Letz R, Green RC (2000) Relationships between quantitative measures and neurologist's clinical rating of tremor and standing steadiness in two epidemiological studies. *Neurotoxicology*, 21: 753-760
- Glasauer S, Schneider E, Jahn K, Strupp M, Brandt T (2005) How the eyes move the body. *Neurology*, 65: 1291-1293
- Grantyn A, Berthoz A (1985) Burst activity of identified tecto-reticulo-spinal neurons in the alert cat. *Exp Brain Res*, 57: 417-421
- Grantyn A, Berthoz A (1987) Reticulo-spinal neurons participating in the control of synergic eye and head movements during orienting in the cat. I. Behavioral properties. *Exp Brain Res*, 66: 339-354
- Gravelle DC, Loughton CA, Dhruv NT, Katdare KD, Niemi JB, Lipsitz LA, Collins JJ (2002) Noise-enhanced balance control in older adults. *Neuroreport*, 13: 1853-1856
- Guerraz M, Gianna CC, Burchill PM, Gresty MA, Bronstein AM (2001) Effect of visual surrounding motion on body sway in a three-dimensional environment. *Percept Psychophys*, 63: 47-58
- Guerraz M, Sakellari V, Burchill P, Bronstein AM (2000) Influence of motion parallax in the control of spontaneous body sway. *Exp Brain Res*, 131: 244-252

Gutierrez-Farewik EM, Bartonek A, Saraste H (2006) Comparison and evaluation of two common methods to measure center of mass displacement in three dimensions during gait. *Hum Mov Sci*, 25: 238-256

Han Y, Lennerstrand G (1998) Effects of neck muscle proprioceptive activation on the dynamics of monocularly driven horizontal vergence movements. *Acta Ophthalmol Scand*, 76: 283-288

Hasebe H, Oyamada H, Kinomura S, Kawashima R, Ouchi Y, Nobezawa S, Tsukada H, Yoshikawa E, Ukai K, Takada R, Takagi M, Abe H, Fukuda H, Bando T (1999) Human cortical areas activated in relation to vergence eye movements-a PET study. *Neuroimage*, 10: 200-208

Hatzitaki V, Pavlou M, Bronstein AM (2004) The integration of multiple proprioceptive information: effect of ankle tendon vibration on postural responses to platform tilt. *Exp Brain Res*, 154: 345-354

Hertel J, Olmsted-Kramer LC (2006) Deficits in time-to-boundary measures of postural control with chronic ankle instability. *Gait Posture*,

Hong SL, Manor B, Li L (2007) Stance and sensory feedback influence on postural dynamics. *Neurosci Lett*, 423: 104-108

Horn G, Zdenek G (2004) Method and apparatus for the correction of presbyopia using high intensity focused ultrasound.

Huaman AG, Sharpe JA (1993) Vertical saccades in senescence. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 34: 2588-2595

Hytonen M, Pyykko I, Aalto H, Starck J (1993) Postural control and age. *Acta Otolaryngol*, 113: 119-122

Isa T, Kobayashi Y (2004) Switching between cortical and subcortical sensorimotor pathways. *Prog Brain Res*, 143: 299-305

Isotalo E, Kapoula Z, Feret PH, Gauchon K, Zamfirescu F, Gagey PM (2004) Monocular versus binocular vision in postural control. *Auris Nasus Larynx*, 31: 11-17

Ivers RQ, Mitchell P, Cumming RG (2000) Visual function tests, eye disease and symptoms of visual disability: a population-based assessment. *Clin Experiment Ophthalmol*, 28: 41-47

Jackson RT, Epstein CM (1991) Effect of head extension on equilibrium in normal subjects. *Ann Otol Rhinol Laryngol*, 100: 63-67

Jahn K, Strupp M, Krafczyk S, Schuler O, Glasauer S, Brandt T (2002) Suppression of eye movements improves balance. *Brain*, 125: 2005-2011

- Jonsson E, Seiger A, Hirschfeld H (2005) Postural steadiness and weight distribution during tandem stance in healthy young and elderly adults. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 20: 202-208
- Kapoula Z, Bucci MP (2007) Postural control in dyslexic and non-dyslexic children. *J Neurol*, 254: 1174-1183
- Kapoula Z, Bucci MP, Lê TT, Wiener-Vacher S, Bremond-Gignac D (2006) Syndrome pseudo vestibulaire, stabilité posturale et rôle de la vergence oculomotrice : étude des enfants, adultes et sujets âgés. In: *Journal Français d'Orthoptique* N° 38, p 287
- Kapoula Z, Evdokimidis I, Smyrnis N, Bucci MP, Constantinidis TS (2002) EEG cortical potentials preceding vergence and combined saccade-vergence eye movements. *Neuroreport*, 13: 1893-1897
- Kapoula Z, Le TT (2006) Effects of distance and gaze position on postural stability in young and old subjects. *Exp Brain Res*, 173: 438-445
- Kapoula Z, Lê TT (2007) L'effet de la distance sur le quotient de Romberg. In: Borel L, Lacour M (eds) *Posture et Equilibre. l'Association Française de Posturologie*
- Kapoula Z, Yang Q, Coubard O, Daunys G, Orssaud C (2005a) Contextual influence of TMS on the latency of saccades and vergence. *Neurosci Lett*, 376: 87-92
- Kapoula Z, Yang Q, Coubard O, Daunys G, Orssaud C (2005b) Role of the posterior parietal cortex in the initiation of saccades and vergence: right/left functional asymmetry. *Ann N Y Acad Sci*, 1039: 184-197
- Kavounoudias A, Gilhodes JC, Roll R, Roll JP (1999) From balance regulation to body orientation: two goals for muscle proprioceptive information processing? *Exp Brain Res*, 124: 80-88
- Kikukawa M, Taguchi K (1985) Characteristics of body sway during saccadic eye movement in patients with peripheral vestibular disorders. In: Igarashi M, Black FO (eds) *Vestibular and visual control on posture and locomotion equilibrium. 7th Int. Symp. Int. Posturography*. Karger, Basel, Houston, Texas, pp 355-359
- Kirshenbaum N, Riach CL, Starkes JL (2001) Non-linear development of postural control and strategy use in young children: a longitudinal study. *Exp Brain Res*, 140: 420-431
- Klam F, Graf W (2003) Vestibular signals of posterior parietal cortex neurons during active and passive head movements in macaque monkeys. *Ann N Y Acad Sci*, 1004: 271-282
- Lafond D, Corriveau H, Prince F (2004) Postural control mechanisms during quiet standing in patients with diabetic sensory neuropathy. *Diabetes Care*, 27: 173-178

Laitinen A, Koskinen S, Harkanen T, Reunanen A, Laatikainen L, Aromaa A (2005) A nationwide population-based survey on visual acuity, near vision, and self-reported visual function in the adult population in Finland. *Ophthalmology*, 112: 2227-2237

Lanska DJ (2002) The Romberg sign and early instruments for measuring postural sway. *Semin Neurol*, 22: 409-418

Lanska DJ, Goetz CG (2000) Romberg's sign: development, adoption, and adaptation in the 19th century. *Neurology*, 55: 1201-1206

Latash ML (2002) In: Latash ML (ed) *Bases neurophysiologiques du mouvement* (traduction de la 1ère édition par Delamarche P. et Delamarche A). DeBoeck Université, Lille, Paris.

Laughton CA, Slavin M, Katdare K, Nolan L, Bean JF, Kerrigan DC, Phillips E, Lipsitz LA, Collins JJ (2003) Aging, muscle activity, and balance control: physiologic changes associated with balance impairment. *Gait Posture*, 18: 101-108

Le TT, Kapoula Z (2006) Distance impairs postural stability only under binocular viewing. *Vision Res*, 46: 3586-3593

Le TT, Kapoula Z (2008) Role of ocular convergence in the Romberg quotient. *Gait Posture*, 27:493-500

Lê TT, Kapoula Z (2007) La distance détériore la stabilité posturale chez le sujet jeune et âgé seulement en vision binoculaire. In: Borel L, Lacour M (eds) *Posture et Equilibre*. l'Association Française de Posturologie

Ledin T, Fransson PA, Magnusson M (2004) Effects of postural disturbances with fatigued triceps surae muscles or with 20% additional body weight. *Gait Posture*, 19: 184-193

Leibowitz HW, Shupert CL (1985) Spatial orientation mechanisms and their implications for falls. *Clin Geriatr Med*, 1: 571-580

Leigh RJ, Zee DS (2006) In: Leigh RJ, Zee DS (eds) *The neurology of eye movements* (fourth edition). Oxford University Press, New-York Oxford

Lestienne F, Vidal PP, Berthoz A (1984) Gaze changing behaviour in head restrained monkey. *Exp Brain Res*, 53: 349-356

Lewis JW, Van Essen DC (2000) Mapping of architectonic subdivisions in the macaque monkey, with emphasis on parieto-occipital cortex. *J Comp Neurol*, 428: 79-111

Lord SR, Menz HB (2000) Visual contributions to postural stability in older adults. *Gerontology*, 46: 306-310

Magne P, Coello Y (2002) Retinal and extra-retinal contribution to position coding. *Behav Brain Res*, 136: 277-287

- Matheron E, Le TT, Yang Q, Kapoula Z (2007) Effects of a two-diopter vertical prism on posture. *Neurosci Lett*, 423: 236-240
- Mays LE (1984) Neural control of vergence eye movements: convergence and divergence neurons in midbrain. *J Neurophysiol*, 51: 1091-1108
- McKnight AJ, Shinar D, Hilburn B (1991) The visual and driving performance of monocular and binocular heavy-duty truck drivers. *Accid Anal Prev*, 23: 225-237
- Moschovakis AK, Scudder CA, Highstein SM (1996) The microscopic anatomy and physiology of the mammalian saccadic system. *Prog Neurobiol*, 50: 133-254
- Murray MP, Seireg AA, Sepic SB (1975) Normal postural stability and steadiness: quantitative assessment. *J Bone Joint Surg Am*, 57: 510-516
- Nagahori T, Hirashima Y, Umemura K, Nakagawa H, Kamisaki Y, Origasa H, Endo S (2004) Association of pontine small infarction (lacuna) with disturbance of postural stability. *Eur Neurol*, 51: 138-143
- Nagy E, Feher-Kiss A, Barnai M, Domjan-Preszner A, Angyan L, Horvath G (2007) Postural control in elderly subjects participating in balance training. *Eur J Appl Physiol*, 100: 97-104
- Nutt JG, Horak FB (2004) Classification of balance and gait disorders. In: Bronstein AM, Brandt T, Woolacott MH, Nutt JG (eds) *Clinical disorders of balance, posture and gait*. Elsevier, Amsterdam, New-York, Oxford, London, pp 63-64
- Oblak B, Gregoric M, Gyergyek L (1985) Effects of voluntary eye saccades on body sway. In: Igarashi M, Black FO (eds) *Vestibular and visual control on posture and locomotion equilibrium*. 7th Int. Symp. Int. Posturography. Karger, Basel, Houston, Texas, pp 122-126
- Oguz V, Iskeleli G (1985) L'évaluation du traitement de l'insuffisance de convergence. *Bull Soc Ophtalmol Fr*, 85: 311-312
- Ouaknine M, Hugon M, Roman S, Thomassin JM, Sarabian N, Regis J (2004) Effets posturaux du traitement par gamma knife des neurinomes de l'acoustique (schwannomes vestibulaires). *Neurochirurgie*, 50: 358-366
- Ouchi Y, Okada H, Yoshikawa E, Nobezawa S, Futatsubashi M (1999) Brain activation during maintenance of standing postures in humans. *Brain*, 122 (Pt 2): 329-338
- Paloski WH, Wood SJ, Feiveson AH, Black FO, Hwang EY, Reschke MF (2006) Destabilization of human balance control by static and dynamic head tilts. *Gait Posture*, 23: 315-323
- Passmore JW, Maclean F (1957) Convergence insufficiency and its managements; an evaluation of 100 patients receiving a course of orthoptics. *Am J Ophthalmol*, 43: 448-456

Paulus W, Straube A, Krafczyk S, Brandt T (1989) Differential effects of retinal target displacement, changing size and changing disparity in the control of anterior/posterior and lateral body sway. *Exp Brain Res*, 78: 243-252

Paulus WM, Straube A, Brandt T (1984) Visual stabilization of posture. Physiological stimulus characteristics and clinical aspects. *Brain*, 107 (Pt 4): 1143-1163

Pearce JM (2005) Romberg and his sign. *Eur Neurol*, 53: 210-213

Pierrot-Deseilligny C, Rivaud S, Gaymard B, Muri R, Vermersch AI (1995) Cortical control of saccades. *Ann Neurol*, 37: 557-567

Prado JM, Stoffregen TA, Duarte M (2007) Postural sway during dual tasks in young and elderly adults. *Gerontology*, 53: 274-281

Pyykko I, Jantti P, Aalto H (1990) Postural control in elderly subjects. *Age Ageing*, 19: 215-221

Rambold H, Neumann G, Sander T, Helmchen C (2006) Age-related changes of vergence under natural viewing conditions. *Neurobiol Aging*, 27: 163-172

Rey F, Le TT, Bertin R, Kapoula Z (2007) Saccades horizontal or vertical at near or at far do not deteriorate postural control. *Auris Nasus Larynx*,

Rogind H, Lykkegaard JJ, Bliddal H, Danneskiold-Samsoe B (2003) Postural sway in normal subjects aged 20-70 years. *Clin Physiol Funct Imaging*, 23: 171-176

Roll JP, Vedel JP, Roll R (1989) Eye, head and skeletal muscle spindle feedback in the elaboration of body references. *Prog Brain Res*, 80: 113-123; discussion 157-160

Roll R, Velay JL, Roll JP (1991) Eye and neck proprioceptive messages contribute to the spatial coding of retinal input in visually oriented activities.

Ruskell GL (1999) Extraocular muscle proprioceptors and proprioception. *Prog Retin Eye Res*, 18: 269-291

Savoie S, Tanguay S, Centomo H, Beauchamp G, Anidjar M, Prince F (2007) Postural control during laparoscopic surgical tasks. *Am J Surg*, 193: 498-501

Scheiman M, Cooper J, Mitchell GL, de LP, Cotter S, Borsting E, London R, Rouse M (2002) A survey of treatment modalities for convergence insufficiency. *Optom Vis Sci*, 79: 151-157

Scheiman M, Gallaway M, Frantz KA, Peters RJ, Hatch S, Cuff M, Mitchell GL (2003) Nearpoint of convergence: test procedure, target selection, and normative data. *Optom Vis Sci*, 80: 214-225

Schieppati M, Nardone A (1991) Free and supported stance in Parkinson's disease. The effect of posture and 'postural set' on leg muscle responses to perturbation, and its relation to the severity of the disease. *Brain*, 114 (Pt 3): 1227-1244

Scudder CA, Fuchs AF (1992) Physiological and behavioral identification of vestibular nucleus neurons mediating the horizontal vestibuloocular reflex in trained rhesus monkeys. *J Neurophysiol*, 68: 244-264

Servos P (2000) Distance estimation in the visual and visuomotor systems. *Exp Brain Res*, 130: 35-47

Servos P, Goodale MA (1994) Binocular vision and the on-line control of human prehension. *Exp Brain Res*, 98: 119-127

Servos P, Goodale MA, Jakobson LS (1992) The role of binocular vision in prehension: a kinematic analysis. *Vision Res*, 32: 1513-1521

Shippman S, Infantino J, Cimbol D, Cohen KR, Weseley AC (1983) Convergence insufficiency with normal parameters. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus*, 20: 158-161

Sibley KM, Carpenter MG, Perry JC, Frank JS (2007) Effects of postural anxiety on the soleus H-reflex. *Hum Mov Sci*, 26: 103-112

Sommer MA, Wurtz RH (2002) A pathway in primate brain for internal monitoring of movements. *Science*, 296: 1480-1482

Sommer MA, Wurtz RH (2004a) What the brain stem tells the frontal cortex. I. Oculomotor signals sent from superior colliculus to frontal eye field via mediodorsal thalamus. *J Neurophysiol*, 91: 1381-1402

Sommer MA, Wurtz RH (2004b) What the brain stem tells the frontal cortex. II. Role of the SC-MD-FEF pathway in corollary discharge. *J Neurophysiol*, 91: 1403-1423

Stoffregen TA, Bardy BG, Bonnet CT, Hove P, Oullier O (2007) Postural sway and the frequency of horizontal eye movements. *Motor Control*, 11: 86-102

Strupp M, Glasauer S, Jahn K, Schneider E, Krafczyk S, Brandt T (2003) Eye movements and balance. *Ann N Y Acad Sci*, 1004: 352-358

Tarantola J, Nardone A, Tacchini E, Schieppati M (1997) Human stance stability improves with the repetition of the task: effect of foot position and visual condition. *Neurosci Lett*, 228: 75-78

Teasdale N, Stelmach GE, Breunig A (1991) Postural sway characteristics of the elderly under normal and altered visual and support surface conditions. *J Gerontol*, 46: B238-244

Tran DB, Silverman SE, Zimmerman K, Feldon SE (1998) Age-related deterioration of motion perception and detection. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 236: 269-273

Tzelepi A, Lutz A, Kapoula Z (2004) EEG activity related to preparation and suppression of eye movements in three-dimensional space. *Exp Brain Res*, 155: 439-449

Uchida T, Hashimoto M, Suzuki N, Takegami T, Iwase Y (1979) Effects of periodic saccades on the body sway in human subjects. *Neurosci Lett*, 13: 253-258

Vaillant J, Vuillerme N, Janvey A, Louis F, Braujou R, Juvin R, Nougier V (2008) Effect of manipulation of the feet and ankles on postural control in elderly adults. *Brain Res Bull*, 75: 18-22

van der Geest JN, Frens MA (2002) Recording eye movements with video-oculography and scleral search coils: a direct comparison of two methods. *J Neurosci Methods*, 114: 185-195

von Noorden GK (1996) In: von Noorden GK (ed) *Binocular vision and ocular motility: theory and management of strabismus*. Mosby, St Louis

Wang HK, Chen CH, Shiang TY, Jan MH, Lin KH (2006) Risk-factor analysis of high school basketball-player ankle injuries: a prospective controlled cohort study evaluating postural sway, ankle strength, and flexibility. *Arch Phys Med Rehabil*, 87: 821-825

Wang X, Zhang M, Cohen IS, Goldberg ME (2007) The proprioceptive representation of eye position in monkey primary somatosensory cortex. *Nat Neurosci*, 10: 640-646

Wang Y, Asaka T, Zatsiorsky VM, Latash ML (2006) Muscle synergies during voluntary body sway: combining across-trials and within-a-trial analyses. *Exp Brain Res*, 174: 679-693

White KD, Post RB, Leibowitz HW (1980) Saccadic eye movements and body sway. *Science*, 208: 621-623

Winter DA, Patla AE, Prince F, Ishac M, Gielo-Perczak K (1998) Stiffness control of balance in quiet standing. *J Neurophysiol*, 80: 1211-1221

Winter DA, Prince F, Frank JS, Powell C, Zabjek KF (1996) Unified theory regarding A/P and M/L balance in quiet stance. *J Neurophysiol*, 75: 2334-2343

Wist ER, Schrauf M, Ehrenstein WH (2000) Dynamic vision based on motion-contrast: changes with age in adults. *Exp Brain Res*, 134: 295-300

Yang Q, Jurion F, Bucci MP, Lucek A, Wiener-Vacher S, Bremond-Gignac D, Orssaud C, Kapoula Z (2007) Six adults cases with a pseudo-vestibular syndrome related to vergence abnormalities. *Neuro-ophthalmology*,

Yang Q, Kapoula Z (2004) TMS over the left posterior parietal cortex prolongs latency of contralateral saccades and convergence. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 45: 2231-2239

Yang Q, Kapoula Z (2006a) Aging does not affect the accuracy of vertical saccades nor the quality of their binocular coordination: A study of special elderly group. *Neurobiol Aging*,

Yang Q, Kapoula Z (2006b) The control of vertical saccades in aged subjects. *Exp Brain Res*, 171: 67-77

Yang Q, Kapoula Z, Debay E, Coubard O, Orssaud C, Samson M (2006) Prolongation of latency of horizontal saccades in elderly is distance and task specific. *Vision Res*, 46: 751-759

Yarrow K, Brown P, Gresty MA, Bronstein AM (2001) Force platform recordings in the diagnosis of primary orthostatic tremor. *Gait Posture*, 13: 27-34

ANNEXES

Articles publiés

- 1 - Kapoula Z et Lê TT (2006) Effects of distance and gaze position on postural stability in young and old subjects. *Experimental Brain Research*. 173:438-445. doi:10.1007/s00221-006-0382-1.
- 2 - Lê TT et Kapoula Z (2006) Distance impairs postural stability only under binocular viewing. *Vision Research*. 46: 3586-3593. doi:10.1016/j.visres.2006.06.018.
- 3 - Lê TT et Kapoula Z (2008) Role of ocular convergence in the Romberg quotient. *Gait and Posture*. 27:493-500. doi:10.1016/j.gaitpost.2007.06.003.
- 4 - Rey F, Lê TT, Bertin R et Kapoula Z (2007) Saccades horizontal or vertical at near or at far do not deteriorate postural control. *Auris Nasus Larynx*. doi:10.1016/j.anl.2007.07.001.

Article soumis

- 5 - Lê TT, Berbey N, Orssaud C et Kapoula Z. (étude soumise) Postural stability in subjects with visual fatigue, headaches and vertigo symptoms.

Article complémentaire

- _ Matheron E, Lê TT, Yang Q et Kapoula Z (2007) Effects of two-diopter vertical prism on posture. *Neuroscience Letters*. doi:10.1016/j.neulet.2007.07.016.

Chapitres inclus dans l'ouvrage « Posture et Equilibre »

- _ Lê TT et Kapoula Z (2007) La distance détériore la stabilité posturale seulement en vision binoculaire : étude chez le sujet jeune et âgé. *Congrès de l'Association Posture Équilibre*, 8-10 Décembre, Marseille.
- _ Kapoula Z et Lê TT (2007) L'effet de la distance sur le quotient de Romberg. *Congrès de l'Association Posture Équilibre*, 8-10 Décembre, Marseille.

Article 1

Zoï Kapoula · Thanh-Thuan Lê

Effects of distance and gaze position on postural stability in young and old subjects

Received: 30 September 2005 / Accepted: 26 January 2006 / Published online: 9 March 2006
© Springer-Verlag 2006

Abstract Visual stabilization of posture is known to improve when the distance to target fixation decreases; this is attributed to increased angular size of retinal slip induced by body sway. At near distance, however, the eyes converge and efferent or afferent oculomotor signals could also be involved in posture stabilization. The goal of this study is to test whether the distance effect exists for both young and elderly and to test the role of vergence itself and of gaze position. Eighteen young (25.3 years) and 17 elderly (61.6 years) subjects were asked to fixate a target in quiet stance presented either at close (40 cm) or at far distance (200 cm); the vergence angle was 9° and 2°, respectively. For each distance, three gaze positions were studied straight-ahead (0°), 15° up or down. We found a decrease in the surface of center of pressure (CoP), of standard deviation of antero-posterior and lateral body sway and of speed variance at near distance that occurs for both young and elderly. At far distance, the surface of CoP is smaller for 15° up or down gaze in comparison with straight-ahead position, but at near distance there is no such gaze position effect. In an additional experiment, subjects fixated a target at far distance (200 cm) but prisms were used to cause the eyes to converge by an amount similar to that required for 40 cm viewing distance. The use of prisms decreased surface of CoP to values similar to those for natural near viewing distance. The effect of gaze position and of convergence (experiment with prisms) leads us to suggest that in addition to retinal slip, the ocular motor signals and perhaps related neck muscle activity are involved in postural stabilization. Finally, the elderly presented higher speed variance of CoP than the young subjects even though the surface

itself was similar to adult values. We suggest that increment of speed variance is the first sign of senescence in postural control.

Keywords Quiet stance · Visual stabilization · Distance · Sustained convergence · Gaze position · Ageing

Introduction

Postural stabilization is based on multiple sources of information such as somatosensory, proprioceptive, vestibular, visual and oculomotor. The importance of vision on postural stabilization is well known. First, the posture stability is better when eyes are open than close (the Romberg coefficient). The influence of vision depends on task requirements and on age (Turano et al. 1994; Corriveau et al. 2001, 2004; Amiridis et al. 2003; Jonsson et al. 2005). One mechanism by which vision helps postural stabilization is detection of visual motion. Visual motion can be either afferent (objects are moving in the environment) or efferent consecutive to movements of the eyes, body or head. Retinal slip detection by the visual system depends on the viewing distance. Weak body oscillation will cause weak retinal slip that could hardly be detected if the subject is viewing from a far distance. The distance effect on postural stabilization has been described by Bles et al. (1980), Paulus et al. (1984, 1989) and Brandt et al. (1986). Indeed, these authors showed an increase in the root mean square (RMS) of antero/posterior and lateral body oscillation with viewing distance. They emphasised the importance of viewing distance and vergence angle for detecting visual motion.

The purpose of our study is to examine the distance effect for both young and elderly subjects. Prior studies indicate that elderly subjects present larger surface of center of pressure (Doyle et al. 2004), increased activity of hip muscles (Amiridis et al. 2003), or of anterior muscular tibialis (Jonsson et al. 2005) relative to

Zoï Kapoula (✉) · Thanh-Thuan Lê
Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action (LPPA),
IRIS Group, UMR 7152, CNRS-Collège de France,
11 place M. Berthelot, 75005, Paris, France
E-mail: zoi.kapoula@college-de-france.fr
Tel.: +331-44-271635
Fax: +331-44-271382

younger ones. The distance by itself was not considered in such studies. Our expectation for deterioration of postural stabilization is related to deterioration of visual acuity and presbyopia (Ivers et al. 2000; Laitinen et al. 2005) that could diminish the quality of visual motion signals (Tran et al. 1998; Wist et al. 2000) or in contrast could improve it (Betts et al. 2005). Visual acuity decrement could be more or less severe according to distance (Laitinen et al. 2005). Another reason could be related to the difficulty to converge the eyes at a close distance in the elderly (Rambold et al. 2006). Thus, it is possible that the privilege of close distance for postural stabilization is not present in healthy aged subjects.

Another issue addressed in this study is to what extent the dependence of postural stabilization on distance can be attributed to angular size of visual motion. An alternative explanation would be that the oculomotor convergence itself, necessary to view at near distance, influences postural stabilization either via efferent, or via proprioceptive signals coming from extra-ocular muscles, including attentional effort related to near space. Indeed, two electrophysiological studies from Kapoula et al. (2002) and Tzelepi et al. (2004), respectively, found that the event-related potential (ERP) activity during the preparation of a vergence movement was higher than that during the preparation of a saccade or of a combined saccade–vergence movement; moreover, activation was stronger prior to convergence than prior to divergence. These results were attributed to increased attention especially prior to the convergence needed to fixate an object at near space.

Furthermore, oculomotor convergence might be coupled with neck muscle activity in the absence of head movement. In head fixed subjects, a tonic and dynamic coupling of the neck splenius muscle with horizontal eye position is present (André-Deshays et al. 1988, 1991). The authors concluded that the oculomotor command would be distributed to both eye and neck muscles. More recently, authors described a similar phenomenon for monkeys: the discharge of the neck muscles has been found to precede that of extraocular muscles (Corneil et al. 2004). Whether the convergence of the eyes is coupled with an activation of lateral neck muscles used for head rotation, and/or with muscles of head flexion is not known. Indirect evidence comes from a study that demonstrated in humans that the vibration of neck muscles used for lateral head rotation improves the trajectory and the speed of accommodative vergence (Han and Lennerstrand 1998).

The results of our study indicate a clear distance effect for both young and old subjects that could be related to both—differences in visual motion detection and to oculomotor vergence signals (efferent or afferent) and perhaps to hypothetical coupling with neck muscle activity.

Materials and methods

Subjects

Eighteen young subjects, in the age range of 22–33 years (25.3 ± 2.7 years), were recruited among the laboratory co-workers. Twenty older subjects participated in our preliminary tests: 14 coworkers from the laboratory, who were in good health; the other six subjects were recruited in a sports center. Three subjects were excluded. One of the excluded subjects had Meniere's disease, another had a mild difference in length of the legs, and another had unilateral amblyopia. The age of the selected older subjects ranged from 55 to 71 years (61.6 ± 4.4 years). Medical examination and several preliminary tests confirmed normal findings without neurological signs, and no medication. Examination of the visual function was also done for all subjects, young (except for S8 and S13) or aged (except for S2 and S7) Stereo-acuity, Wirt (sec of arc). The purpose of this examination was to screen the binocular visual functions and the vergence capabilities. We examined the visual acuity at far distance; binocular vision was evaluated using the Wirt stereoacuity test (or Titmus stereo test), based on polarized filters; the near point of convergence (NPC) was also measured. Absence of the balance problems was grossly evaluated with the Unterberger/Fukuda stepping test. All subjects retained for posturography had normal performances for their ages for all these preliminary tests (see Table 1). The investigation adhered to the tenets of the Declaration of Helsinki and was approved by the institutional human experimentation committee. Informed consent was obtained from all subjects after the nature of the procedure had been explained.

Posturography

Platform characteristics

To measure the postural stability, we used a platform (principle of strain gauge) consisting of two dynamometric clogs (Standards by Association Française de Posturologie; produced by *TechnoConcept*, Céreste, France). The excursions of the center of pressure (CoP) were measured during 51.2 s; the equipment contained an Analog–Digital converter of 16 bits. The sampling frequency of the CoP was 40 Hz.

Visual target

A vertical screen was used to display a target along the vertical midline. The target was a letter “x” placed between two vertical segments. The angular size of the letter x was adjusted to subtend 1° for both viewing distances (200 and 40 cm).

Table 1 Corrected visual acuity for each eye, stereo-acuity and near point of convergence (NPC) for each subject.

Subjects (age)	Visual acuity	Stereo-acuity, Wirt (sec of arc)	NPC (cm)
Young subjects			
S1 (22)	LE : 14/10RE : 14/10	40	4
S2 (25)	LE : 14/10RE : 14/10	60	7
S3 (24)	LE : 8/10RE : 8/10	40	9
S4 (27)	LE : 9/10RE : 10/10	40	5
S5 (27)	LE : 10/10RE : 10/10	40	3
S6 (23)	LE : 10/10RE : 10/10	40	9
S7 (28)	LE : 9/10RE : 8/10	80	5
S8 (26)	LE :RE :		
S9 (24)	LE : 9/10RE : 9/10	40	5
S10 (23)	LE : 10/10RE : 8/10	40	9
S11 (22)	LE : 9/10RE : 8/10	60	8
S12 (22)	LE : 12/10RE : 10/10	50	9
S13 (33)	LE :RE :		
S14 (25)	LE : 10/10RE : 12/10	50	9
S15 (26)	LE : 8/10RE : 10/10	50	8
S16 (27)	LE : 9/10RE : 9/10	40	8
S17 (25)	LE : 10/10RE : 9/10	40	8
S18 (27)	LE : 9/10RE : 9/10	40	5
Old subjects			
S1 (66)	LE : 9/10RE : 9/10	50	13
S2 (58)	LE :RE :		
S3 (71)	LE : 10/10RE : 6/10	50	7
S4 (58)	LE : 12/10RE : 12/10	50	6
S5 (60)	LE : 12/10RE : 12/10	100	###
S6 (58)	LE : 12/10RE : 10/10	40	###
S7 (59)	LE :RE :		
S8 (56)	LE : 12/10RE : 12/10	40	5
S9 (61)	LE : 12/10RE : 10/10	60	4
S10 (59)	LE : 9/10RE : 9/10	40	6
S11 (62)	LE : 12/10RE : 12/10	100	9
S12 (66)	LE : 9/10RE : 10/10	50	14
S13 (68)	LE : 9/10RE : 8/10	120	9
S14 (63)	LE : 10/10RE : 10/10	40	13
S15 (55)	LE : 10/10RE : 9/10	40	11
S16 (65)	LE : 9/10RE : 8/10	40	7
S17 (62)	LE : 4/10RE : 7/10	140	7

Normal values are <10 cm for NPC and <100 sec of arc for stereo-acuity (von Noorden 1996a, b). For the two old subjects (S5, S6), we could not measure the NPC as they never reported double vision. Numbers in bold indicate beyond normal values

Testing conditions

Quiet stance posturography was done in a normal furnished experimental room. Subjects were placed on the platform and were asked to fixate the "x" target. The target was placed at either 200 or 40 cm, either at straight-ahead (0°) or at 15° up or down (Fig. 1). At 200 cm, the angle of vergence was 2° while at 40 cm it was 9°. During posturography, subjects wore their habitual spectacle correction and the target was visible and clear for both distance conditions. The two distances were counterbalanced between subjects and for each distance, the three conditions corresponding to each gaze position (0, 15° up or down) was also counterbalanced.

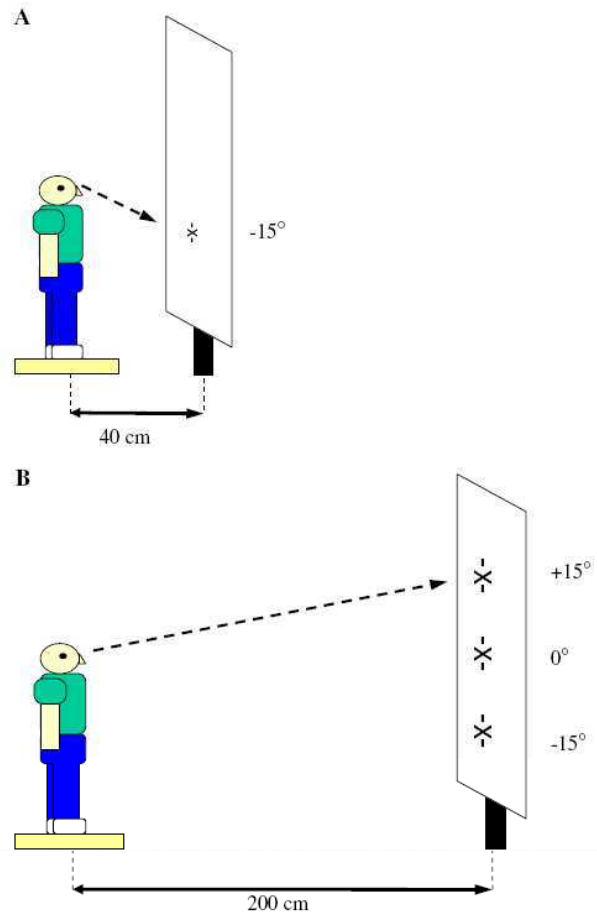


Fig. 1 Illustrations of posturography testing conditions. The subject viewed a cross target embedded by two vertical line segments that aimed to reinforce accurate fixation of the letter "x". The angular size of the cross was 1° both at 40 cm (a) and at 200 cm (b) distance

Postural parameters

We analysed the surface of the CoP excursions, the standard deviations of antero-posterior (SDy) and lateral body sways (SDx) and the variance of speed. The surface area of the CoP was calculated so that 90% of the CoPs were inside an ellipsoid.

Additional experiment with prism

For this experiment, we used the same material and the same instructions as for the main experiment. The distance examined was 200 cm and subjects fixated the "x" target displayed at eye level 0°. A convergent prism of five diopters was placed in front of each eye. This caused the eyes to converge by about 9° which corresponds to

the vergence angle when viewing naturally a target placed at 40 cm. Seventeen from the young subjects (24 ± 2.5 years) and 15 elderly (61.4 ± 4.6) subjects took part in this experiment.

Statistical analysis

A mixed ANOVA design was used with two main factors (distance, gaze position) and one inter-subject factor (age of subjects). The post hoc comparisons were done by Fischer's PLSD test. One-way ANOVA was used to test the effect of prism (intra-subject factor) for the young and old subjects (inter-subject factor).

Results and discussion

Visual examination

The results are shown in Table 1 for young and older subjects, respectively. For young subjects, almost all values are in the normal range. They had perfect binocular vision, low stereoacuity threshold, i.e. below 100 sec of arc (von Noorden 1996b) and their ability to converge at near point (NPC) was normal, i.e. under 10 cm (von Noorden 1996a).

The results in Table 1 from aged subjects, in general, show more remote visual acuity, stereoacuity and point of proximal convergence which are normal for their age. Stereoacuity was normal for the majority of subjects; higher stereoacuity thresholds, i.e. beyond 100 sec of arc (von Noorden 1996b) were observed for two from older subjects (S13 and S17). Such mild deviations from the adult normal threshold are presumably expected for older subjects, as no extensive studies on the effect of age on binocular vision exist and we refer to adult values.

Decreased visual acuity in elderly, even though normal, could interfere with visual stabilization of posture (Paulus et al. 1984; Brandt et al. 1986). Lower stereo acuity could also impair the stability. Yet, as postural stabilization is a multi-factorial system, mild deficits of visual acuity or stereoacuity could have no major influence on posture. Moreover, all aged subjects were able to converge the eyes appropriately without sensing double vision until 6–14 cm (see Table 1), and our near posturography testing was done at 40 cm; thus, all subjects were able to converge at this distance.

Posture measures

The results are shown in Table 2 for young and older subjects, respectively. They are presented and discussed next.

Effect of distance

The effect of distance on various parameters of posture is significant for all parameters. At 40 cm, subjects (young and older together) presented a smaller surface of CoP ($F_{(1, 33)} = 7.12$; $P = 0.012$), a weaker lateral and antero-posterior body sway ($F_{(1, 33)} = 5.99$; $P = 0.020$ and $F_{(1, 33)} = 8.34$; $P = 0.0068$, respectively) and a lower variance of speed ($F_{(1, 33)} = 6.14$; $P = 0.019$) than at 200 cm. These results clearly show that postural stability in quiet stance is better at near vision. The privilege of viewing at close stance on postural stability is preserved in elderly subjects.

Our results are consistent with previous studies dealing only with young subjects, who reported a decrease in RMS of antero-posterior and lateral body sway at near viewing distance in a stationary room (Bles et al. 1980; Paulus et al. 1984, 1989; Brandt et al. 1986) or

Table 2 Means and standard deviations of surface of CoP, standard deviation of lateral, of antero-posterior body sway, and of variance of speed for each gaze position and each distance for young and old subjects; 0° is straight ahead gaze, +15° is up gaze, -15° is down gaze

Parameters	Distance					
	40 cm			200 cm		
	Gaze positions					
	-15°	0°	+15°	-15°	0°	+15°
Surface of CoP (mm ²)						
Young	94 ± 62	104 ± 93	124 ± 98	139 ± 80	165 ± 115	116 ± 74
Elderly	93 ± 72	116 ± 98	113 ± 103	138 ± 127	191 ± 189	141 ± 145
Standard deviation of lateral sway (mm)						
Young	2.0 ± 1.1	2.1 ± 1.2	2.5 ± 1.4	2.4 ± 1.0	2.8 ± 1.6	2.2 ± 1.1
Elderly	1.7 ± 0.8	1.9 ± 0.8	1.9 ± 0.9	2.0 ± 1.0	2.4 ± 1.1	2.5 ± 1.8
Standard deviation of A/P sway (mm)						
Young	3.5 ± 1.5	3.5 ± 1.3	3.8 ± 1.8	4.6 ± 1.5	4.6 ± 1.4	3.8 ± 1.1
Elderly	3.6 ± 1.5	3.7 ± 1.6	3.7 ± 1.4	4.5 ± 2.1	5.0 ± 2.7	4.2 ± 2.1
Speed variance (mm/s)						
Young	22 ± 14	24 ± 13	27 ± 36	24 ± 10	26 ± 16	27 ± 12
Elderly	31 ± 19	34 ± 21	33 ± 25	41 ± 23	45 ± 33	41 ± 24

decrease in body oscillations inside a room that moved back and forth (Freitas Junior and Barela 2004). According to these authors, decreased stability at far versus far objects. In a study in which subjects were required to fixate a window frame in the foreground while the structural background was moving, motion parallax was perceived that influenced the direction of their body sway (Guerraz et al. 2001). In another study, subjects fixated two stationary LEDs aligned in depth. The motion parallax induced by body sway stabilized posture and this stabilization was greater when the distance between the fixated LED in the foreground and the background increased (Guerraz et al. 2000). Note that in our study, subjects fixated a stationary target displayed at far or at close plane on a screen that prevented central vision of the objects in the other plane but not the peripheral vision. It is still plausible that our subjects used motion parallax in order to stabilize their posture. Indeed, when they fixated the close target, the room wall behind was distant providing a strong motion parallax at least in the visual periphery. In contrast when subjects fixated at far, the target and the wall room background were closer, yielding less influential motion parallax. In the prism experiment, the motion parallax influence should be moderate as the subject fixated a far target; yet, convergence of the eyes induced by the prisms caused a substantial improvement in stabilization. Thus, retinal slip and motion parallax effects, although present, cannot account entirely for the difference between far and near.

Another possible explanation is related to a sense of motion parallax, that is, the relative motion of near versus far objects. In a study in which subjects were required to fixate a window frame in the foreground while the structural background was moving, motion parallax was perceived that influenced the direction of their body sway (Guerraz et al. 2001). In another study, subjects fixated two stationary LEDs aligned in depth. The motion parallax induced by body sway stabilized posture and this stabilization was greater when the distance between the fixated LED in the foreground and the background increased (Guerraz et al. 2000). Note that in our study, subjects fixated a stationary target displayed at far or at close plane on a screen that prevented central vision of the objects in the other plane but not the peripheral vision. It is still plausible that our subjects used motion parallax in order to stabilize their posture. Indeed, when they fixated the close target, the room wall behind was distant providing a strong motion parallax at least in the visual periphery. In contrast when subjects fixated at far, the target and the wall room background were closer, yielding less influential motion parallax. In the prism experiment, the motion parallax influence should be moderate as the subject fixated a far target; yet, convergence of the eyes induced by the prisms caused a substantial improvement in stabilization. Thus, retinal slip and motion parallax effects, although present, cannot account entirely for the difference between far and near.

More recent studies from the group of Brandt (Jahn et al. 2002; Strupp et al. 2003; Glasauer et al. 2005) seem to favour interpretation of postural stabilization that takes into account the role of afferent/efferent signals related to eye movement themselves: they found that postural sway during pursuit of a moving target or when looking straight ahead in darkness was higher than when fixating a stationary target or when nystagmus was suppressed; in the latter two conditions, extra-ocular signals were reduced. Sustained convergence of the eyes in our experiment activates the internal medial recti. The effect of near distance on postural stabilization could be related to oculomotor signals efferent or proprioceptive related to the convergence of the eyes. This interpretation is further corroborated by the influence of gaze position and the additional prism experiment that will be discussed below.

Another possible factor also mentioned in the [Introduction](#) is the idea that sustained ocular convergence can also activate neck muscles in the absence of head movements. It has been shown in humans that eccentric gaze position increases the activation of neck muscles

used for the rotation of the head and this occurs in the absence of explicit head movement. There are no studies in humans showing the link between activation of neck muscles and the sustained convergence of the eyes but it is very plausible that such co-activation exists. The question is which muscles are activated; lateral head muscles and/or muscles used for flexion or extension of the head corresponding to convergence and divergence respectively. Han and Lennerstrand (1998) showed that vibration of neck muscles used for lateral head rotation influences the dynamic of accommodative vergence. Thus, the effect of better postural stability at near distance could be attributed to several mechanisms, all originating from the convergence of the eyes: increased angular size of retinal slip, ocular motor efferent and proprioceptive signals, neck muscle activity and proprioception.

Gaze position

Gaze position had a significant main effect only for the surface of CoP parameter ($F_{(2, 66)} = 4.43$; $P = 0.016$). Post hoc test indicated that subjects presented larger surface of CoP when they fixated the target at straight-ahead (0°) than 15° up ($P = 0.039$) or down ($P = 0.0054$; Fig. 2a). The interaction between the distance and the gaze position was also significant for the surface of CoP ($F_{(2, 66)} = 3.66$; $P = 0.031$). Fischer's PLSD test indicated that this increase of the surface of CoP when viewing straight ahead was found only at 200 cm (0 vs. 15° down, $P = 0.012$ and 0° vs. 15° up, $P = 0.0018$, Fig. 2b). When we consider the distance, its effect was significant when subjects looked straight-ahead at 0° ($P = 0.000038$) or 15° down ($P = 0.0042$) but not when they look at 15° up (Fig. 2b).

At far distance, the depression or the elevation of the eyes at 15° up or down produces a better postural stability than when looking straight-ahead (Fig. 2b). Similar to the distance effect, this improvement by the depression or the elevation of the eyes could be due to efferent or proprioceptive signals from extra-ocular muscles. When viewing up, there are contractions of superior rectus (or superior vertical) and inferior oblique muscles. When viewing down, there are contractions of inferior rectus (or inferior vertical) and superior oblique muscles. While looking straight-ahead, these extra-ocular muscles are relaxed. It is possible that proprioceptive or efferent signals from extra-ocular muscles provide input to the postural system that improves stability. In other words, the argument made here for the depression or the elevation of the eyes is similar to what has been proposed above for the convergence of the eyes.

In addition to the activation of extra-ocular muscles, neck muscle for head extension or head flexion could be also involved once again. This does not mean there is a real head movement. In the same way as horizontal eccentric gaze position is associated with head neck muscle activity (André-Deshays et al. 1988, 1991;

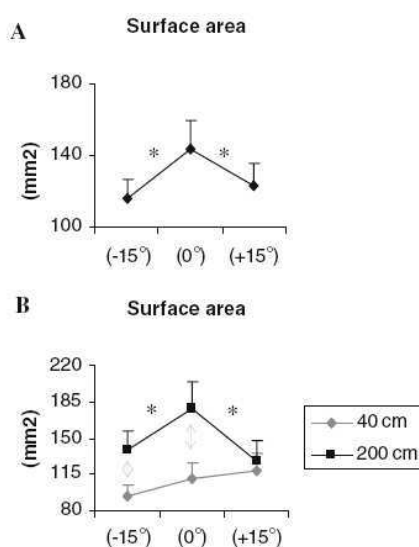


Fig. 2 Effect of gaze position on the surface of CoP. Straight ahead gaze corresponds to 0°, 15° up gaze to +15° and 15° down gaze to -15°. **a** asterisks indicate a significant post hoc comparison between the 0° (straight-ahead) and the 15° up and between the 0° and the 15° down gaze position. **b** Significant interaction between gaze position and distance: differences between gaze positions (0 vs. 15° up and 0 vs. 15° down) are significant only for the far distance; the distance effect is significant only for the straight-ahead (0°) and the 15° down gaze position (post hoc test at $P < 0.05$, indicated by double arrows)

Corneil et al. 2004), vertical gaze, up or down, can also be associated with corresponding neck muscle activity in the absence of the head motion. There is evidence from other studies (Buckley et al. 2005; Vuillerme and Rougier 2005) that head flexion or extension deteriorates postural stability even when visual information is kept the same for all head positions. But such deterioration is attributed to vestibular input and/or mechanical factors. In our experiment, the head was at the same erected position for all free gaze position conditions, and no mechanical and vestibular factors are involved. Thus, neck muscle activation in the absence of head movement could improve the stability, while active head motion would deteriorate the stability. Our observations of better stabilization confirm at least that there was no real actual movement disturbing the postural stability.

The difference between gaze positions at near distance is not significant (Fig. 2b). In other words, the elevation or the depression of the eyes at near distance does not significantly modulate postural stabilization, even though the vertical and the oblique extra-ocular muscles were activated. A possible explanation of this phenomenon is that at near distance the activation of the extra-ocular muscles (medial recti) subtending the convergence is the most important influencing factor; activation of vertical and oblique extra-ocular muscles do not provide further improvement. Even though there is no clear gaze position dependence at near distance there

is a mild tendency for down gaze at near to be better than straight-ahead. This argues in favour of the importance of the convergence as down gaze is naturally associated with additional convergence of the eyes (Collewijn et al. 1988).

Age

There was no significant difference between the younger and elderly group for the surface of CoP, and for the standard deviation of antero-posterior (SDy) or lateral (SDx) body sway. However, the variance of speed increased significantly with age ($F_{(1, 33)} = 4.28$; $P = 0.047$).

Contrary to what we expected, the surface of CoP did not deteriorate with age. The mean surface of CoP of young subjects was 123 mm², e.g., similar to that of elderly subjects (132 mm²). This result seems to be in contradiction with other studies. Indeed, Aufauvre et al. (2005) found the mean surface of CoP in their elderly group to be much higher than our value (704 mm²). However their subjects were older than ours (88.8 ± 5.6 vs. 61.6 ± 4.4 years). Another comparative study from Doyle et al. (2004) also showed that the surface of CoP was larger in the group of subjects of average age of 70 years, than younger subjects, average age of 22 years old; again in this study subjects were older than ours (69.5 vs. 61.6 years). Thus the difference between our study and the others studies could be due to age differences. Therefore, we conclude that at the mean age of 61.6 years, the ability to maintain postural stability, namely, to keep the surface of CoP small is still comparable to that of the young adults.

Yet, the aged subjects presented higher variance of speed than the young adults. It is believed that variance of speed of CoP displacement is related to the energy used to achieve postural stabilization, namely, leg muscles activity. Amiridis et al. (2003) and Jonsson et al. (2005) have shown an increase in hip muscles activity during quiet stance, an increase in activity of anterior tibialis muscle during the Romberg stance in elderly subjects. Our observations for increased variance of speed are consistent with these studies. Blaszczyk et al. (2000) found that distribution of weight is asymmetric between left and right leg in old populations relative to young ones. Again, in our study using subjects of 61.6 years, we did not confirm a load asymmetry between the two limbs; the mean load asymmetry was 47.9: 52.1% for left and right limb in young and 47.8: 52.2%, in old, and this asymmetry was influenced neither by the distance nor by gaze position.

Finally, one should note that the near distance examined here was relatively remote, i.e. 40 cm. We expect more proximal distances such as 10 cm to uncover more pronounced deficits in postural stability for aged subjects. For instance, in line with the results of visual tests (Table 1) one could observe weaknesses in keeping the eyes converged for one minute (see "NPC" measures) thereby leading to postural instability.

Table 3 Means and standard deviations of surface of CoP, standard deviation of lateral, of antero-posterior body sway, and of variance of speed for each distance and for viewing through or not through prisms from young and aged subjects

Group	Parameters							
	Surface area (mm ²)		SD lateral (mm)		SD antero/posterior (mm)		Variance of speed (mm/s)	
	Natural viewing	Prism viewing	Natural viewing	Prism viewing	Natural viewing	Prism viewing	Natural viewing	Prism viewing
Young, <i>n</i> = 18 (25.3 ± 2.7 years)	148 ± 94	110 ± 64	2.8 ± 1.2	2.3 ± 0.9	4.8 ± 2.4	3.8 ± 1.4	31 ± 17	29 ± 16
Elderly, <i>n</i> = 15 (61.4 ± 4.3 years)	156 ± 161	100 ± 64	3.1 ± 1.7	2.6 ± 1.0	4.6 ± 3.5	3.5 ± 1	66.9 ± 46.2	64.2 ± 54

In "natural" viewing, subjects fixated a target straight ahead at 200 cm. In prisms, the distance was the same but subjects wore convergent prisms

Experiment with prism

The rationale for this experiment was the following. As mentioned in [Introduction](#) decrease in retinal motion resulting from sway at far distance may be attributed to the geometry i.e. reduced angular size of body sway. In the prism condition, the physical distance was again far, thus the geometry stayed the same, while the angle of convergence of the eyes increased: the eyes converged as when fixating naturally at a distance of 40 cm. Thus, this experiment allows testing the role of convergence itself. Note that the convergence is stimulated by the binocular disparity induced by the prisms.

The results are shown in [Table 3](#). For both young and the old subjects, the prism reduced all values measured. Viewing with prism decreased significantly the surface of CoP ($F_{(1, 30)} = 8.22$; $P = 0.0075$), and the lateral ($F_{(1, 30)} = 4.98$; $P = 0.033$) and antero-posterior body sway ($F_{(1, 30)} = 11.6$; $P = 0.002$). The variance of speed was also smaller with prisms than without prisms but this did not reach significance (see [Table 3](#)). There was no interaction between age group and prism for any of the parameters studied. Thus, convergence triggered by the prism improved postural stability similarly for both groups.

This result provides the best evidence for the importance of vergence. Indeed, use of convergent prisms brought the convergence to a level that corresponds to natural close viewing. This experiment allows excluding the geometric consideration as being the only reason for reducing postural stability at near vision. Indeed, the physical distance was the same for the prism and no prism condition (200 cm) and the distance weighting of retinal slip was the same. Thus, convergence of the eyes improves postural stabilization via other mechanisms.

General conclusion

This study confirms the existence of a robust distance effect on postural stability in quiet stance for both young and elderly subjects. It also showed that the gaze position at far distance influences the postural stability, namely the elevation, or the depression of the eyes

causes better stabilization than the straight-ahead position. The interpretation proposed is that the convergence of the eyes at near distance is not only used to weight the angular size of retinal slip motion resulting from body sway but it also improves the postural stability via efferent and afferent proprioceptive oculomotor and perhaps neck muscle signals. For subjects of mean age 61 years, the distance effect and the gaze position effect are the same as in young subjects. At the mean age of 61.6 years postural stabilization is almost as good as in young subjects except for increased variance of speed of body sway.

Acknowledgements The authors thank the subjects, F. Jurion for visual examination help and Y. Dupraz for mechanic help. T.T. Lê was supported by European Union (QLK6-CT-2002-00151: EURO-KINESIS) and CNRS/CTI, Handicap contract.

References

- Amiridis IG, Hatzitaki V, Arabatzis F (2003) Age-induced modifications of static postural control in humans. *Neurosci Lett* 350(3):137–140
- André-Deshays C, Berthoz A, Revel M (1988) Eye-head coupling in humans. I. Simultaneous recording of isolated motor units in dorsal neck muscles and horizontal eye movements. *Exp Brain Res* 69(2):399–406
- André-Deshays C, Revel M, Berthoz A (1991) Eye-head coupling in humans. II. Phasic components. *Exp Brain Res* 84(2):359–366
- Aufauvre V, Kemoun G, Carette P, Bergeal E (2005) Evaluation posturale à domicile chez la personne âgée: comparaison chuteurs–non chuteurs. *Ann Readapt Med Phys* 48(4):165–171
- Betts LR, Taylor CP, Sekuler AB, Bennett PJ (2005) Aging reduces center-surround antagonism in visual motion processing. *Neuron* 45(3):361–366
- Błaszczak JW, Prince F, Raiche M, Hebert R (2000) Effect of ageing and vision on limb load asymmetry during quiet stance. *J Biomech* 33(10):1243–1248
- Bles W, Kapteyn TS, Brandt T, Arnold F (1980) The mechanism of physiological height vertigo. II. Posturography. *Acta Otolaryngol* 89(5–6):534–540
- Brandt T, Paulus W, Straube A (1986) Vision and posture. In: Bles W, Brandt T (eds) *Disorders of posture*. Elsevier, Amsterdam, pp 157–175
- Buckley JG, Anand V, Scally A, Elliott DB (2005) Does head extension and flexion increase postural instability in elderly subjects when visual information is kept constant? *Gait Posture* 21(1):59–64

- Collewijn H, Erkelens CJ, Steinman RM (1988) Binocular coordination of human vertical saccadic eye movements. *J Physiol* 404:183–197
- Corneil BD, Olivier E, Munoz DP (2004) Visual responses on neck muscles reveal selective gating that prevents express saccades. *Neuron* 42(5):831–841
- Corriveau H, Hebert R, Prince F, Raiche M (2001) Postural control in the elderly: an analysis of test–retest and interrater reliability of the COP-COM variable. *Arch Phys Med Rehabil* 82(1):80–85
- Corriveau H, Hebert R, Raiche M, Dubois MF, Prince F (2004) Postural stability in the elderly: empirical confirmation of a theoretical model. *Arch Gerontol Geriatr* 39(2):163–177
- Doyle TL, Dugan EL, Humphries B, Newton RU (2004) Discriminating between elderly and young using a fractal dimension analysis of centre of pressure. *Int J Med Sci* 1(1):11–20
- Freitas Junior PB, Barela JA (2004) Postural control as a function of self- and object-motion perception. *Neurosci Lett* 369(1):64–68
- Glasauer S, Schneider E, Jahn K, Strupp M, Brandt T (2005) How the eyes move the body. *Neurology* 65(8):1291–1293
- Guerraz M, Gianna CC, Burchill PM, Gresty MA, Bronstein AM (2001) Effect of visual surrounding motion on body sway in a three-dimensional environment. *Percept Psychophys* 63(1):47–58
- Guerraz M, Sakellari V, Burchill P, Bronstein AM (2000) Influence of motion parallax in the control of spontaneous body sway. *Exp Brain Res* 131(2):244–252
- Han Y, Lennerstrand G (1998) Effects of neck muscle proprioceptive activation on the dynamics of monocularly driven horizontal vergence movements. *Acta Ophthalmol Scand* 76(3):283–288
- Ivers RQ, Mitchell P, Cumming RG (2000) Visual function tests, eye disease and symptoms of visual disability: a population-based assessment. *Clin Experiment Ophthalmol* 28(1):41–47
- Jahn K, Strupp M, Krafczyk S, Schuler O, Glasauer S, Brandt T (2002) Suppression of eye movements improves balance. *Brain* 125(Pt 9):2005–2011
- Jonsson E, Seiger A, Hirschfeld H (2005) Postural steadiness and weight distribution during tandem stance in healthy young and elderly adults. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 20(2):202–208
- Kapoula Z, Evdokimidis I, Smyrnis N, Bucci MP, Constantinidis TS (2002) EEG cortical potentials preceding vergence and combined saccade-vergence eye movements. *Neuroreport* 13(15):1893–1897
- Laitinen A, Koskinen S, Harkanen T, Reunanen A, Laatikainen L, Aromaa A (2005) A nationwide population-based survey on visual acuity, near vision, and self-reported visual function in the adult population in Finland. *Ophthalmology* 112(12):2227–2237
- Paulus W, Straube A, Krafczyk S, Brandt T (1989) Differential effects of retinal target displacement, changing size and changing disparity in the control of anterior/posterior and lateral body sway. *Exp Brain Res* 78(2):243–252
- Paulus WM, Straube A, Brandt T (1984) Visual stabilization of posture. Physiological stimulus characteristics and clinical aspects. *Brain* 107(Pt 4):1143–1163
- Rambold H, Neumann G, Sander T, Helmchen C (2006) Age-related changes of vergence under natural viewing conditions. *Neurobiol Aging* 27(1):163–172
- Strupp M, Glasauer S, Jahn K, Schneider E, Krafczyk S, Brandt T (2003) Eye movements and balance. *Ann NY Acad Sci* 1004:352–358
- Tran DB, Silverman SE, Zimmerman K, Feldon SE (1998) Age-related deterioration of motion perception and detection. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 236(4):269–273
- Turano K, Rubin GS, Herdman SJ, Chee E, Fried LP (1994) Visual stabilization of posture in the elderly: fallers vs. nonfallers. *Optom Vis Sci* 71(12):761–769
- Tzelepi A, Lutz A, Kapoula Z (2004) EEG activity related to preparation and suppression of eye movements in three-dimensional space. *Exp Brain Res* 155(4):439–449
- von Noorden GK (1996a) Near point convergence. In: Klein EA (eds) *Binocular vision and ocular motility: theory and management of strabismus*. Mosby, St Louis, p 202
- von Noorden GK (1996b) Titmus stereo test. In: *Binocular vision and ocular motility: theory and management of strabismus*. Mosby, St Louis, pp 275–276
- Vuillerme N, Rougier P (2005) Effects of head extension on undisturbed upright stance control in humans. *Gait Posture* 21(3):318–325
- Wist ER, Schrauf M, Ehrenstein WH (2000) Dynamic vision based on motion-contrast: changes with age in adults. *Exp Brain Res* 134(3):295–300

Article 2

Distance impairs postural stability only under binocular viewing

Thanh-Thuan Lê*, Zoï Kapoula

IRIS Group, UMR 7152 Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action. LPPA, CNRS-Collège de France, 11, place M. Berthelot, 75005 Paris, France

Received 20 December 2005; received in revised form 23 June 2006

Abstract

Prior studies indicate that postural stability under binocular viewing is not better than under monocular viewing. This was tested at the distances of 145 cm [Fox, C.R. (1990). Some visual influences on human postural equilibrium: binocular versus monocular fixation. *Perception and Psychophysics*, 47 (5), 409–422] and 90 cm [Isotalo, E., Kapoula, Z., Feret, P.H., Gauchon, K., Zamfirescu, F., & Gagey, P.M. (2004). Monocular versus binocular vision in postural control. *Auris Nasus Larynx*, 31 (1), 11–17]. On the other hand, postural stability is known to decrease with distance increase. We re-examined the effect of binocular versus monocular viewing on postural stability at near and far distances (40 and 200 cm), and for both young (25.7 ± 2.7 years), and old subjects (61.2 ± 4.6 years). For both groups of subjects, proximity decreased the area of CoP, the standard deviation of antero-posterior sway (SDy) and the variance of speed. The group of elderly presented increased variance of speed at far distance in comparison with young subjects. The novel finding is the interaction between distance and viewing condition. Under binocular viewing, the area of CoP was significantly higher at far distance than at near; in contrast, monocular viewing produced similar CoP values at both distances. Increased instability at far distance when both eyes are viewing is attributed to decreased sensitivity to binocular disparity cues and to visual motion in depth resulting from body sway. Monocular viewing would provide similar stability at far and at near distance, because sensitivity to lateral visual motion, detected monocularly, decreases less with distance than sensitivity to binocularly detected motion in depth. Alternatively, such monocular viewing could increase subject's attention and lead to tighter postural control regardless of the distance.

© 2006 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Postural stability; Binocular and monocular viewing; Distance; Ageing

1. Introduction

Vision plays a major role in postural control. Indeed, closure of the eyes impairs balance i.e. the Romberg test (Gagey & Weber, 1999). Vision has a spatial component, including horizontal, vertical direction and depth. Several studies showed that postural stabilization improves when distance between subject's eye and target decreases (Bles, Kapteyn, Brandt, & Arnold, 1980; Brandt, Paulus, & Straube, 1986; Paulus, Straube, Krafczyk, & Brandt, 1989; Paulus, Straube, & Brandt, 1984). The diminishment of distance increases the angular size of retinal slip induced by body sway and renders it easier to detect. In a previous

study (Kapoula & Le, 2006), we found that while viewing at far the use of prisms that force the eyes to converge improves postural stability, even though the angular size of retinal slip remains the same. This result led us to conclude that in addition to retinal slip, efferent and afferent signals from extra-ocular muscles related to convergence of the eyes are involved in postural stabilization.

Body sway in side-by-side feet position is believed to be controlled by two distinct muscular strategies (ankle for antero-posterior "AP" sway, and hip for medial-lateral "ML" sway; see Day, Steiger, Thompson, & Marsden, 1993; Gatev, Thomas, Kepple, & Hallett, 1999; Winter, Patla, Ishac, & Gage, 2003; Winter, Prince, Frank, Powell, & Zabjek, 1996). Fox (1990) found that AP sway is less under binocular than that under monocular vision when the dominant eye is viewing; this is the case in both standard and sharpened (heel-to-toe position) Romberg stance.

* Corresponding author.

E-mail address: thanh-thuan.le@college-de-france.fr (T.-T. Lê).

Isotalo et al. (2004) showed better postural stability under binocular viewing but this was observed only in half of the subjects. The eye-target distance in the study of Fox (1990) was 145 cm, while in the study of Isotalo et al. (2004) this distance was 90 cm. As we mentioned above, the distance influences the postural stability. Furthermore, Fox (1990) analysed the root-mean square (RMS) of antero-posterior and lateral body sway while Isotalo et al. (2004) used the mean area of center of pressure (CoP) and did not provide detailed information about AP or ML sway. Fox (1990) used six experimental conditions (full illumination or dark room containing one, three or six LEDs) while Isotalo et al. (2004) used only one experimental condition that was a full illuminated room and required subjects to fixate a single cross. More careful examination of the data reported by Fox (1990), indicates that in the full illuminated room condition there is no statistically significant difference between binocular and monocular viewing (Wilcoxon test; $z = 1.31$; double side $p = .1902$, extracted from Table 1, page 414). Thus, the two studies (Fox, 1990; Isotalo et al., 2004) seem to converge on the point that there is no strong benefit of binocular viewing neither at the distance of 90 cm nor at the distance of 145 cm.

Indeed, powerful visual cues for postural stabilization can be monocular. Motion parallax (relative motion of far versus near objects) is such a cue, giving also depth information. Motion parallax was found to improve postural stabilization in both monocular and binocular viewing (Guerraz, Sakellari, Burchill, & Bronstein, 2000). This result is consistent with another study that found a direction change of postural sway in monocular viewing when depth perception was made available e.g. tunnel versus wall background (Masson, Mestre, & Pailhous, 1995). Finally, monocular stimulation of the temporal retinal region (the monocular crescent) increases postural response, the lateral sway was found to be stronger after right crescent stimulations while the antero-posterior sway was larger after left ones (Bessou, Severac Cauquil, Dupui, Montoya, & Bessou, 1999).

The notion of ocular dominance is widely used although the physiological meaning i.e. only sensory (Berardi, Pizzorusso, Ratto, & Maffei, 2003; Fischer et al., 2004; Nakagama & Tanaka, 2004; Taha & Stryker, 2002), only motor (Jones, Classe, Hester, & Harris, 1996; Mapp, Ono, & Barbeito, 2003; Portal & Romano, 1998), both sensory and motor (Handa et al., 2004), or the one sensory dominant and the other motor dominant (el-Mallakh, Wyatt, & Looney, 1993) is controversial. To determine the dominant eye, one usually asks the subject to align the finger with a target initially with the two eyes open, and then to judge the misalignment when either eye is closed alternatively (Heinrich, Kromeier, Bach, & Kommerell, 2005; Kommerell, Schmitt, Kromeier, & Bach, 2003). More recent studies (Heinrich et al., 2005; Kommerell et al., 2003) introduced another concept “the prevalent eye”. Subject fixates binocularly a target inside Panum’s area (area inside which the retinal fusion is possible); the eye

that is better aligned to the target is the prevalent eye. Until now, in the field of postural stabilization only the influence of the dominant eye has been studied. Indeed, Gentaz (1988) proposed the existence of a “postural” eye which is not necessarily the dominant eye and which allows better stabilization during the quiet stance than the other eye or even when both eyes viewing.

The main purpose of this study is to re-examine the effect of binocular versus monocular vision for right eye ocular dominant subjects and in relation to the viewing distance; for this we use two rather extreme distances 40 cm and 200 cm.

Ageing effects on postural stabilization are widely studied (Corriveau, Hebert, Prince, & Raiche, 2001; Corriveau, Hebert, Raiche, Dubois, & Prince, 2004; Corriveau, Hebert, Raiche, & Prince, 2004). Many studies found an increment of the mean area of CoP in septuagenarians (Aufauvre, Kemoun, Carette, & Bergeal, 2005; Doyle, Dugan, Humphries, & Newton, 2004). In a previous study (Kapoula & Le, 2006), we did not find a similar increment of the area of CoP for the sexagenarians but an increase of the speed variance of the feet CoP. The variance of speed indicates the dispersion about the mean speed of the pressure. High speed variance suggests increased variance of feet pressure which is related to leg activity: the link between the shift of CoP and group muscles activity (for instance, the soleus, the gastrocnemus, the anterior tibialis) has been shown by Wang, Zatsiorsky, and Latash (2006). Thus, we argue that a first sign of senescence could be an increase of activity of the lower limb to stabilize the body. Our results were consistent with those of Amiridis, Hatzitaki, and Arabatzi (2003), Jonsson, Seiger, and Hirschfeld (2005) who found respectively an increase of the hip muscles activity, and an increase of activity of anterior tibialis muscle during the Romberg stance in elderly. In our previous study (Kapoula & Le, 2006), a similar effect of distance was found for both young and elderly i.e. better stability at near. In this study, we examined whether elderly have more difficulty to maintain postural stability than young when visual cues are reduced such as monocular viewing. Indeed, several studies showed decrease of binocular visual acuity (Ivers, Mitchell, & Cumming, 2000; Laitinen et al., 2005) or of stereoacuity (Zaroff, Knutelska, & Frumkes, 2003) with age. Yet, no studies exist comparing postural performances of young and elderly under monocular and binocular viewing.

2. Materials and methods

2.1. Subjects

Eighteen young and twenty older subjects working or living close to the laboratory participated in our preliminary tests; all the young and 17 of older subjects were considered as normal. One of the excluded subjects had Meniere’s disease, another had a mild difference of the length legs, and the other had unilateral amblyopia. Medical examination and several preliminary tests confirmed normal findings without neurological signs, and no medication.

Table 1

Corrected visual acuity at 5m and at 33cm for left eye (LE), right eye (RE) and both eyes, stereoacuity, near point of convergence (NPC), phoria ("X" corresponds to exophoria, "S" to esophoria, and "O" to absence of phoria) and the dominant eye for each subject

Subject (age)	Corrected visual acuity (5m)	Corrected visual acuity (33cm)	Stereoacuity (")	NPC (cm)	Phoria	Dominant eye
<i>Young subjects</i>						
S1 (22)	LE: 14/10 Both: 14/10 RE: 14/10	LE: 9/10 Both: 9/10 RE: 9/10	40	4	Far: X Close: X	Right
S2 (25)	LE: 14/10 Both: 14/10 RE: 14/10	LE: 9/10 Both: 9/10 RE: 9/10	60	7	Far: X Close: X	Right
S3 (24)	LE: 8/10 Both: 12/10 RE: 8/10	LE: 9/10 Both: 6.6/10 RE: 9/10	40	9	Far: X Close: X	Right
S4 (27)	LE: 9/10 Both: 12/10 RE: 10/10	LE: 9/10 Both: 9/10 RE: 9/10	40	5	Far: X Close:	Right
S5 (27)	LE: 10/10 Both: 12/10 RE: 10/10	LE: 9/10 Both: 9/10 RE: 9/10	40	3	Far: X Close: X	Right
S6 (23)	LE: 10/10 Both: 14/10 RE: 10/10	LE: 9/10 Both: 9/10 RE: 9/10	40	9	Far: X Close: X	Right
S7 (28)	LE: 9/10 Both: 9/10 RE: 8/10	LE: 6.6/10 Both: 9/10 RE: 6.6/10	80	5	Far: X Close: X	Right
S8 (26)	LE: Both: RE:	LE: Both: RE:			Far: Close:	Right
S9 (24)	LE: 9/10 Both: 12/10 RE: 9/10	LE: 9/10 Both: 9/10 RE: 9/10	40	5	Far: X Close: O	Right
S10 (22)	LE: 9/10 Both: 9/10 RE: 8/10	LE: 9/10 Both: 6.6/10 RE: 9/10	60	8	Far: S Close: S	Right
S11 (33)	LE: Both: RE:	LE: Both: RE:			Far: Close:	Right
S12 (25)	LE: 10/10 Both: 12/10 RE: 12/10	LE: 6.6/10 Both: 9/10 RE: 9/10	50	9	Far: X Close: X	Right
S13 (26)	LE: 8/10 Both: 10/10 RE: 10/10	LE: 9/10 Both: 9/10 RE: 9/10	50	8	Far: X Close: X	Right
S14 (27)	LE: 9/10 Both: 10/10 RE: 9/10	LE: 9/10 Both: 9/10 RE: 9/10	40	8	Far: X Close: X	Right
S15 (25)	LE: 10/10 Both: 10/10 RE: 9/10	LE: 6.6/10 Both: 9/10 RE: 9/10	40	8	Far: X Close: X	Right
S16 (27)	LE: 9/10 Both: 10/10 RE: 9/10	LE: 9/10 Both: 9/10 RE: 6.6/10	40	5	Far: X Close: X	Right
<i>Elderly subjects</i>						
S1 (66)	LE: 9/10 Both: 12/10 RE: 9/10	LE: 6.6/10 Both: 9/10 RE: 9/10	50	13	Far: X Close: X	Right
S2 (58)	LE: Both: RE:	LE: Both: RE:			Far: Close:	Right
S3 (71)	LE: 10/10 Both: 10/10 RE: 6/10	LE: 4/10 Both: 6.6/10 RE: 4/10	50	7	Far: O Close: X	Right
S4 (58)	LE: 12/10 Both: 14/10 RE: 12/10	LE: 9/10 Both: 9/10 RE: 6.6/10	50	6	Far: X Close: X	Right
S5 (60)	LE: 12/10 Both: 14/10 RE: 12/10	LE: 6.6/10 Both: 9/10 RE: 6.6/10	100	###	Far: S Close: O	Right
S6 (58)	LE: 12/10 Both: 14/10 RE: 10/10	LE: 9/10 Both: 9/10 RE: 9/10	40	###	Far: X Close: X	Right
S7 (59)	LE: Both: RE:	LE: Both: RE:			Far: Close:	Right
S8 (56)	LE: 12/10 Both: 14/10 RE: 12/10	LE: 6.6/10 Both: 9/10 RE: 6.6/10	40	5	Far: X Close: X	Right
S9 (61)	LE: 12/10 Both: 12/10 RE: 10/10	LE: 6.6/10 Both: 9/10 RE: 9/10	60	4	Far: X Close: X	Right
S10 (62)	LE: 12/10 Both: 14/10 RE: 12/10	LE: 6.6/10 Both: 9/10 RE: 9/10	100	9	Far: X Close: S	Right
S11 (68)	LE: 9/10 Both: 10/10 RE: 8/10	LE: 6.6/10 Both: 6.6/10 RE: 6.6/10	120	9	Far: X Close: X	Right
S12 (63)	LE: 10/10 Both: 10/10 RE: 10/10	LE: 6.6/10 Both: 6.6/10 RE: 6.6/10	40	13	Far: X Close: O	Right
S13 (55)	LE: 10/10 Both: 12/10 RE: 9/10	LE: 6.6/10 Both: 6.6/10 RE: 9/10	40	11	Far: X Close: X	Right
S14 (62)	LE: 4/10 Both: 7/10 RE: 7/10	LE: 2.5/10 Both: 6.6/10 RE: 6.6/10	140	7	Far: X Close: X	Right

Normal values are <10cm for NPC and <100 (") for stereoacuity. For two old subjects (S5, S6), we could not measure the NPC as they never reported double vision (represented by ###). Numbers in bold indicate beyond normal values.

Examination of the visual function was also done for all subjects, young (except for S8 and S11) or aged (except for S2 and S7). The purpose of this examination was to screen binocular visual function and vergence capabilities. We examined visual acuity at far (5 m) and at close distance (33 cm with Parinaud's reading test); binocular vision was evaluated using the Wirt stereoacuity test (or Titmus stereo test), based on polarized filters; the near point of convergence (NPC) and phoria was also measured. Absence of the balance problems was grossly evaluated with the Unterberger/Fukuda stepping test.

The dominant eye was evaluated by asking the subject to look through their hands a target at 5 m and then closing alternatively each eye to judge the eye for which the alignment was the best. As this test was made monocularly at far distance, we determined the dominant eye and not the prevalent eye that is identified binocularly at close distance e.g. inside the Panum's area (Heinrich et al., 2005). Only two of the young and three of the elderly subjects were left eye dominant; this number was insufficient for a comparison between left and right eye dominance. Consequently we excluded these subjects. Thus, posturography data come from 16 young (25.7 ± 2.7 years) and 14 old (61.2 ± 4.6 years) persons who were all right eye dominant.

2.2. Posturography

2.2.1. Platform characteristics

To measure the postural stability, we used a platform (principle of strain gauge) composed by two dynamometric clogs (Standards by Association Française de Posturologie; produced by *TechnoConcept*, Céréste, France). The excursions of the center of pressure (CoP) were measured during 51.2 s; the equipment contained an Analogical/Digital converter of 16 bits. The sampling frequency of the CoP was 40 Hz.

2.2.2. Visual target

A vertical screen was used to display a target along the vertical midline. The target was a letter "X" placed between two vertical segments. The angular size of the letter "X" was adjusted to subtend 1° for both viewing distances (200 and 40 cm). Each vertical line subtended 0.29° for both viewing distances.

2.2.3. Posturography testing conditions

Quiet stance posturography was done in a normally furnished experimental room with medium illumination. Subjects were placed on the platform and were asked to fixate the "X" target placed at the eye level. In different sessions, the vertical screen was placed at 40 and 200 cm from the subject. At 40 cm, the angle of vergence was 9° while at 200 cm it was 2° . For each distance, three conditions were run with fixation of the target under binocular, dominant or non-dominant eye viewing (DEV, NDEV, respectively). For the dominant and non-dominant eye viewing, a paper mask was placed in front of one eye; the mask was fixed around the subject's head by a rubber. The order of the distance was counterbalanced between subjects, and for each distance the order of the viewing conditions was also counterbalanced. During posturography, subjects wore their habitual spectacle correction and reported clear vision of the target for both distances. Among the elderly group, three wore their spectacle for near vision (S2, S4, and S13), one for the far vision (S6), and another subject did not need spectacles (S7); the remaining old subjects wore bifocal spectacles, thus correcting both far and near vision.

2.2.4. Postural parameters

We analysed the area of CoP, the standard deviations of antero-posterior (SDy) and of lateral body sways (SDx), and the variance of speed. Note that other relevant studies have examined the CoP (Isotalo et al., 2004) or the root-mean square of the CoP (Fox, 1990); the latter measure is similar but not identical to standard deviation we used here. Note that many recent studies use standard deviation of CoP (Gravelle et al., 2002; Hertel & Olmsted-Kramer, 2006). The area of CoP was calculated so that 90% of the instantaneous positions of the CoP were inside an ellipsoid (Gagey & Weber, 1999).

2.2.5. Statistical analysis

A mixed ANOVA design with two main factors, the distance (40 and 200 cm) and viewing condition according the ocular dominance (binocular, dominant or non-dominant eye viewing); and one inter-subject factor, the age of subjects (young and elderly). Post-hoc comparison was done by the Scheffé test; the effect of a factor is significant when the p -value was below from 0.05.

3. Results of the visual examination

The results are shown in Table 1 for the young and the old subjects. For young subjects, almost all values are in the normal range. They had perfect binocular vision and their ability to converge at near point (NPC) was normal i.e. under 10 cm (von Noorden, 1996a). In general, results from aged subjects show more remote point of proximal convergence which is normal, and for four of the subjects values of NPC are >10 cm. Stereoacuties were normal for the majority of the subjects; higher stereoacuity thresholds i.e. beyond $100''$ (von Noorden, 1996b) were observed for two from older subjects (S11 and S14). Such mild deviations from the adult normal threshold are expected for older subjects. Indeed, the visual acuity and the stereoacuity decrease with age (Ivers et al., 2000; Laitinen et al., 2005; Zaroff et al., 2003). Note that all aged subjects were able to converge the eyes appropriately without sensing double vision until 6–14 cm. Since our near posturography testing was done at 40 cm, all subjects were able to converge at this distance.

4. Postural measures

Results are shown in Table 2 which shows the group means and standard deviations for the three viewing conditions (binocular, DEV, and NDEV), for the two viewing distances (close and far), and for the two groups of subjects (young and aged). Next, we will present the results of ANOVA evaluating the effects of distance, viewing condition and age on each of the postural parameters.

4.1. Distance effect

There was a main effect of distance on most of the parameters tested, the area of CoP ($F_{(1,28)} = 10.2, p = .0034$), the antero-posterior body sway (or SDy, $F_{(1,28)} = 15.7, p = .00046$) and the variance of speed ($F_{(1,28)} = 4.86, p = .036$); all these parameters were significantly smaller at near distance.

4.2. Effect of viewing condition

The viewing condition had no main effect either on the area of CoP or on the SDx, but it had an effect on SDy ($F_{(2,56)} = 4.79, p = .011$). Antero-posterior instability was greater when viewing with the NDEV than when viewing with both eyes ($p = .032$) or with the DEV ($p = .029$). There was no significant difference between the latter two conditions (both eyes viewing, dominant eye).

Table 2

Means and standard deviations of area of CoP, standard deviation of lateral, of antero-posterior body sway, and of variance of speed for each viewing condition and for each distance for young and old subjects

Parameters	Distance					
	40 cm			200 cm		
	Viewing condition					
	Binocular viewing	Right eye dominant	Left eye non-dominant	Binocular viewing	Right eye dominant	Left eye non-dominant
Surface of CoP (mm ²)						
Young	107 ± 98	127 ± 84	133 ± 92	179 ± 116	133 ± 109	170 ± 110
Elderly	111 ± 99	133 ± 110	129 ± 102	178 ± 164	156 ± 146	139 ± 114
Standard deviation of lateral sway (mm)						
Young	2.1 ± 1.2	2.4 ± 1.1	2.1 ± 0.9	3.0 ± 1.7	2.3 ± 1.4	2.4 ± 0.9
Elderly	2.2 ± 1.2	2.4 ± 1.4	2.1 ± 0.8	2.3 ± 0.9	2.3 ± 1.4	2.1 ± 1.2
Standard deviation of antero-posterior sway (mm)						
Young	3.5 ± 1.4	3.9 ± 1.3	4.5 ± 2.0	4.7 ± 1.5	4.5 ± 2.0	5.4 ± 2.3
Elderly	3.5 ± 1.3	4.0 ± 1.6	4.7 ± 2.6	5.1 ± 2.7	4.3 ± 1.7	4.5 ± 1.8
Variance of speed (mm ² /s ²)						
Young	24.9 ± 13.0	28.9 ± 17.6	34.0 ± 36.6	27.3 ± 15.8	27.4 ± 16.6	33.3 ± 20.7
Elderly	32.7 ± 22.0	36.1 ± 25.1	38.5 ± 28.2	45.3 ± 33.9	49.0 ± 41.0	46.5 ± 34.2

4.3. Interaction between distance and age

Age had no effect on the area of CoP or on the SD_x and the SD_y. There was no main effect either on the variance of speed. However, there was a significant interaction between age and distance on variance of speed ($F_{(1,28)} = 4.69$, $p = .039$): the speed variance was higher for old subjects at the distance of 200 cm in comparison with young ($p = .00058$, see Fig. 1).

4.4. Interaction between distance and viewing condition

Interaction between the distance and the viewing condition was significant for the area of CoP ($F_{(2,56)} = 3.73$, $p = .030$), but did not reach the significance for the SD_x ($F_{(2,56)} = 2.55$, $p = .087$) and for the SD_y ($F_{(2,56)} = 2.64$, $p = .080$).

The area of CoP under the binocular viewing condition was significantly higher at far distance than under the binocular viewing at near ($p = .0028$, Fig. 2). In contrast, the monocular viewing produced similar results at both distances.

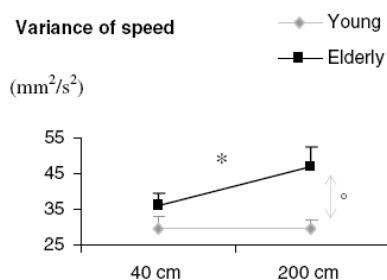


Fig. 1. At the distance of 200 cm, elderly subjects presented more variance of speed than younger one ($p < .05$, represented by a circle). The distance effect was significant only in elderly group ($p < .05$, represented by an asterisk).

Area of CoP (mm²)

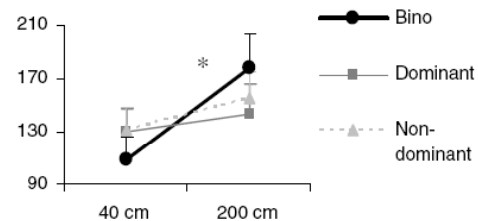


Fig. 2. The effect of distance was significant only under binocular viewing ($p < .05$, represented by an asterisk) in comparison with dominant and non-dominant eye viewing.

5. Discussion

This study revealed four results: (i) a robust effect of distance on several parameters; (ii) an effect of viewing condition only on antero-posterior sway; (iii) an effect of age only on the speed variance, (iv) an interaction between distance and viewing condition.

5.1. Distance effect

Proximity decreased the area of CoP, the standard deviation of antero-posterior sway (SD_y) and the variance of speed. These results confirm our previous reports (Kapoula & Le, 2006), and are consistent with other studies (Bles et al., 1980; Brandt et al., 1986; Paulus et al., 1989, 1984) who also reported a decrease of body sway at near distance.

5.2. Viewing condition

There was a main effect of viewing condition only on standard deviation of antero-posterior body sway (SD_y). Under binocular or under dominant eye viewing, the SD_y

was significantly smaller than under non-dominant eye viewing. These results are consistent with Isotalo et al. (2004) who found no effect of ocular dominance on the area of CoP. The effect observed here on SDy indicates that viewing condition influences postural control in a finer way. The antero-posterior sway can cause substantial variation of the angular size of the retinal image, particularly when fixating a near target; i.e. a few centimetres of body displacement in depth could correspond to large change of the vergence angle. In contrast, the medio-lateral body sway displaces the image only laterally. A possible interpretation is that the dominant eye could be more efficient to detect changes of angular size of retinal slip resulting from antero-posterior body sway. Fu and Boothe (2001) showed that monkeys presented threshold asymmetry between the two eyes but only for lateral motion detection: they called the “best” eye the eye showing the lower threshold (irrespective of eye dominance). To our knowledge studies that evaluated the thresholds of motion detection in humans almost always compare binocular versus monocular viewing, regardless of the ocular dominance. Thus, the threshold of motion detection was found to be higher under monocular than under binocular viewing (Rose, 1978, 1980). Similar studies on motion perception in depth are missing.

5.3. Age

The group of elderly presented increased variance of speed at far distance in comparison with young subjects. As we mentioned above, the variance of speed is related to the energy released by the leg muscle activity in order to stabilize posture and is consistent with studies from Amiridis et al. (2003) and Jonsson et al. (2005) who reported increased muscle activity in aged subjects. The increment of variance of speed seems to be the first sign of senescence in postural control.

The absence of interaction between age and viewing condition indicates that posture in elderly was not affected by monocular viewing, contrary to what we expected (see Section 1).

5.4. Interaction between distance and viewing condition

The most important finding is that binocular viewing provides very different results for the two viewing distances while monocular viewing (with either eye) changes little with distance. As shown in Fig. 2, at near distance binocular viewing provides the smallest area of CoP while at far distance it yields the largest area. As visual cues are richer and visual performances are better in general under binocular viewing, our results are rather surprising since McKnight, Shinar, and Hilburn (1991) found that the visual acuity is better under binocular vision than under monocular vision. Our results of visual acuity measured at far (Table 1) presented a similar tendency in most of subjects. Yet, postural stability is the worst under binocular viewing.

McKnight et al. (1991) also showed that perception of distance in depth was better under binocular vision than under monocular vision. However, studies from Magne and Coello (2002), Servos (2000), Servos and Goodale (1994), Servos, Goodale, and Jakobson (1992) indicate that the superiority of binocular viewing for distance evaluation is observed only in active tasks (e.g. reaching a target) and not under static conditions. As perceptual judgement of depth seems equal between binocular and monocular viewing in static condition, distance evaluation cannot be the cause of decreased posture stability under binocular viewing.

The retinal slip yielded by body sway decreases with increase of distance for geometric reasons and may become harder to detect (Bles et al., 1980; Brandt et al., 1986; Paulus et al., 1989, 1984). Such decrement, however, should be similar under binocular viewing and under monocular viewing. Thus, differences in retinal slip under binocular and monocular viewing at far cannot explain our results either. Similarly, Guerraz et al. (2000) showed that the influence of motion parallax (relative motion between objects) on postural stability was the same for binocular and monocular viewing.

The increase of postural instability with both eyes viewing at far is reminiscent of the behaviour of hunter and archer during the aiming phase. It is common experience that hunter and archer spontaneously close one eye to aim more accurately their target. Coull, Weir, Tremblay, Weeks, and Elliott (2000) found that monocular vision is sufficient for precise control of limb movement during both grasping and aiming tasks. This behaviour could help to eliminate any confusing or inconvenient information from the other eye.

In a previous study (Kapoula & Le, 2006), we suggested that the contraction of medial rectus extra-ocular muscles caused by the sustained convergence of the eyes at near was responsible for better postural stability. Indirect evidence about the link between extra-ocular muscle activity and posture comes from the study of Roll and Roll (1987) who showed that vibrations on the superior recti shifted the mean position of the body forward while vibration of the inferior recti shifted this position backward. In contrast to convergence, divergence of the eyes needed to fixate at far distance is considered to involve relaxation of the medial recti. Relaxation of extra-ocular muscles would decrease the tone of the posture. Could relaxation and divergence of the eyes be more pronounced under both eyes viewing? The phoria tests show that the majority of our subjects of either group presented exophoria i.e. outward deviation of the briefly covered eye (see Table 1). Consequently the posture should be less stable when viewing monocularly at far than when viewing binocularly and that is not what we observed. It is not known, however, whether occlusion of one eye for 51.2s (as was the case during the posturography test) creates sustained outward deviation of the covered eye. Further studies recording eye movements could be useful to elucidate this point.

When both eyes are viewing, binocular cues such as binocular disparity are also used. Visual stabilization of body sway involves both sensitivity to movement in depth and sensitivity to lateral visual motion. It is possible that the sensitivity of postural control to changes of binocular disparity and to visual motion in depth resulting from fore-aft body sway decreases strongly at far distance. Indeed, for geometric reasons, sensitivity of disparity resulting from fore-aft visual sway decreases more with viewing distance than sensitivity to retinal position resulting from lateral body motion. Low sensitivity of visual motion in depth should induce high SDy values; yet our results show significant effect of distance on the area of the CoP but not on the SDy. Even though, SDy and SDx are believed to be controlled by distinct mechanisms, some interaction exists (Winter et al., 1996, 2003). Thus, the interaction effect of distance and viewing condition on CoP could be related to a strong decrease of visual motion sensitivity in depth based on binocular disparity cues at far distance. Again, further studies with eye movement recordings could be useful to elucidate this point.

Finally, cognitive function and emotional context can be also involved in our results. It is known that such factors influence the posture. Several studies use an additional cognitive task during posturography, such as visuo-spatial discrimination, word categorization, or generation of random number (Dault, Frank, & Allard, 2001), aloud repetition of letters with or without memorization of words formed by these letters (Dault et al., 2001; Dault, Yardley, & Frank, 2003). Such tasks have been found to reduce CoP excursions via the attention and the working memory mechanisms. Emotional context can be modulated, for example, by placing subjects on an unpredictable moving platform or at the edge of a high height surface. This provokes anxiety and fear of falling (Adkin, Frank, Carpenter, & Peysar, 2002; Carpenter, Frank, Adkin, Paton, & Allum, 2004). In such situations, the central nervous system adopts a cautious strategy and the subject controls their posture tighter which is manifested by reduced postural sway and increased frequency sway. At far distance, postural stability should be always decreased, because sensitivity to visual signals becomes weaker (retinal slip, motion lateral or in depth). On the other hand, when visual inputs are disrupted e.g. by covering one eye (monocular viewing), our subjects could increase their attention in order to correctly maintain the postural stability. Additional attention could help them to control tighter their posture regardless of the distance. Under binocular viewing, subjects may feel more comfortable, the attention factor intervenes less and thus, the distance effect becomes more visible.

In conclusion, this study shows that postural stability decreases under binocular viewing as distance increases while under monocular viewing the stability is the same regardless the distance. Increased sway at far with both eyes viewing is attributed to reduced sensitivity to visual motion in depth based on binocular disparity cues. For monocular viewing, we argue that covering one eye increases attention

that allows tighter posture control regardless of the distance.

Acknowledgments

Authors thank subjects and F. Jurion for visual examination help. Special thanks to two anonymous referees and to Dr. T. Eggert for their insightful comments. T.T. Lê was support by European Union (QLK6-CT-2002-00151: EUOKINESIS) and CNRS/CTI, Handicap contract.

References

- Adkin, A. L., Frank, J. S., Carpenter, M. G., & Peysar, G. W. (2002). Fear of falling modifies anticipatory postural control. *Experimental Brain Research*, *143*(2), 160–170.
- Amiridis, I. G., Hatzitaki, V., & Arabatzis, F. (2003). Age-induced modifications of static postural control in humans. *Neuroscience Letters*, *350*(3), 137–140.
- Aufauvre, V., Kemoun, G., Carrette, P., & Bergeal, E. (2005). Evaluation posturale à domicile chez la personne âgée: comparaison chuteurs-non chuteurs. *Annales de Readaptation et de Médecine Physique*, *48*(4), 165–171.
- Berardi, N., Pizzorusso, T., Ratto, G. M., & Maffei, L. (2003). Molecular basis of plasticity in the visual cortex. *Trends in Neurosciences*, *26*(7), 369–378.
- Bessou, M., Severac Cauquil, A., Dupui, P., Montoya, R., & Bessou, P. (1999). Specificity of the monocular crescents of the visual field in postural control. *Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie III*, *322*(9), 749–757.
- Bles, W., Kapteyn, T. S., Brandt, T., & Arnold, F. (1980). The mechanism of physiological height vertigo. II. Posturography. *Acta Otolaryngologica*, *89*(5-6), 534–540.
- Brandt, T., Paulus, W., & Straube, A. (1986). Vision and posture. In W. Bles & T. Brandt (Eds.), *Disorders of posture* (pp. 157–175). Amsterdam, New-York, Oxford: Elsevier Science Publishers B.V.
- Carpenter, M. G., Frank, J. S., Adkin, A. L., Paton, A., & Allum, J. H. (2004). Influence of postural anxiety on postural reactions to multi-directional surface rotations. *Journal of Neurophysiology*, *92*(6), 3255–3265.
- Corriveau, H., Hebert, R., Prince, F., & Raiche, M. (2001). Postural control in the elderly: an analysis of test-retest and interrater reliability of the COP-COM variable. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, *82*(1), 80–85.
- Corriveau, H., Hebert, R., Raiche, M., & Prince, F. (2004). Evaluation of postural stability in the elderly with stroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, *85*(7), 1095–1101.
- Corriveau, H., Hebert, R., Raiche, M., Dubois, M. F., & Prince, F. (2004). Postural stability in the elderly: empirical confirmation of a theoretical model. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, *39*(2), 163–177.
- Coull, J., Weir, P. L., Tremblay, L., Weeks, D. J., & Elliott, D. (2000). Monocular and binocular vision in the control of goal-directed movement. *Journal of Motor Behavior*, *32*(4), 347–360.
- Dault, M. C., Frank, J. S., & Allard, F. (2001). Influence of a visuo-spatial, verbal and central executive working memory task on postural control. *Gait Posture*, *14*(2), 110–116.
- Dault, M. C., Yardley, L., & Frank, J. S. (2003). Does articulation contribute to modifications of postural control during dual-task paradigms? *Brain Research Cognitive Brain Research*, *16*(3), 434–440.
- Day, B. L., Steiger, M. J., Thompson, P. D., & Marsden, C. D. (1993). Effect of vision and stance width on human body motion when standing: implications for afferent control of lateral sway. *Journal of Physiology*, *469*, 479–499.
- Doyle, T. L., Dugan, E. L., Humphries, B., & Newton, R. U. (2004). Discriminating between elderly and young using a fractal dimension analysis of centre of pressure. *International Journal of Medical Science*, *1*(1), 11–20.

- el-Mallakh, R. S., Wyatt, R. J., & Looney, S. W. (1993). Does motor cerebral dominance develop secondary to sensory dominance? *Perceptual and Motor Skills*, 76(2), 647–652.
- Fischer, Q. S., Beaver, C. J., Yang, Y., Rao, Y., Jakobsdottir, K. B., Storm, D. R., McKnight, G. S., & Daw, N. W. (2004). Requirement for the RIIbeta isoform of PKA, but not calcium-stimulated adenylyl cyclase, in visual cortical plasticity. *Journal of Neuroscience*, 24(41), 9049–9058.
- Fox, C. R. (1990). Some visual influences on human postural equilibrium: binocular versus monocular fixation. *Perception and Psychophysics*, 47(5), 409–422.
- Fu, L. N., & Boothe, R. G. (2001). A psychophysical measurement and analysis of motion perception in normal and binocularly deprived monkeys. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 42(11), 2547–2553.
- Gagey, P. M., & Weber, B. (1999). Stabilométrie. In: Masson (Ed.), *Posturologie: régulation et dérèglements de la station debout* (pp. 45–59). Paris.
- Gatev, P., Thomas, S., Kepple, T., & Hallett, M. (1999). Feedforward ankle strategy of balance during quiet stance in adults. *Journal of Physiology*, 514(Pt. 3), 915–928.
- Gentaz, R. (1988). L'oeil postural. *Agressologie*, 29(10), 685–686.
- Gravelle, D. C., Laughton, C. A., Dhruv, N. T., Katdare, K. D., Niemi, J. B., Lipsitz, L. A., & Collins, J. J. (2002). Noise-enhanced balance control in older adults. *Neuroreport*, 13(15), 1853–1856.
- Guerraz, M., Sakellari, V., Burchill, P., & Bronstein, A. M. (2000). Influence of motion parallax in the control of spontaneous body sway. *Experimental Brain Research*, 131(2), 244–252.
- Handa, T., Mukuno, K., Uozato, H., Niida, T., Shoji, N., & Shimizu, K. (2004). Effects of dominant and nondominant eyes in binocular rivalry. *Optometry and Vision Science*, 81(5), 377–383.
- Heinrich, S. P., Kromeier, M., Bach, M., & Kommerell, G. (2005). Vernier acuity for stereodisparate objects and ocular prevalence. *Vision Research*, 45(10), 1321–1328.
- Hertel, J., & Olmsted-Kramer, L. C. (2006). Deficits in time-to-boundary measures of postural control with chronic ankle instability. *Gait Posture*.
- Isotalo, E., Kapoula, Z., Feret, P. H., Gauchon, K., Zamfirescu, F., & Gagey, P. M. (2004). Monocular versus binocular vision in postural control. *Auris Nasus Larynx*, 31(1), 11–17.
- Ivers, R. Q., Mitchell, P., & Cumming, R. G. (2000). Visual function tests, eye disease and symptoms of visual disability: a population-based assessment. *Clinical and Experimental Ophthalmology*, 28(1), 41–47.
- Jones, L. F., 3rd, Classe, J. G., Hester, M., & Harris, K. (1996). Association between eye dominance and training for rifle marksmanship: a pilot study. *Journal of the American Optometric Association*, 67(2), 73–76.
- Jonsson, E., Seiger, A., & Hirschfeld, H. (2005). Postural steadiness and weight distribution during tandem stance in healthy young and elderly adults. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 20(2), 202–208.
- Kapoula, Z., & Le, T. T. (2006). Effects of distance and gaze position on postural stability in young and old subjects. *Experimental Brain Research*.
- Kommerell, G., Schmitt, C., Kromeier, M., & Bach, M. (2003). Ocular prevalence versus ocular dominance. *Vision Research*, 43(12), 1397–1403.
- Laitinen, A., Koskinen, S., Harkanen, T., Reunanen, A., Laatikainen, L., & Aromaa, A. (2005). A nationwide population-based survey on visual acuity, near vision, and self-reported visual function in the adult population in Finland. *Ophthalmology*, 112(12), 2227–2237.
- Magne, P., & Coello, Y. (2002). Retinal and extra-retinal contribution to position coding. *Behavioral Brain Research*, 136(1), 277–287.
- Mapp, A. P., Ono, H., & Barbeito, R. (2003). What does the dominant eye dominate? A brief and somewhat contentious review. *Perception and Psychophysics*, 65(2), 310–317.
- Masson, G., Mestre, D. R., & Pailhous, J. (1995). Effects of the spatio-temporal structure of optical flow on postural readjustments in man. *Experimental Brain Research*, 103(1), 137–150.
- McKnight, A. J., Shinar, D., & Hilburn, B. (1991). The visual and driving performance of monocular and binocular heavy-duty truck drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 23(4), 225–237.
- Nakagama, H., & Tanaka, S. (2004). Self-organization model of cytochrome oxidase blobs and ocular dominance columns in the primary visual cortex. *Cereb Cortex*, 14(4), 376–386.
- Paulus, W. M., Straube, A., & Brandt, T. (1984). Visual stabilization of posture. Physiological stimulus characteristics and clinical aspects. *Brain*, 107(Pt 4), 1143–1163.
- Paulus, W., Straube, A., Krafczyk, S., & Brandt, T. (1989). Differential effects of retinal target displacement, changing size and changing disparity in the control of anterior/posterior and lateral body sway. *Experimental Brain Research*, 78(2), 243–252.
- Portal, J. M., & Romano, P. E. (1998). Major review: ocular sighting dominance: a review and a study of athletic proficiency and eye-hand dominance in a collegiate baseball team. *Binocular Vision and Strabismus Quarterly*, 13(2 2nd Qtr), 125–132.
- Roll, J. P., & Roll, R. (1987). Kinaesthetic and motor effects of extraocular muscle vibration in man. In K. O'Regan & A. Levy-Schoen (Eds.), *Eye movements: from physiology to cognition* (pp. 57–68). North-Holland: Elsevier science publishers B.V.
- Rose, D. (1978). Monocular versus binocular contrast thresholds for movement and pattern. *Perception*, 7(2), 195–200.
- Rose, D. (1980). The binocular: monocular sensitivity ratio for movement detection varies with temporal frequency. *Perception*, 9(5), 577–580.
- Servos, P. (2000). Distance estimation in the visual and visuomotor systems. *Experimental Brain Research*, 130(1), 35–47.
- Servos, P., & Goodale, M. A. (1994). Binocular vision and the on-line control of human prehension. *Experimental Brain Research*, 98(1), 119–127.
- Servos, P., Goodale, M. A., & Jakobson, L. S. (1992). The role of binocular vision in prehension: a kinematic analysis. *Vision Research*, 32(8), 1513–1521.
- Taha, S., & Stryker, M. P. (2002). Rapid ocular dominance plasticity requires cortical but not geniculate protein synthesis. *Neuron*, 34(3), 425–436.
- von Noorden, G. K. (1996a). Near point convergence. In E. A. Klein (Ed.), *Binocular vision and ocular motility: theory and management of strabismus* (p. 202). St. Louis: Mosby.
- von Noorden, G. K. (1996b). Titmus stereo test. In E. A. Klein (Ed.), *Binocular vision and ocular motility: theory and management of strabismus* (pp. 275–276). St. Louis: Mosby.
- Wang, Y., Zatsiorsky, V. M., & Latash, M. L. (2006). Muscle synergies involved in preparation to a step made under the self-paced and reaction time instructions. *Clinical Neurophysiology*, 117(1), 41–56.
- Winter, D. A., Prince, F., Frank, J. S., Powell, C., & Zabjek, K. F. (1996). Unified theory regarding A/P and M/L balance in quiet stance. *Journal of Neurophysiology*, 75(6), 2334–2343.
- Winter, D. A., Patla, A. E., Ishac, M., & Gage, W. H. (2003). Motor mechanisms of balance during quiet standing. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 13(1), 49–56.
- Zaroff, C. M., Knutelska, M., & Frumkes, T. E. (2003). Variation in stereoacuity: normative description, fixation disparity, and the roles of aging and gender. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 44(2), 891–900.

Article 3



Role of ocular convergence in the Romberg quotient

Thanh-Thuan Lê^{*}, Zoï Kapoula

IRIS Group, CNRS-UMR 7152, Collège de France 11, place M. Berthelot, 75005 Paris, France

Received 20 December 2006; received in revised form 15 June 2007; accepted 22 June 2007

Abstract

The Romberg test generally shows that postural stability is better with eyes open than eyes closed; the Romberg quotient (RQ) is generally 2.5. This study examines the possible role of vergence angle on the RQ. Eighteen young (25.3 ± 2.7 years) and 17 old (61.6 ± 4.4 years) subjects were required to fixate a target at 40 cm or at 200 cm inducing different vergence angle (i.e. 8.6° and 1.7° , respectively) either with eyes open or closed. Postural stability of subjects was measured with force platform (TechnoConcept). The RQ was about 2 at 40 cm but dropped to 1 at 200 cm. In a second experiment, 15 subjects (26.7 ± 5.5 years) run the Romberg test with eye movement measures (Chronos). Subjects were required to fixate a target placed at 20 cm, 40 cm, 90 cm, 200 cm or 350 cm either in light or in dark. The RQ at 20 cm and 40 cm was close to 2 and dropped to 1 at 90 cm and beyond. In parallel, the vergence angle at 20 cm and 40 cm changed significantly between light and dark, while at 90 cm and beyond it was stable (about 2° both in light and dark). The distance had a significant effect on the covariance between the RQ based on the anterior–posterior sway, and the change of vergence angle. We suggest different ways of control of posture according to the viewing distance: at near distance and in the light, the CNS uses vision coupled with oculo-motor convergence signals (efferent and afferent) leading to high RQ; at intermediate and far distances, it would use mostly internal signals (vestibular, proprioceptive, somatosensory), and similarly in the light and in the dark.

© 2007 Elsevier B.V. All rights reserved.

Keywords: Postural stability; Romberg quotient; Distance; Vergence angle; Senescence

1. Introduction

The Romberg test was invented by the neurologist Moritz Heinrich Romberg (1795–1873) who compared the postural body sway in quiet stance with eyes open and eyes closed. At the beginning, this test was applied on patients with *tuberculous dorsalis* in order to measure qualitatively the conscious proprioception. Later, the use of the Romberg test was extended in posturography in order to measure the influence of vision on postural stability; several studies quantified an increment of the body sway with eyes closed relative to eyes open [1–5]. On the basis such studies the “*French Posturology Association*” (AFP) set the standardized conditions for measurement of postural stability in quiet stance (e.g. healthy subject inside a booth fixating a target

placed at the distance of 90 cm [5]). The mean of surface of the center of pressure (CoP) with eyes closed and eyes open was 225 mm^2 and 91 mm^2 , respectively [5], and the ratio was 2.5. This ratio called the Romberg quotient is believed to reflect the influence of vision.

We calculated the Romberg quotient from studies of healthy young and elderly [1–15]. The value of Romberg quotient was 2.5 or above only for 6 from the 15 studies [1–5,15]. Such differences of the RQ values could be due to experimental settings: use of a free room environment *versus* a booth, posture parameters studied (surface of CoP [5,6,11,14], antero-posterior and lateral sway [8–10,13], root mean square [1–4,12], length of CoP sway [11], fractal dimension [14], diffusion coefficient [15], sway velocity [7,11]); the distance subject–target was also different from one study to the other.

Group of Brandt found that postural stability decreases when eyes–object distance increases [1–4]. The angular size of retinal slip caused by body sway is higher at near distance than at far. The effect of distance was recently confirmed by

^{*} Corresponding author at: Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l’Action, UMR 7152, CNRS-Collège de France 11, place M. Berthelot, 75005 Paris, France. Tel.: +33 144271636; fax: +33 144271382.

E-mail address: thanh-thuan.le@college-de-france.fr (T.-T. Lê).

our group [16], who also showed the importance of convergence angle of the eyes at different distances.

The purpose of the present study is to examine the Romberg test for both young and old subjects taking into the consideration the viewing distance and related oculo-motor vergence signals. The role of ocular motor signals for postural control received increasing evidence in recent studies. Strupp et al. [17] and Glasauer et al. [18] found that smooth pursuit increased postural sway in healthy subjects. Jahn et al. [19] showed that vestibular neuritis patients with spontaneous nystagmus presented an improvement of postural stability when the peak slow phase velocity of nystagmus decreased during visual fixation. Roll and colleagues showed that vibration of the extra ocular muscles provokes illusionary sensation of body motion in one direction inducing body sway responses to the opposite direction [20]. The execution of saccades was also found to influence the postural stability. Some studies reported an improvement of posture [21–23], other studies reported a deterioration in comparison to visual fixation [24]. Guerraz et al. [25] who evaluated the effect of the motion parallax on posture control concluded that the efferent signals related to the eye tracking of the target could play a role on postural stability.

To our knowledge, the role of the changes in vergence angle on the RQ has not been examined. In the first experiment, only posturography was done at two distances (40 cm and 200 cm) for young and elderly. The second experiment combines posturography and eye movement recording in the light *versus* dark at five different distances (20 cm, 40 cm, 90 cm, 200 cm and 350 cm).

2. Materials and methods

2.1. Subjects

In the first experiment, 18 young subjects, age range from 22 to 33 years (mean age 25.3 ± 2.7 years), and 17 older subjects ranged from 55 to 71 years (61.6 ± 4.4 years) were recruited. In the second experiment, 15 young subjects, age range from 20 to 41 years (26.7 ± 5.5 years) were selected. Medical examination and several preliminary tests confirmed normal findings without neurological signs, and no medication.

Examination of the visual function (visual acuity, stereoacuity and near point of convergence or NPC) was also done for all subjects except two young and two old subjects. As experiment 1 was run on young and elderly adults, the Wirt test being black and white was more appropriate, particularly for elderly. Sixteen elderly subjects wore their habitual spectacle correction (three subjects for far vision, one for near and the remaining had bifocals); optical correction was always similar for the two eyes and no subject had anisotropia.

All young subjects (for the two experiments) had normal visual acuity ($>8/10$), perfect binocular vision (measured by stereoacuity test; their threshold was always below 100 s of arc, i.e. 60 which is normal [26]); their vergence capacities (measured with the NPC were also normal, i.e. under 10 cm [27]).

Aged subjects showed in general reduced visual acuity ($>6/10$). Stereoacuity was normal for the majority of the subjects except for

two (their scores were 120 s and 140 s of arc, respectively); the NPC was <15 cm. Recall that adult values are <100 s of arc for stereoacuity and <10 cm for NPC [26,27]. Such mild deviations from the adult normal thresholds are expected with age. Note that all aged subjects were able to converge the eyes appropriately without sensing double vision as our near posturography testing was done at 40 cm.

Absence of the balance problems was grossly evaluated with the Unterberger/Fukuda stepping test. The investigation adhered to the tenets of the Declaration of Helsinki and was approved by the institutional human experimentation committee. Informed consent was obtained from all subjects after the nature of the procedure had been explained.

2.2. Platform

We used a posturography apparatus consisted of two dynamometric platforms; one for each foot (produced by TechnoConcept, Céreste, France). The excursions of the center of pressure (CoP) were measured during 51.2 s; the equipment contained an Analogical–Digital converter of 16 bits with sampling frequency of 40 Hz.

2.3. Eye movement recording

In the second experiment, the Romberg test and posturography were combined with eye movement recording. The Chronos Skalar video oculography apparatus was used; it consisted of infra-red cameras (CMOS sensors see Ref. [28]) and allowed to record eye movements in the dark. As the eyes were fixating, a low sampling frequency was used, 50 frames *per* second.

2.4. Visual target

A large room, within which a free space of 400 cm \times 180 cm was available, was used for the experiment. A vertical white screen (200 cm \times 150 cm) was used to display the targets. The target was a letter “x” placed between two vertical segments. The angular size of the letter *x* was adjusted to subtend 1° for viewing distances (40 cm and 200 cm in experiment 1 and 20 cm, 40 cm, 90 cm, 200 cm and 350 cm in experiment 2).

2.5. Procedure

Subjects were placed on the platform. During posturography (51.2 s), they were asked to fixate the target on the center of the screen. In experiment 1, two conditions were run: eyes open followed by eyes closed condition [5]. The two conditions were done at two distances: 40 cm and 200 cm (that corresponds to 8.6° and 1.7° of eye convergence, respectively). In the eyes closed condition, the subjects first fixated the target for a few seconds then they were instructed to close their eyes and were required to keep fixating the target viewed previously; posturography began 3 s after subjects closed their eyes. The order of the distances was counter-balanced between subjects.

In experiment 2, two conditions were run: light *versus* dark. In the light condition, the instruction was the same as in the eyes open condition of experiment 1 “fixate the target”. Before start the dark condition, the subject saw the target in the light, when the lights were switched off the subject was required to keep fixating the imagined target at the same distance without making saccades. The

two conditions were done at five distances: 20 cm, 40 cm, 90 cm, 200 cm and 350 cm; the corresponding convergence angle was 17°, 8.6°, 3.8°, 1.7° and 1°. The order of the distance was counter-balanced between the subjects; and for each distance, the order of the light *versus* dark condition was also counterbalanced.

In experiment 2, before and after recording of eye position and posturography, a calibration of the eye movement recording apparatus was done as follows. On the screen a matrix of five markers (each 1° of angular size see Visual target paragraph) was placed: one at the center and the others at 5° left, right, up and down. Subjects performed saccades from center to each of these locations and back to center.

2.6. Postural measures

We analysed the surface of the CoP excursions, the standard deviations of antero-posterior (S.D._y) and lateral body sways (S.D._x) and the variance of speed. The surface of CoP was the ellipsoid, which includes 90% of the instantaneous positions of the CoP [5]. Note that many recent studies use standard deviation of CoP [29,30]. For each parameter of posturography and for each subject, we measured the ratio eyes closed/eyes open in experiment 1, and in experiment 2, the ratio eyes open in dark/eyes open in light (e.g. the Romberg quotient); the group mean in Table 1A–C are the average of individual Romberg quotients.

2.7. Eye movement measures

From the two calibrated eye position signals we derived the vergence signal, i.e. the difference between left and right eye. A measure of vergence angle was done at 10 different time points starting 3 s from the end of posturography recording (51.2 s) and going back every 5 s (Fig. 1).

Mean vergence angle throughout the 51.2 s of posturography was the average of the 10 different time measures. This was done for each subject for each distance, in light and dark condition. Finally for each subject and for each distance we calculate the

changes of the vergence angle between light and dark (light–dark). Table 2 shows the group mean changes of vergence angle.

2.8. Statistical analysis

For experiment 1, a two-way ANOVA was run on Romberg quotient for each postural parameter (surface of CoP, S.D._x, S.D._y and variance of speed). The main factors were the distance and the age group. For experiment 2, a one-way ANOVA was done on the RQ with as main factor the distance (5 levels). For the vergence angle in experiment 2, a two-way ANOVA was run with two factors: the distance and dark *versus* light condition. Finally, an ANCOVA was run with the distance as categorical variable, the RQ for each of the postural parameters as the dependent variables and the vergence angle change between light and dark as the co-variant variable. Posthoc analysis was made with the Fischer's LSD test.

3. Results

3.1. Posture measures in experiment 1

The group mean values of the postural parameters (surface of CoP, S.D._x, S.D._y and variance of speed) under eyes open, eyes closed and the Romberg quotient are shown in Table 1A for each age group and for each distance. In the eyes open condition, all values of postural parameters were lower at near distance than at far distance. However, in the eyes closed condition, the values were high and were similar between near and far distance. Thus, the Romberg quotient (RQ), calculated on the basis of individual data (e.g. the ratio eyes closed/eyes open), was higher at near distance than the RQ at far. Next, we will present the results of ANOVA evaluating the effects of the age and the distance on RQ from each of the postural parameters.

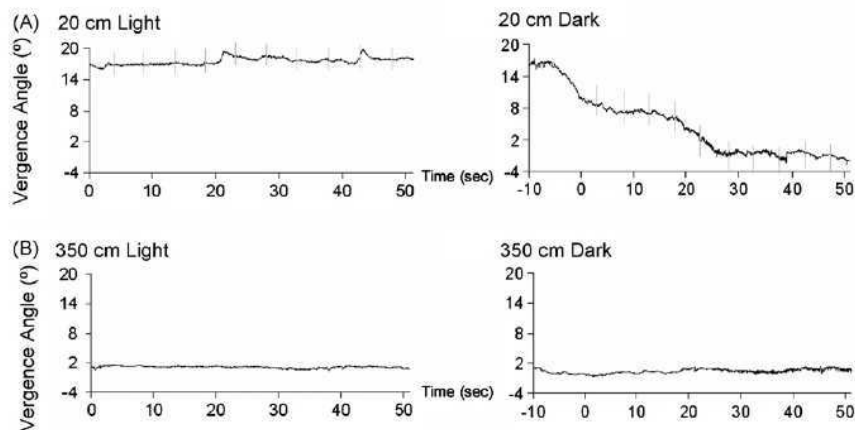


Fig. 1. Vergence angle (°) during posturography from one of the participants (at 20 cm and 350 cm of distance in light vs. dark). Downward inflection corresponds to relative divergence and upward inflection to convergence. The posturography starts at 0 s and finishes at 51.2 s. Subjects were already in dark approximately 10 s before the beginning of posturography. The vergence angle began to decrease during this period. The decrease was dramatic at 20 cm and continued further during the posturography (A). By 25 s the visual axes were parallel (vergence angle about 1°). At 350 the decrease was small; the vergence angle is about 1° always in the dark or in the light (B). Markers starting 3 s from the end of posturography and going back every 5 s indicate the instances of vergence measure (vertical grey lines).

Table 1
 Mean group \pm standard deviation for the surface of CoP, standard deviation of lateral (S.D._x) and antero/posterior (S.D._y) body sway and variance of speed with eyes open (EO), eyes closed (EC) and Romberg quotient (RQ) at 40 cm and 200 cm for young and old subjects in experiment 1 (A); and in the light, in the dark and the RQ at 20 cm, 40 cm, 90 cm, 200 cm and 350 cm in experiment 2 (B and C)

Parameters	Experiment 1											
	Young					Aged						
	40 cm		200 cm			40 cm		200 cm				
	EO	EC	RQ	EO	EC	RQ	EO	EC	RQ	EO	EC	RQ
A												
Surface (mm ²)	104 \pm 93	146 \pm 117	1.8 \pm 1.1	165 \pm 115	150 \pm 117	1.0 \pm 0.4	116 \pm 98	159 \pm 121	2.0 \pm 2.1	191 \pm 189	170 \pm 187	1.0 \pm 0.5
S.D. _x (mm)	2.1 \pm 1.2	2.4 \pm 1.0	1.4 \pm 0.6	2.8 \pm 1.6	2.6 \pm 1.1	1.0 \pm 0.3	2.1 \pm 1.1	2.3 \pm 1.1	1.2 \pm 0.5	2.5 \pm 1.2	2.1 \pm 1.2	0.9 \pm 0.3
S.D. _y (mm)	3.5 \pm 1.3	4.3 \pm 1.9	1.4 \pm 0.7	4.6 \pm 1.4	4.2 \pm 1.9	0.9 \pm 0.4	3.7 \pm 1.6	4.5 \pm 1.9	1.4 \pm 0.8	5.0 \pm 2.7	4.9 \pm 2.3	1.1 \pm 0.4
Variance of speed (mm ² /s ²)	23.5 \pm 12.8	45.9 \pm 34.3	2.0 \pm 0.8	25.8 \pm 15.5	42.3 \pm 21.6	1.8 \pm 0.7	34.2 \pm 21.4	83.2 \pm 121.3	2.5 \pm 3.1	44.7 \pm 32.6	70.0 \pm 49.2	1.7 \pm 1.1
Parameters	Experiment 2											
	20 cm						40 cm					
	Light		Dark		RQ		Light		Dark		RQ	
B												
Surface (mm ²)	83 \pm 61	181 \pm 134	2.8 \pm 1.9	97 \pm 57	200 \pm 176	2.2 \pm 1.5						
S.D. _x (mm)	2.1 \pm 1.2	3.0 \pm 1.8	1.6 \pm 0.9	2.3 \pm 1.0	3.3 \pm 2.0	1.5 \pm 0.6						
S.D. _y (mm)	3.0 \pm 1.0	5.0 \pm 1.8	1.8 \pm 0.7	3.4 \pm 1.1	4.7 \pm 1.1	1.5 \pm 0.6						
Variance of speed (mm ² /s ²)	14.7 \pm 8.7	40.4 \pm 24.5	2.9 \pm 1.3	19.3 \pm 14.7	46.9 \pm 40.5	2.7 \pm 1.3						
Parameters	Experiment 2											
	90 cm						350 cm					
	Light		Dark		RQ		Light		Dark		RQ	
C												
Surface (mm ²)	157 \pm 98	208 \pm 200	1.4 \pm 1.1	183 \pm 158	205 \pm 150	1.6 \pm 1.1	211 \pm 166	180 \pm 125	1.2 \pm 0.9			
S.D. _x (mm)	2.6 \pm 1.0	3.2 \pm 2.4	1.2 \pm 0.5	2.8 \pm 1.6	3.2 \pm 1.6	1.4 \pm 0.8	3.3 \pm 2.1	2.8 \pm 1.4	1.0 \pm 0.5			
S.D. _y (mm)	4.5 \pm 1.5	4.9 \pm 1.9	1.2 \pm 0.6	4.6 \pm 1.8	5.2 \pm 2.1	1.2 \pm 0.5	4.7 \pm 1.9	4.8 \pm 1.5	1.1 \pm 0.4			
Variance of speed (mm ² /s ²)	23.9 \pm 12.5	43.2 \pm 30.9	1.8 \pm 1.1	30.4 \pm 32.9	45.2 \pm 26.4	1.9 \pm 0.8	29.5 \pm 23.1	50.2 \pm 30.0	2.2 \pm 1.2			

Table 2

Group means \pm standard deviation of vergence angle in light and in dark and group means \pm standard deviation of change of vergence angle (light–dark) at 20 cm, 40 cm, 90 cm, 200 cm and 350 cm

	Vergence angle ($^{\circ}$)				
	20 cm	40 cm	90 cm	200 cm	350 cm
Light	17.0 \pm 0.9	8.4 \pm 0.4	3.7 \pm 0.4	1.7 \pm 0.5	1.0 \pm 0.5
Dark	8.4 \pm 5.3	5.1 \pm 2.7	3.0 \pm 2.2	1.9 \pm 1.7	1.2 \pm 1.5
Change	8.6 \pm 5.1	3.3 \pm 2.5	0.7 \pm 2.0	-0.2 \pm 1.6	-0.2 \pm 1.3

3.1.1. Age

We can see that the variance of speed was higher in elderly than in young subjects. This result is consistent with those of our previous studies [16,31]. However, no difference was found for the RQ.

3.1.2. Distance

There was a main effect of distance on Romberg quotient; it is significantly higher at near distance than at far for the surface of CoP ($F_{(1,33)} = 12.7$, $p = .001$), for the S.D._x ($F_{(1,33)} = 17.1$, $p = .0002$) and for the S.D._y ($F_{(1,33)} = 9.11$, $p = .005$, Fig. 2A).

3.2. Posture measures in experiment 2

3.2.1. Distance

The group mean values under eyes open in light *versus* in dark and the Romberg quotient are shown in Table 1B and C for each distance. There was a main effect of distance for all postural parameters, ($F_{(4,56)} = 4.8$; $p = .0022$ for the surface of CoP, $F_{(4,56)} = 2.7$; $p = .041$ for the S.D._x, $F_{(4,56)} = 5.2$; $p = .0012$ for the S.D._y, $F_{(4,56)} = 3.4$; $p = .015$ for the variance of speed, Fig. 2B).

For the surface of CoP, the RQ was significantly higher at 20 cm than at 90 cm ($p = .0014$), 200 cm ($p = .0077$) and 350 cm ($p = .00042$), and higher at 40 cm than at 350 cm ($p = .021$).

For the S.D._x, the RQ was significantly higher at 20 cm than at 90 cm ($p = .031$) and 350 cm ($p = .0044$), and higher at 40 cm than at 350 cm ($p = .043$).

For the S.D._y, the RQ was significantly higher at 20 cm than at 40 cm ($p = .048$), 90 cm ($p = .00029$), 200 cm ($p = .0015$) and 350 cm ($p = .00047$).

For the speed variance, the RQ was significantly higher at 20 cm than at 90 cm ($p = .0076$), 200 cm ($p = .016$) and 350 cm ($p = .029$), and higher at 40 cm than at 90 cm ($p = .017$) and 200 cm ($p = .035$).

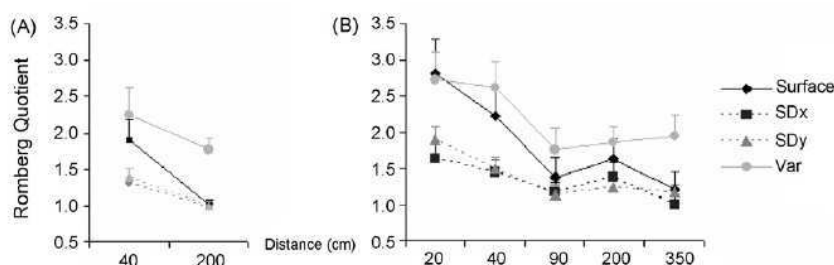


Fig. 2. The Romberg quotient (RQ) for all postural parameters at 40 cm and 200 cm in experiment 1 (A) and at 20 cm, 40 cm, 90 cm, 200 cm and 350 cm in experiment 2 (B). The RQ values were found generally higher for the near distances (20 cm and 40 cm) than those for the far distances.

3.3. Eye movement measures—vergence angle

The convergence angle at 20 cm (Fig. 1A) decreases progressively in the dark while it decreases a very little at 350 cm (Fig. 1B). Table 2 shows for each distance the group mean vergence angle for the light and dark condition and the group mean of the change of vergence angle between the two conditions. At near distances (20 cm and 40 cm), the data show a difficulty in maintaining a high degree of convergence in the absence of vision. The ANOVA applied on the individual mean vergence angle showed a significant interaction between distance and (dark *versus* light) condition ($F_{(4,52)} = 49.1$; $p < 10^{-6}$). The posthoc test showed that for the near distances (20 cm and 40 cm) convergence angle decreased significantly in the dark relative to the light (8.4° *versus* 17°, $p < 10^{-6}$; 4.4° *versus* 8.4°, $p < 10^{-5}$, respectively, Fig. 3A indicated by asterisks).

3.4. Romberg quotient and vergence angle change

The distance had no significant effect on the co-variation between the change of vergence angle and the RQ based on the surface of CoP ($r^2 = .36$, $F_{(4,68)} = 1.7$, $p = .22$), the lateral sway ($r^2 = .27$, $F_{(4,68)} = 1.02$, $p = .40$) and the variance of speed ($r^2 = .20$, $F_{(4,68)} = 1.40$, $p = .15$). However, it had a significant effect on the co-variation between RQ based on the anterior–posterior sway and the change of vergence angle ($r^2 = .34$, $F_{(4,68)} = 2.7$, $p = .038$, see Fig. 3B). The posthoc test indicated that the RQ of the S.D._y was higher at 20 cm than those for the further distances (40 cm, 90 cm, 200 cm and 350 cm). For co-variation between RQ based on the other parameters (surface, S.D._x, and variance of speed) and change of vergence angle, the distance had no significant effect.

4. Discussion

4.1. No age effect on the Romberg quotient

We found a significant increase of variance of speed with age. This finding is in line with our previous studies [16,31]; it is also in line with the study of Prieto et al. [32] who found

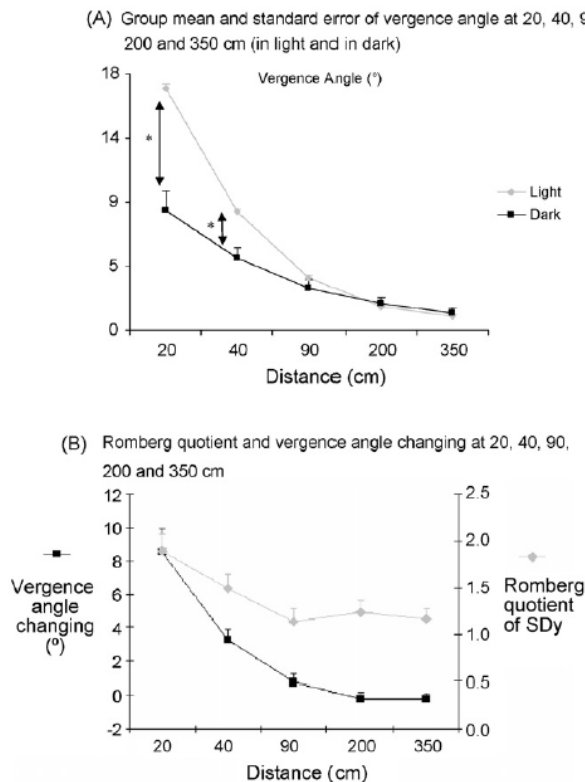


Fig. 3. (A) Group mean and standard error of vergence angle for 20 cm, 40 cm, 90 cm, 200 cm and 350 cm in light vs. dark. In dark, the high vergence angle necessary to view at 20 cm and 40 cm (17° and 8.6° , respectively) was not maintained and decreased significantly. In contrast, the vergence angles at 90 cm, 200 cm and 350 cm remained stable. (B) The vergence angle change (VAC, left ordinate axis) between light and dark and the Romberg quotient (RQ, right ordinate axis) of the S.D._y at 20 cm, 40 cm, 90 cm, 200 cm and 350 cm. The distance has significant effect on the co-variance between the VAC and the RQ of S.D._y. The RQ of S.D._y is significantly higher at 20 cm than those from further distances.

that the mean velocity of CoP was higher in elderly (68.0 years of mean age) than in young subjects for both eyes closed and eyes open conditions.

However, when we consider the Romberg quotient (eyes closed/eyes open), no difference of the RQ was found between age groups in our study. This finding is consistent with the observations from Blaszczyk et al. [13] showing that the RQ is only mildly higher in elderly for limb load asymmetry, antero-posterior and medio-lateral sways in compared with young. Similarly, the increment of the mean velocity of the CoP in elderly reported by Prieto et al. [32] was mild when the RQ was calculated. Our data contrast those of Doyle et al. [14] who observed a significant increment of the RQ in elderly for the surface of CoP. Note, however that our subjects were younger (61.6 ± 4.4 years versus 69.5 ± 6.2 years in the study of Doyle et al. [14]). To summarize for elderly at the early of the sixties the RQ is similar to that for young subjects.

4.2. Distance effect

Experiment 1 shows that at far distance (200 cm) the RQ drops to one for subjects of either age group. Thus at far distance closing the eyes does not decrease stability. The results from experiment 2 confirm those of the first experiment and show that this drop to value of one starts from the distance of 90 cm and occurs for all distances beyond. This distance dependency suggests that other factors than vision can influence posture regulation in dark versus light and the RQ values. Eye movement recording in experiment 2 provides more information about possible physiological mechanisms that will be discussed below.

4.3. Role of convergence angle and oculo-motor signals

The present study concerns the capacity to maintain vergence angle for different distances. In experiment 1, when the screen was at near distance the eyes converged. But when the eyes were closed and the subject was required to keep fixating at the same close distance only high level cues could be used to keep convergence (e.g. sensation of screen proximity). How long and how well the eyes are kept convergent is not known. This issue deserves further research with magnetic field eye coil or electro-oculography.

Eye movement recording, done in experiment 2, showed that although subjects were required to keep fixating the target previously appeared in light, they were not able to maintain their angle of convergence at the appropriate distance. Indeed the high convergence angle at 20 cm and 40 cm in light progressively decreased in dark. In contrast from 90 cm and beyond, the convergence angle being small in light fluctuated very little in the dark. The statistical analysis shows a significant effect of the distance on the co-variance between vergence angle and the RQ based on the antero-posterior sway. As the change of vergence angle is related to change of viewing distance in depth, the co-variance of the antero-posterior sway seems to be the most sensitive postural parameter. The explanation we propose is the following. In the light and at near distance the eyes are converging by a high degree. In addition to vision, the oculo-motor signals (efferent, afferent related to convergence angle) could contribute to body stability. This explanation is line with our prior reports on the role of vergence [16]. We found that while viewing at far, the use of prisms that forced the eyes to converge improved postural stability as if the subject fixated naturally at near. Recall that proprioception of extra-ocular muscles is rich and there is a synergy between extra-ocular muscles proprioception and neck muscles proprioception [33]. In man head fixed, tonic and dynamic coupling of the extra-ocular muscles discharge with neck muscles discharge had been shown earlier [34,35]. Finally, EEG study showed that convergence of eyes activated highly several posterior and central cortical areas [36].

5. Significance of the Romberg test

This study calls for a new interpretation of the Romberg quotient and its significance for the role vision. As the RQ is close to value of one for all intermediate and far distances, one should conclude that visual signals are less important than believed before at least for intermediate and far distances. Indeed, the angular size of visual movement, motion parallax, the depth sensitivity based on binocular visual cues decreases with viewing distances. The visual contribution and the Romberg test has been studied by Cornilleau-Péres et al. [37] who examined aged subjects. Note that the authors used a short viewing distance (50 cm) because it enhances the visual contribution to postural stability. Moreover they proposed the “stabilization ratio” (SR) as method to evaluate this visual contribution. The SR was the ratio between eyes closed and eyes open conditions, similar to the Romberg quotient, but the SR used the $\log(1 + x)$, where x was either the velocity of the CoP or the root mean square of the CoP. With this method, the authors found that SR of CoP velocity was more sensitive coefficient of visual contribution to postural stability than the Romberg quotient.

Another relevant study is that of Guerraz et al. [25] who studied the influence of motion parallax on postural control using different distances between the foreground and the background stimuli found an improvement of postural stability when the parallax was yielded (by the presence of second target placed at 170 cm or at 85 cm from the foreground fixation target). They propose the existence of two modes of visual detection of body sway, afferent (retinal slip) and efferent (extra-retinal or eye movements based). Based on the co-variance between the vergence angle and the Romberg quotient, we propose a similar idea but this time related to the viewing distance. At near distance and in the light, the central nervous system uses vision coupled with oculo-motor convergent signals (afferent and efferent) decreasing particularly the antero-posterior sways and leading to a high RQ of S.D.; while at intermediate and far distances, it would use more internal signals (vestibular, proprioceptive, somatosensory and similarly in light and in the dark).

Acknowledgements

The authors thank the subjects, F. Jurion for visual examination help.

T.T. Lê was supported by European Union (QLK6-CT-2002-00151: EUOKINESIS) and CNRS/CTI, Handicap contract.

Conflict of interest

None of the authors have any conflicts of interest related to the paper titled: “Role of ocular convergence in the Romberg quotient”.

References

- [1] Brandt T, Paulus W, Straube A. Vision and posture. In: Brandt T, editor. Disorders of posture. Elsevier Science Publishers B.V.; 1986 p. 157–75.
- [2] Bles W, Kapteyn TS, Brandt T, Arnold F. The mechanism of physiological height vertigo. II. Posturography. *Acta Otolaryngol* 1980;89:534–40.
- [3] Paulus W, Straube A, Krafczyk S, Brandt T. Differential effects of retinal target displacement, changing size and changing disparity in the control of anterior/posterior and lateral body sway. *Exp Brain Res* 1989;78:243–52.
- [4] Paulus WM, Straube A, Brandt T. Visual stabilization of posture. Physiological stimulus characteristics and clinical aspects. *Brain* 1984;107(Pt 4):1143–63.
- [5] Gagey PM, Weber B. Stabilométrie. In: Masson E, editor. Posturologie: régulation et dérèglements de la station debout. Masson; 1999. p. 45–59.
- [6] Ouaknine M, Hugon M, Roman S, Thomassin JM, Sarabian N, Regis J. Effets posturaux du traitement par gamma knife des neurinomes de l’acoustique (schwannomes vestibulaires). *Neurochirurgie* 2004;50:358–66.
- [7] Gerr F, Letz R, Green RC. Relationships between quantitative measures and neurologist’s clinical rating of tremor and standing steadiness in two epidemiological studies. *Neurotoxicology* 2000;21:753–60.
- [8] Bryant EC, Trew ME, Bruce AM, Kuisma RM, Smith AW. Gender differences in balance performance at the time of retirement. *Clin Biomech (Bristol Avon)* 2005;20:330–5.
- [9] Corriveau H, Hebert R, Raiche M, Prince F. Evaluation of postural stability in the elderly with stroke. *Arch Phys Med Rehabil* 2004;85:1095–101.
- [10] Corriveau H, Hebert R, Prince F, Raiche M. Postural control in the elderly: an analysis of test-retest and interrater reliability of the COP-COM variable. *Arch Phys Med Rehabil* 2001;82:80–5.
- [11] Nagahori T, Hirashima Y, Umemura K, Nakagawa H, Kamisaki Y, Origasa H, et al. Association of pontine small infarction (lacuna) with disturbance of postural stability. *Eur Neurol* 2004;51:138–43.
- [12] Lafond D, Corriveau H, Prince F. Postural control mechanisms during quiet standing in patients with diabetic sensory neuropathy. *Diabetes Care* 2004;27:173–8.
- [13] Blaszczyk JW, Prince F, Raiche M, Hebert R. Effect of ageing and vision on limb load asymmetry during quiet stance. *J Biomech* 2000;33:1243–8.
- [14] Doyle TL, Dugan EL, Humphries B, Newton RU. Discriminating between elderly and young using a fractal dimension analysis of centre of pressure. *Int J Med Sci* 2004;1:11–20.
- [15] Bosek M, Grzegorzewski B, Kowalczyk A, Lubinski I. Degradation of postural control system as a consequence of Parkinson’s disease and ageing. *Neurosci Lett* 2005;376:215–20.
- [16] Kapoula Z, Le TT. Effects of distance and gaze position on postural stability in young and old subjects. *Exp Brain Res* 2006;173:438–45.
- [17] Strupp M, Glasauer S, Jahn K, Schneider E, Krafczyk S, Brandt T. Eye movements and balance. *Ann N Y Acad Sci* 2003;1004:352–8.
- [18] Glasauer S, Schneider E, Jahn K, Strupp M, Brandt T. How the eyes move the body. *Neurology* 2005;65:1291–3.
- [19] Jahn K, Strupp M, Krafczyk S, Schuler O, Glasauer S, Brandt T. Suppression of eye movements improves balance. *Brain* 2002;125:2005–11.
- [20] 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 [discussion 57–60].
- [21] Uchida T, Hashimoto M, Suzuki N, Takegami T, Iwase Y. Effects of periodic saccades on the body sway in human subjects. *Neurosci Lett* 1979;13:253–8.
- [22] Oblak B, Gregoric M, Gyergyek L. Effects of voluntary eye saccades on body sway. In: Igarashi M, Black FO, editors. Vestibular and visual

- control on posture and locomotion equilibrium. 7th Int. Symp. Int. Posturography. 1985.p. 122–6.
- [23] Kikukawa M, Taguchi K. Characteristics of body sway during saccadic eye movement in patients with peripheral vestibular disorders. In: Igarashi M, Black FO, editors. Vestibular and visual control on posture and locomotion equilibrium. 7th Int. Symp. Int. Posturography. 1985.p. 355–9.
- [24] Brandt T. Eye movements, oculomotor disorders, and postural balance. In: Brandt T, editor. Vertigo: its multisensory syndromes. 2nd ed., Springer; 1999. p. 428–9.
- [25] Guerraz M, Sakellari V, Burchill P, Bronstein AM. Influence of motion parallax in the control of spontaneous body sway. *Exp Brain Res* 2000;131:244–52.
- [26] von Noorden GK. Titmus stereo test. In: Klein EA, editor. Binocular vision and ocular motility: theory and management of strabismus. Mosby; 1996. p. 275–6.
- [27] von Noorden GK. Near point convergence. In: Klein EA, editor. Binocular vision and ocular motility: theory and management of strabismus. Mosby; 1996. p. 202.
- [28] Clarke AH, Ditterich J, Druen K, Schonfeld U, Steineke C. Using high frame rate CMOS sensors for three-dimensional eye tracking. *Behav Res Methods Instrum Comput* 2002;34:549–60.
- [29] Gravelle DC, Laughton CA, Dhruv NT, Katdare KD, Niemi JB, Lipsitz LA, et al. Noise-enhanced balance control in older adults. *Neuroreport* 2002;13:1853–6.
- [30] Hertel J, Olmsted-Kramer LC. Deficits in time-to-boundary measures of postural control with chronic ankle instability. *Gait Posture* 2007;25:33–9.
- [31] Le TT, Kapoula Z. Distance impairs postural stability only under binocular viewing. *Vision Res* 2006;46:3586–93.
- [32] Prieto TE, Myklebust JB, Hoffmann RG, Lovett EG, Myklebust BM. Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Trans Biomed Eng* 1996;43:956–66.
- [33] Büttner-Ennever JA. Structural organization of the extraocular muscles. In: Büttner-Ennever JA, editor. Progress in brain research. Neuroanatomy of the oculomotor system, vol. 151. Elsevier Science Publishing Company; 2006.
- [34] André-Deshays C, Berthoz A, Revel M. Eye-head coupling in humans. I. Simultaneous recording of isolated motor units in dorsal neck muscles and horizontal eye movements. *Exp Brain Res* 1988;69:399–406.
- [35] André-Deshays C, Revel M, Berthoz A. Eye-head coupling in humans. II. Phasic components. *Exp Brain Res* 1991;84:359–66.
- [36] Tzelepi A, Lutz A, Kapoula Z. EEG activity related to preparation and suppression of eye movements in three-dimensional space. *Exp Brain Res* 2004;155:439–49.
- [37] Cornilleau-Peres V, Shabana N, Droulez J, Goh JC, Lee GS, Chew PT. Measurement of the visual contribution to postural steadiness from the COP movement: methodology and reliability. *Gait Posture* 2005;22:96–106.

Article 4



ELSEVIER

Auris Nasus Larynx xxx (2007) xxx–xxx

AURIS NASUS
LARYNX
INTERNATIONAL JOURNAL
OF ORL & HNS

www.elsevier.com/locate/anl

Saccades horizontal or vertical at near or at far do not deteriorate postural control

Frederic Rey^{a,1}, Thanh-Thuan Lê^{a,1}, René Bertin^b, Zoï Kapoula^{a,*}

^aIRIS Group, Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action (LPPA), UMR 7152, CNRS, Collège de France 11, place M. Berthelot, 75005 Paris, France

^bIRETS, MSIS, 2 Avenue du Général Malleret-Joinville, F-94114 Arcueil Cedex, France

Received 5 March 2007; accepted 12 July 2007

Abstract

Objective: There is a discrepancy about the effect of saccades on postural control: some studies reported a stabilization effect, other studies the opposite. Perturbation of posture by saccades could be related to loss of vision during saccades (saccades suppression) due to high velocity retinal slip. On the other hand, efferent and afferent proprioceptive signals related to saccades can be used for obtaining spatial stability over saccades and maintaining good postural control. In natural conditions saccades can be horizontal, vertical and made at different distance. The present study examines all these parameters to provide a more complete view on the role of saccade on postural control in quiet stance.

Methods: Horizontal or vertical saccades of 30° were made at 1 Hz and at two distances, 40 and 200 cm. Eye movements were recorded with video-oculography (EyeLink II). Posturography was recorded with the TechnoConcept platform. The results from "saccade" conditions are compared to "fixation control" condition (at far and near).

Results: The video oculography results show that subjects performed the fixation or the saccade task correctly. Execution of saccades (horizontal or vertical at near or at far distance) had no significant effect on the surface of center of pressure (CoP), neither on the standard deviation of the lateral body sway, nor on the variance of speed of the CoP. Moreover, whatever the distance, execution of saccades decreased significantly the standard deviation of the antero-posterior sway.

Conclusion: We conclude that saccades, of either the direction and at either the distance, do not deteriorate postural control; rather they could reduce sway. Efferent and proprioceptive oculomotor signals as well as attention could contribute to maintain or improve postural stability while making saccades.

© 2007 Elsevier Ireland Ltd. All rights reserved.

Keywords: Postural control; Fixation; Horizontal saccades; Vertical saccades; Distance

1. Introduction

Postural control is a complex multi-sensory system using visual, vestibular, somatosensory and proprioceptive inputs. The majority of postural studies are done with subjects asked to fixate a target. The role of eye movement on postural stability is less studied. There is a variety of different types of eye movements; each stimulated by different input and each serving vision in a different way. For instance, saccades and pursuit movements are stimulated by position and

velocity visual error signals, respectively. The saccade brings the objects of interest at the fovea while the pursuit keeps the moving object on the fovea.

Here we will concentrate on studies of saccades. Saccade is a fast stereotyped movement. Their velocity can be high, e.g. 500°/s or more in humans [1]. During the saccade, perception and visual analysis are quasi impossible, the so-called saccade suppression presumably due to high velocity of retinal slip.

High velocity retinal slip and suppression of vision produced by the saccade could theoretically deteriorate postural stabilization. However, earlier studies found that saccades either do not disrupt [2] or decrease body sway [3–5]. White et al. [2] used 4° horizontal saccades triggered

* Corresponding author. Tel.: +33 1 44 27 16 35; fax: +33 1 44 27 13 82.

E-mail address: zoi.kapoula@college-de-france.fr (Z. Kapoula).

¹ These authors contributed equally to this work.

by two light targets lighted on sequentially. Uchida et al. [5] studied the effect of periodic saccades on postural sway. Eye movements were recorded with electro-oculography. Saccades were induced by asking subjects to re-fixate LED targets placed horizontally or vertically. Saccade sizes studied were 5–40° and the frequency of saccades was 0.1–1 Hz. During such periodic saccades the authors reported decrease of body sway, i.e. an improvement of postural control. They concluded that repetitive activation of eye muscle proprioceptors does not destabilize posture. Indeed internal information relative to the execution of the saccades could contribute in such stabilization of the posture. In normal subjects a subsequent study from Kikukawa and Taguchi [4] also demonstrated that saccadic eye movement induced by target moving stepwise decreased body sway. The group that has examined most extensively the role of eye movement on postural control is the group of Brandt. In their earlier studies [6,7], horizontal saccades (5–80°) with frequency of 0.5 Hz were studied; such saccades deteriorated postural stabilization relative to fixation condition. The deterioration was higher for the larger saccades. The findings of Brandt are in contradiction with those of earlier studies mentioned above. Finally, a recent study of Stoffregen et al. [8] found that medio-lateral sway of torso displacement and of head motion decreased during horizontal saccades. The stimuli used were two circles alternating on computer screen (11° of amplitude and 0.583 Hz of frequency).

Another aspect influencing the postural stability is the viewing distance. Postural stability is better at near distance than at far. The traditional interpretation of this phenomenon is in terms of angular size of retinal slip: at near distance the angular size of retinal slip input resulting from body sway is higher than at far distance and could explain better body stabilization than the far distance [6,9–11]. Kapoula and Lê [12] confirmed the distance effect in young and elderly. Moreover, they showed that the ocular convergence at near distance could be also important. Indeed, in their study they use convergent prisms that lead the eyes to converge while the subjects were fixating at far distance. Convergence of the eyes improved postural stability.

The aim of the present study is to provide a complete view of the role of saccades on postural control by examine saccades for both horizontal and vertical directions and at far and near distances.

2. Materials and methods

2.1. Subjects

Eleven subjects, age range from 22 to 29 years (mean age 25.5 ± 2.5 years), were recruited among the laboratory co-workers. Medical examination and several preliminary tests confirmed normal findings without neurological signs, and no medication. The investigation adhered to the tenets of the

Declaration of Helsinki and was approved by the Institutional human experimentation committee. Informed consent was obtained from all subjects after the nature of the procedure had been explained.

2.2. Platform

To measure the postural stability, we used a posturography apparatus consisted by two dynamometric platforms; one for each foot (produced by *TechnoConcept*, Céreste, France). The excursions of the center of pressure (CoP) were measured during 51.2 s; the equipment contained an Analogical-Digital converter of 16 bit. The sampling frequency of the CoP was 40 Hz.

2.3. Eye movement recording

Eye movements were recorded with the EyeLink II. This video system was set to acquire eye position at 250 Hz. The apparatus is consisted of video cameras that are mounted on helmet. The cable of the helmet was placed upon a special support so that the total weight and traction force of the cable was kept minimal (see Fig. 1). The visual field when wearing the EyeLink apparatus is completely free as the video cameras are placed below the line of sight. Fig. 1 shows the arrangement used; the subjects stood on the platform wearing the EyeLink apparatus. He (she) stood in front of a screen, upon which five targets were presented at 0° and at 15° up, down, left, right; the screen was either at 40 cm or at 200 cm from the subjects.

2.4. Visual target

The targets were a cross “×” placed between two vertical segments. The angular size of the cross × was adjusted to subtend 1° for both viewing distances (200 and 40 cm). The same targets were used for the calibration.

2.5. Oculomotor and posturography procedure

Quiet stance posturography was done in a normally furnished experimental room. Subjects were placed on the platform. At the beginning of the session, a metronome was placed on the back of the screen producing a sound at 1 Hz. The subject stood upright on the platform (arms side by side along the body). The experiment started with calibration session during which the subject was asked to make saccade on the pace of the metronome (1 Hz) between the center-up, center-down, center-left and center-right targets. The eye movement calibration sequence was repeated twice.

Next the posturography was triggered for a period of 51.2 s. For each postural measure subjects were asked to make either horizontal saccades from the left to the right target or vertical saccades from the down to the upper target at 1 Hz. The amplitude of the saccades was 30°, both for the

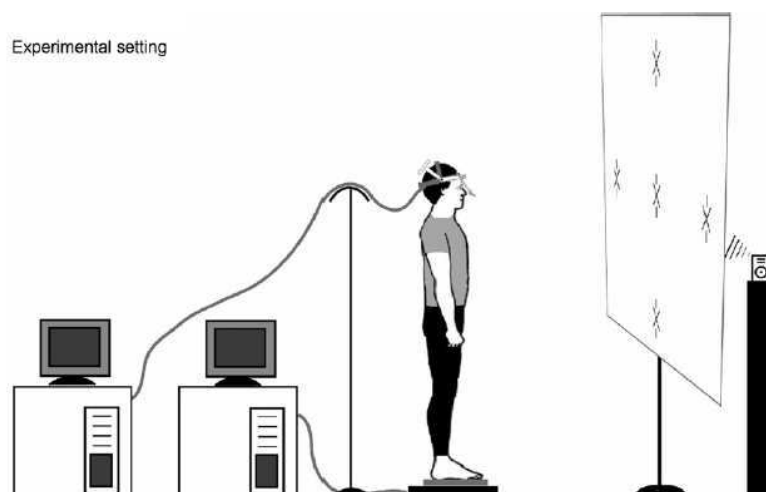


Fig. 1. Experimental setup of posturography combined with eye movement recording. The weight of the helmet cable was lightened by fixating it with a vertical bar. Subject kept quiet stance during posturography while he was required either to fixate the center target or to make saccades (horizontally or vertically) according to the pace of the metronome.

horizontal and vertical direction. The frequency used (1 Hz) has been used by others [5]. In the control condition, subjects were asked to fixate the target on the center of the screen. Importantly, the metronome was always on beating at 1 Hz. For all conditions and in parallel with posturography eye positions data were recorded continuously.

All three conditions (fixation, horizontal saccade, vertical saccade) were conducted twice; once at near distance (40 cm) and the other at 200 cm. The order of the viewing distances were counterbalanced as nearly as possible between the subjects and for each distance the order of the viewing conditions (fixation, horizontal saccade, vertical saccade) was also counterbalanced as nearly as possible.

2.6. Postural measures

We analysed the surface of the CoP excursions, the standard deviations of antero-posterior (SD_y) and lateral body sways (SD_x) and the variance of speed. The surface of CoP was calculated so that 90% of the instantaneous positions of the CoP were inside an ellipsoid [13]. Note that many recent studies use standard deviation of CoP [14,15].

2.7. Eye movement measures

After calibration we calculated the conjugate eye position that corresponds to the left plus right eye position divided by two. We also measured the vergence angle that is the difference between left minus right eye; the vergence angle was measured during fixation or during the execution of saccades for all conditions. Eye movement recording were done for all subjects but for two of them calibration problems occurred and the results were not usable; only posturography data from the two subjects were available.

2.8. Statistical analysis

For eye movement data, we measured the mean amplitude and the standard deviation of the saccades, the frequency of corrective saccades and the vergence angle for each viewing distance.

For posturography parameters, a two way ANOVA was run with two factors: the distance and the type of eye movement with three levels: fixation, horizontal and vertical saccades. Post hoc analysis was made with the Fischer' LSD test.

3. Results

3.1. Eye movements

Fig. 2 shows traces of conjugate eye position in the three tasks (fixation, horizontal and vertical saccades) at far or at near distances. As the oculomotor behaviour of saccades and fixation was very stereotyped we averaged traces from nine subjects together. To average traces we excluded the first three saccades as the initiation of the first saccades could occur with a different latency for different subjects. During the fixation task the eyes are almost perfectly stable regardless of the distance. During the saccade tasks subjects performed saccades at the required pace (1 Hz).

Group means of saccade amplitudes are shown in Table 1. The mean amplitudes of saccades were similar for both horizontal and vertical directions. The frequency of corrective saccades was similar for the two directions; the vergence angle was close to the requirement vergence (i.e. 9° at 40 cm and 2° at 200 cm). Thus, the eye movement results confirm that the subjects were performing correctly in the saccade tasks and in the fixation task they were fixating in a stable way.

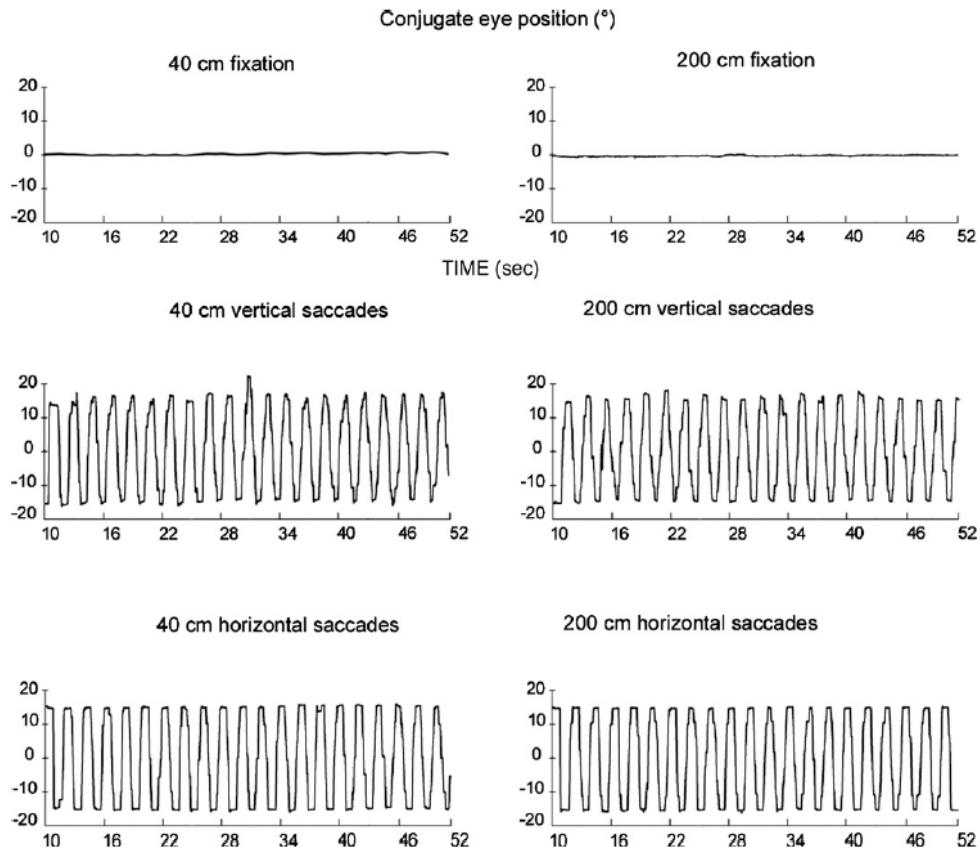


Fig. 2. Mean group of the conjugate traces (left eye plus right eye position divided by 2) for each viewing conditions (fixation, vertical and horizontal saccades) and for each distance (40 and 200 cm).

3.2. Posture measures

The group mean values of posturography parameters (surface of CoP, the standard deviation of lateral (SDx) and antero-posterior sway (SDy) of the variance of speed) are shown in Table 2 for each distance and for each viewing condition. Next we will present the results of ANOVA evaluating the effects of distance and of viewing conditions on each of the postural parameters.

3.2.1. Distance

There was a main effect of distance on the surface of CoP ($F_{(1,10)} = 7.5, p = .021$), on the SDx ($F_{(1,10)} = 5.8, p = .036$)

and on the variance of speed ($F_{(1,10)} = 8.2, p = .017$). For these three parameters, values were significantly higher at far distance than at near. These results are consistent with prior studies [9–12,16] and show that the postural stability is better at near distance than at far distance.

3.2.2. Eye movement conditions: fixation versus saccades

Eye movement condition had no main effect on the surface of CoP, the SDx or on the variance of speed. The only significant effect of the viewing condition is on the standard deviation on the antero-posterior (SDy) body sway ($F_{(2,20)} = 5.2, p = .015$). This effect is illustrated in Fig. 3.

Table 1
Group mean results of saccades

	40 cm		200 cm	
	Horizontal saccades	Vertical saccades	Horizontal saccades	Vertical saccades
Mean amplitude (°)	30.27 ± 0.74	29.9 ± 1.83	30.12 ± 0.49	30.5 ± 1.16
Corrective saccade frequency (%)	31.71	35.4	32.71	33.6
Vergence angle (°)	8.31 ± 1.07		1.67 ± 0.89	

Mean ± S.D. for saccades (horizontal and vertical) and for vergence angle and corrective saccades frequency.

Table 2
Group mean results of posturography

	40 cm			200 cm		
	Fixation	Horizontal saccades	Vertical saccades	Fixation	Horizontal saccades	Vertical saccades
Surface of CoP (mm ²)	150.4 ± 97.9	135.2 ± 94.3	149.4 ± 136.5	261.3 ± 140.9	223.5 ± 159.2	154.8 ± 88.5
SDx (mm)	2.4 ± 1.0	2.4 ± 0.8	2.5 ± 1.5	3.0 ± 1.0	3.8 ± 2.7	2.7 ± 1.3
SDy (mm)	4.3 ± 2.2	4.0 ± 2.4	4.1 ± 2.2	5.9 ± 2.1	4.1 ± 1.3	3.9 ± 1.5
Variance of speed (mm ² /s ²)	22.7 ± 9.6	18.5 ± 9.2	20.9 ± 7.3	28.8 ± 9.3	29.5 ± 12.6	25.4 ± 12.6

Group means ± S.D. of the surface of CoP, the standard deviation of the lateral (SDx) and the antero-posterior (SDy) body sway and the variance of speed for each viewing distance (40 and 200 cm) and for each viewing condition (fixation, horizontal and vertical saccades).

As shown, the SDy was higher when subjects were fixating than when they were making horizontal saccades ($p = .013$), or vertical saccades ($p = .0092$). There was no significant difference between horizontal saccades *versus* vertical saccades for the SDy.

3.2.3. Frequency

One could ask whether making saccades at 1 Hz would also influence the 1 Hz component of the body sway. The amplitudes of the 1 Hz component from Fast Fourier Transform of the lateral (FFT_x) and the antero-posterior (FFT_y) sway were analysed; a two way ANOVA was applied on the values of amplitude of 1 Hz component. The two factors were the distance (40 and 200 cm) and the eye movement condition (fixation, horizontal and vertical saccade). For both the FFT_x and the FFT_y, there was no significant effect neither of the distance ($F_{(1,10)} = .56$, $p = .47$ and $F_{(1,10)} = 4.39$, $p = .0624$ respectively), nor of the eye movement condition ($F_{(1,10)} = .84$, $p = .44$ and $F_{(1,10)} = 2.96$, $p = .0745$, respectively); and there was no interaction between distance and eye movement condition ($F_{(2,20)} = 1.76$, $p = .197$ and $F_{(2,20)} = 2.37$, $p = .119$, respectively).

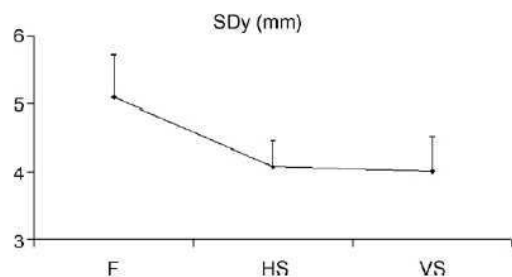


Fig. 3. Group means of the standard deviation of antero-posterior body sway (SDy) for each viewing condition: fixation, horizontal and vertical saccades (F, HS and VS, respectively). The SDy was significantly higher when subjects were fixating than when they made horizontal or vertical saccades.

4. Discussion

This study brings straight forward results: execution of saccades, being horizontal or vertical made at far or at near distance does not deteriorate postural control. On the contrary, there is evidence for mild improvement of postural stabilization in terms of reduction antero-posterior body sway. Our findings are in line with those from prior studies from Uchida et al. [5] and Kikukawa and Taguchi [4] and contradict those from Brandt et al. [7]. Importantly, our findings provide more complete view as they concern both horizontal and vertical saccades at far and near distances. Note that the majority of studies show no deterioration of postural stability of the saccades [2–5,8] despite of the difference of visual stimuli, frequency of saccades, and eccentricity of targets used. Thus, taken together our findings with those from earlier studies, one could conclude for un-disturbance of postural control by execution of saccades at any distance and direction. The distance dimension is of importance as in natural conditions we continuously change the distance at which we make saccades. Also at near distance the retinal slip caused by the saccades is of higher angular size and could be theoretically more disturbing but it is not.

Therefore the question to ask is by which physiological mechanisms the central nervous system achieves this result, i.e. maintenance or improvement of postural control despite of brusque and rapid saccadic eye movement.

As mentioned in the Introduction, the rationale for expecting destabilization during saccades is related to suppression of vision and perception because of high velocity retinal slip produced by the saccade. Postural stabilization is believed to be better with vision than without. This result shows that brusque saccades causing short duration of suppression do not deteriorate postural stabilization. Most likely ocular motor signals such as corollary discharge or efferent motor signals contribute to stable vision across the saccades. Sommer and Wurtz [17–

19], Colby et al. [20] identified possible networks for the physiological substrate of this corollary discharge (e.g. signals going from superior colliculus to frontal eye field via medio-dorsal relay from thalamus). One should also mention the link between the saccade control circuitry, head–neck and postural control. Corneil et al. [21] showed that neck muscles are recruited time-locked to visual target presentation; usually well in advance of saccadic eye movements. Thus the oculomotor circuitry and the head-neck circuitry are interconnected with redundant internal efferent and afferent signals; these signals are presumably used together to assure postural stabilization with or without saccades. Proprioception from the extraocular muscles is among the richest proprioceptive sources in human motor effectors (see [22]) and could play a major role on the stabilization of the body. According to this interpretation execution of saccades in complete darkness should be also harmless for posture stability. Further studies in dark are in progress in our laboratory.

Finally, one should discuss the result of improvement of antero-posterior sway when the subject made horizontal or vertical saccades relative to fixation condition. This observation is in line with prior studies reporting reduction of postural sway (see Kikukawa and Taguchi [4] and Uchida et al. [5]). This improvement is attributed to increased proprioceptive and efferent oculomotor signals. As in our study no improvement was found for the surface and the lateral sway thus the result for reduced antero-posterior sway should be taken with caution. A possible reason for which execution of saccades improves especially the antero-posterior body sway is the following: unwanted antero-posterior sway would directly modify the angular size of targets; execution of such accurate saccades between the targets prevented or reduced small natural antero-posterior sway.

Yet, it should be recalled that eye movements are tightly linked to shifts of visual attention (see for instance premotor theory of visual attention [23]). Perhaps making saccades regularly implies higher attention control, thereby a tighter mode of regulation of postural oscillations. In another study we found postural control to be less efficient for dyslexic than for non-dyslexic children but only during the fixation task [24]. When the children were asked to make actively vergence eye movement (back and forth between a close and a far target), many of dyslexics improve their postural performance: the surface and the sway dropped to normal values. Thus possible stabilization effect of eye movement should not be excluded but needs further investigation.

We conclude that execution of saccade (horizontal and vertical) at near or at far, do not interfere with quality of posture stabilization. On the contrary, they can improve some aspects, e.g. reduce antero-posterior sway. Increased proprioceptive signals from extra-ocular muscles and/or attention shifts could be at the origin of maintenance or improvement of posture control when execution saccades.

Acknowledgements

The authors thank Q. Yang for helping with eye movement analysis; T. Eggert for providing the software for eye movement analysis. T.T. Lê was supported by European Union (QLK6-CT-2002-00151: EUROKINESIS) and CNRS/CTI, Handicap contract.

References

- [1] Leigh RJ, Zee DS. The saccadic system. In: Leigh RJ, Zee DS, editors. *The neurology of eye movements*. 4th ed., Oxford University Press; 2006. p. 111.
- [2] White KD, Post RB, Leibowitz HW. Saccadic eye movements and body sway. *Science* 1980;208:621–3.
- [3] Oblak B, Gregoric M, Gyergyek L. Effects of voluntary eye saccades on body sway. In: Igarashi M, Black FO (Eds.), *Vestibular and visual control on posture and locomotion equilibrium*. Proceedings of the seventh international symposium on int. posturography. Karger, Basel; 1985. p. 122–6.
- [4] Kikukawa M, Taguchi K. Characteristics of body sway during saccadic eye movement in patients with peripheral vestibular disorders. In: Igarashi M, Black FO (Eds.), *Vestibular and visual control on posture and locomotion equilibrium*. Proceedings of the seventh international symposium on int. posturography. Karger, Basel; 1985. p. 355–9.
- [5] Uchida T, Hashimoto M, Suzuki N, Takegami T, Iwase Y. Effects of periodic saccades on the body sway in human subjects. *Neurosci Lett* 1979;13:253–8.
- [6] Brandt T, Paulus W, Straube A. Vision and posture. In: Bles W, editor. *Disorders of posture and gait*. Amsterdam, New York, Oxford: Elsevier; 1986. p. 160–1.
- [7] Brandt T. Eye movements, oculomotor disorders, and postural balance. *Vertigo: Its Multisensory Syndromes*. Springer, London; 1999. p. 428–9.
- [8] Stoffregen TA, Bardy B, Bonnet C, Pagulayan RJ. Postural stabilization of visually guided eye movements. *Ecol Psychol* 2006;18:191–222.
- [9] Bles W, Kapteyn TS, Brandt T, Arnold F. The mechanism of physiological height vertigo. II. Posturography. *Acta Otolaryngol* 1980;89:534–40.
- [10] Paulus WM, Straube A, Brandt T. Visual stabilization of posture. Physiological stimulus characteristics and clinical aspects. *Brain* 1984;107(Pt 4):1143–63.
- [11] Paulus W, Straube A, Krafczyk S, Brandt T. Differential effects of retinal target displacement, changing size and changing disparity in the control of anterior/posterior and lateral body sway. *Exp Brain Res* 1989;78:243–52.
- [12] Kapoula Z, Le TT. Effects of distance and gaze position on postural stability in young and old subjects. *Exp Brain Res* 2006;173:438–45.
- [13] Gagey PM, Weber B. Stabilométrie. In: Masson, editor. *Posturologie: régulation et dérèglements de la station debout*. 1999. p. 45–59.
- [14] Gravelle DC, Laughton CA, Dhruv NT, Katdare KD, Niemi JB, Lipsitz LA, et al. Noise-enhanced balance control in older adults. *Neuroreport* 2002;13:1853–6.
- [15] Hertel J, Olmsted-Kramer LC. Deficits in time-to-boundary measures of postural control with chronic ankle instability. *Gait Posture* 2007;25:33–9.
- [16] Leigh RJ, Zee DS. Visual fixation. In: Leigh RJ, Zee DS, editors. *The neurology of eye movements*. 4th ed., Oxford University Press; 2006. p. 189–91.
- [17] Sommer MA, Wurtz RH. A pathway in primate brain for internal monitoring of movements. *Science* 2002;296:1480–2.

- [18] Sommer MA, Wurtz RH. What the brain stem tells the frontal cortex. I. Oculomotor signals sent from superior colliculus to frontal eye field via mediodorsal thalamus. *J Neurophysiol* 2004;91:1381–402.
- [19] Sommer MA, Wurtz RH. What the brain stem tells the frontal cortex. II. Role of the SC-MD-FEF pathway in corollary discharge. *J Neurophysiol* 2004;91:1403–23.
- [20] Colby CL, Berman RA, Heiser LM, Saunders RC. Corollary discharge and spatial updating: when the brain is split, is space still unified? *Prog Brain Res* 2005;149:187–205.
- [21] Corneil BD, Olivier E, Munoz DP. Visual responses on neck muscles reveal selective gating that prevents express saccades. *Neuron* 2004;42:831–41.
- [22] Buttner-Ennever JA, Buttner U. Neuroanatomy of the ocular motor pathways. *Baillieres Clin Neurol* 1992;1:263–87.
- [23] Rizzolatti G, Riggio L, Dascola I, Umiltà C. Reorienting attention across the horizontal and vertical meridians: evidence in favor of a premotor theory of attention. *Neuropsychologia* 1987;25:31–40.
- [24] Kapoula Z, Bucci MP. Postural control in dyslexic and non-dyslexic children. *J Neurol* 2006.

Article 5 (étude soumise)

Postural stability in subjects with visual fatigue, headaches and vertigo symptoms

LÊ, Thanh-Thuan; BERBEY, Nolwenn; ORSSAUD, Christophe; KAPOULA, Zoi*

IRIS Group, CNRS-FRE 3451, Service of ophthalmology, ORL and Stomatology, Georges Pompidou European Hospital,

* Corresponding author:

Email: thanh-thuan.le@egp.aphp.fr
nolween.berbey@egp.aphp.fr
Christophe.Orssaud@hop.egp.ap-hop-paris.fr
zoi.kapoula@egp.aphp.fr

ABSTRACT

Symptoms of visual fatigue, headaches and vertigo (VFHV) are frequent in developed countries; they are associated with vergence abnormality. As vergence is important for the postural stability (see [16]), this study examines postural control in such subjects. Posturography platform (TechnoConcept) was used to examine posture in quiet stance in twelve subjects with VFHV (mean age 40.8 years) and 12 controls (mean age 41.7 years). Similarly to controls, subjects with VFHV showed better stability with eyes open than eyes closed. However, subjects with VFHV showed greater instability than controls with eyes closed leading to higher Romberg quotient (i.e. ratio eyes closed / eyes open). Such postural instability could be related to reduced quality of internal vergence signals. In another experiment, subjects fixated a target at far distance in two conditions: normal viewing and viewing through convergent prisms (10Δ). The prisms should cause the eyes to converge by appropriate amount (9°) in order to maintain single vision of the target despite the prisms. Subjects with VFHV showed higher postural instability when viewing through the prisms than without, while controls presented better stability with the prisms than without. The deterioration of posture induced by the prisms in subjects with VFHV could be related to inappropriate vergence eye movements; long latency and low speed have been reported previously for children with VFHV [9, 10]. In the present study, six adults from the subjects with VFHV were tested again after 12 sessions of vergence orthoptic training; postural stability improved but not significantly. As classic orthoptic vergence training does not exercise the dynamics of vergence, we suggest that new training techniques are needed.

INTRODUCTION

Visual fatigue associated with headaches, vertigo and vergence insufficiency is frequently encountered in ophthalmology or ENT services (see [1]). We will call such syndrome “VFHV” (for Visual Fatigue, Headaches and Vertigo). VFHV, in developed countries, could be related to vergence abnormalities due to prolonged working at near distance (reading, video games with computer screen). For instance, convergence insufficiency is a visual and oculomotor impairment characterized by inability to converge correctly; the more common clinical signs found of CI is recede of Near Point of Convergence (NPC), poor fusional convergence amplitude in the bar prism test and abnormal exophoria measured with the cover test. It should be noted that the NPC test examines natural vergence combining all three components: proximal, accommodative, and fusional vergence; while the bar prism test examines the disparity vergence alone. The cut-off values for judging deficits in these three visual tests vary according to the authors. For instance, Capobianco [2]; Passmore and McLean [3]; Oguz and Iskeleli [4] and Von Noorden [5] consider the NPC as abnormal if it is beyond 10 cm while for Scheiman and colleagues [6] the cut-off value is 7.5 cm and for Scheiman et al.[7] and Shippman and al.[8], it is 5 cm.

Anoh-Tanon et al. [1] performed vestibular examination in 520 children consulting the ENT service for vertigo, headaches and equilibrium disorders; 5 % of them showed normal vestibular function but revealed signs of convergence abnormalities assessed by orthoptic tests. Studies with objective eye movement recording indicate abnormally long latencies of convergence, of saccades combined with convergence or with divergence (relative to control age matched, see Bucci et al. [9]). Poor accuracy, long duration and low speed for convergence were also reported in children with vertigo. For combined movement; the convergence was not accelerated by the saccade as shown for normals (see Bucci et al. [10]). Finally, these children showed large abnormal disconjugacy for saccades made at near distance (Bucci et al. [11]). Children had been treated by twelve sessions of standard orthoptic training. Such training decreased the vertigo and headaches symptoms; eye movement recording after

training showed shorter latencies for all movements (Bucci et al. [9]) and better accuracy of all eye movements except for divergence (pure and combined, see Bucci et al. [10]). However, convergence remained abnormal and the lack of acceleration by the saccade persisted (see Bucci et al. [10]). To summarize, the three studies demonstrated a correlation between abnormalities of the vergence function clinically measured (e.g. abnormal values in NPC and bar prism test) and impairment of the oculomotor vergence objectively assessed with eye movement recordings in laboratory.

The present study examines the possible link between VFHV and postural control. Such link may be mediated by the vergence system. It is known that the decrease of the viewing distance increases the postural stability (Brandt and colleagues [12-15]). Body sway produces retinal slip that is used in return to reduce the body sway; the further the distance is, the lower the angular size of the retinal slip is and thus less efficient to correct body sway. A recent study from our group (Kapoula and Lê [16]) indicated that in addition to angular size of retinal slip, increase convergence angle at near distance could contribute in the improvement of postural stability at near. This was shown by the use of convergent prisms which increased the convergence angle and improved the postural stability even though the subjects fixated a target physically placed at far distance.

In the present study, we examined the quality of posture control of subjects with VFHV symptoms associated with clinical signs of vergence abnormalities before and after orthoptic training of vergence. Subjects were tested at near distance with eyes open and eyes closed and at far distance with or without convergent prisms. Data from subjects with VFHV taking before orthoptic training are compared with data from control subjects, age matched. As prior study (Kapoula and Lê [16]) had shown that the quality of vergence eye movement is important for postural stabilization, we expect that posture performances are poor for such subjects.

METHODS

Subjects

Twelve persons (three males, age range from 23 to 66 years, mean age 40.8 ± 12.2 years) consulted the ophthalmologic service of Georges Pompidou European Hospital. They mainly complained of visual fatigue with eyestrain, tired eyes, intermittent blurred vision headache and vertigo (see details in Table 1).

Twelve control subjects (4 males, age range from 25 to 65 years, mean age 41.7 ± 11.8 years) who did not show symptoms and clinical signs of vergence abnormalities took part to the experiment as healthy controls.

Visual examination

Orthoptic was performed for all subjects; the examination includes the measure of visual acuity, stereo-acuity, near point of convergence, phoria at far and near and convergence and divergence amplitude at far and near. The phoria was determined with the cover test and the Maddox rod test (see von Noorden [17]). The vergence amplitude was assessed with the bar prism test and the synoptophore (see von Noorden [18]). The subjective and the objective angle of eye alignment were measured with the synoptophore. Finally, the AC/A ratio (for accommodative convergence / accommodation) were calculated according the standard formula (von Noorden [19]):

$$AC/A = idp + (phoria (near) - phoria (far))/3$$

Idp is the interpupillar distance (in average 6 cm). For control subjects, similar examination was done.

Clinical tests

All control subjects had normal corrected visual acuity, normal values of stereoacuity, NPC, phoria, convergence and divergence. No subject complained of visual fatigue or eyestrain symptoms.

Results from subjects with VFHV patients are shown in Table 1A. The large majority of subjects present symptoms of visual fatigue and headaches. Most of them had accommodative spasms. Accommodative spasm is a result of ciliary's muscle spasm and the inability of the eye to relax accommodation (see Horn and Zdenek [20]). Accommodative spasms are part of accommodation dysfunction and are frequently to be associated with fatigue and headaches [21-23]. Orthoptic testing used to detect accommodative spasm will be described below.

Table 1B presents the orthoptic measures. One can see that almost all subjects had normal visual acuity (at least 8/10 for each eye). No difference of visual acuity between left and right eye was observed and all subjects presented normal binocular vision scores (stereo-acuity of 50 sec of arc or better).

Measures of the eye alignment with the synoptophore test revealed normal eye alignment (i.e. the objective angle "oa" and the subjective angle "sa" were the same). Seven of them showed esophoria. In the

Maddox test at far distance, all subjects (except S2) showed esophoria (1 to 8 diopters); at near distance, five subjects showed exophoria (1 to 8 diopters). Vertical phoria was also examined in the Maddox test; it was found to be below 1 diopter and was considered as normal. The cover test, which also examined the phoria, showed excessive values for several of VFHV subjects. Discrepancy of the phoria values measured by the cover test and the Maddox rod is a clinical sign suggesting the presence of accommodative spasms. Note that the Maddox rod is more dissociating test than the cover test and may induce a residual accommodative spasm. For instance, the subject S12 showed exophoria of 20 Δ in the cover test while he showed esophoria of 10 Δ for the Maddox rod. Such difference (30 Δ) would suggest an accommodative spasm, occurring between the two tests.

Vergence amplitudes measured with bar prism showed poor divergence for four subjects (S1, S9, S11 and S12), abnormal convergence for four other subjects (S3, S5, S8 and S10) and both divergence and convergence abnormalities (mixed) for the remaining subjects (S2, S4, S6 and S7). Vergence abnormalities were confirmed with the fusion test at the synoptophore measuring divergence, convergence and divergence again. This test shows limited values of convergence for S3, S8 and S10, excessive convergence for S5 and limited divergence values for subjects 1, 9, 11 and 12. For subject 2, comparison between the first and the second divergence measure showed significant decrease (from -6 to -2); this could be another sign suggesting the presence of accommodative spasm. The values of AC/A measured indirectly with the equation (see above) were rather high, particularly for the subjects with signs of accommodative spasms (1, 5, 6, 7, 10, and 11). Finally the NPC test measuring vergence in normal space showed remote values for S2, S3 and S11.

Posturography

We used a posturography apparatus consisted of two dynamometric soles; one for each foot (produced by *TechnoConcept*, Céreste, France). The excursions of the center of pressure (CoP) were measured during 51.2 seconds; the equipment contained an Analogical-Digital converter of 16 bits. The sampling frequency of the CoP was 40 Hz.

Procedure

During all posturography tests, subjects were required to fixate a target (cross of 1° inserted between two vertical segments of 1° each); the target was placed at the eye level. Subject stand under upright and standardized Romberg position (feet placed side by side which form an angle of 30° with heels separated of 4 cm). Subjects were required to keep quiet stance (i.e. arms side by side, normal breath, not to speak, and teeth not clenched).

The Romberg test

The Romberg test (eyes open and eyes closed) was used to examine the influence of visual input on posture stability. The distance between the observer and the target in the Romberg test was 40 cm as in our recent study (Lê and Kapoula [24]).

The prism test

Two conditions were performed: a) normal viewing of a target at 200 cm and b) viewing of the same target through 10 Δ convergent prisms (one prism of 5 Δ placed on each eye). The order of the conditions was counterbalanced. This test examines the influence of disparity induced by the convergent prisms on posture stability.

Both the Romberg test and the prism test were repeated after the 12 sessions of orthoptic training. The investigation adhered to the tenets of the Declaration of Helsinki and was approved by the Institutional human experimentation committee. Informed consent was obtained from all subjects after the nature of the procedure had been explained.

Postural parameters

Postural stability was objectively measured by the size of surface area of CoP that contains 90 % of closest CoP positions from the central ones, the standard deviation of the lateral and the antero-posterior sway (respectively SD_x, and SD_y), and the variance of speed of the CoP excursions. Note these parameters were the same than those from our previous studies (see Kapoula and Lê [16], Lê and Kapoula [24, 25]).

For the Romberg test, the RQ was calculated for each parameter. It corresponds to the ratio eyes closed/ eyes open.

Statistical analysis

For the Romberg test, a two-way ANOVA was run on the raw data; the factors are the group (VFHV *versus* controls) and eyes open *versus* eyes closed condition. A student test was done on the Romberg quotient (eyes closed / eyes open) which compares VFHV and controls. For the prism test, a two-way ANOVA was run;

the factors are the group (VFHV *versus* controls) and the prism condition (prism *versus* no prism). We evaluated the effect of distance with a two-way ANOVA; the factors are the group (VFHV *versus* controls) and the distance (40 and 200 cm). Post-hoc analysis was done with the Fisher's PLSD test.

RESULTS

Romberg test

Raw data from the Romberg test are shown in the Table 2 (see columns EO and EC). There was a main effect of group on the standard deviation of lateral sway ($F_{(1,22)} = 5.02$; $p = .036$) and on the variance of speed of CoP ($F_{(1,22)} = 14.4$; $p < .001$). The group of VFHV showed a higher SDx and variance of speed than controls for both eyes open and eyes closed conditions (see Fig. 1A). There was a main effect of condition (i.e. eyes open and eyes closed) for all the parameters ($F_{(1,22)} = 5.45$; $p = .029$ for the surface of CoP; $F_{(1,22)} = 6.38$; $p = .019$ for the SDx; $F_{(1,22)} = 10.27$; $p = .0041$ for the SDy and $F_{(1,22)} = 9.81$; $p = .0049$ for the variance of speed). All parameters increased significantly with eyes closed relative to eyes open for both groups.

Was the quotient (eyes closed / eyes open) the same for the two groups? In general, a high value of quotient indicates more dependence on vision. Given the oculomotor problems assessed by orthoptic tests in these patients, one could make two opposite predictions: (a) the oculomotor problem related to vergence abnormalities would deteriorate the quality of visual input (e.g. visual process of binocular disparity) and this could lead to posture instability; if this were the case, the RQ for VFHV subjects would be lower than the RQ of normals. (b) Poor vergence movements would provide poor internal, efferent, afferent proprioceptive signals. In such case, posture instability could particularly increase in the eyes closed condition leading to high RQ values, higher than from controls.

The RQs were higher than 1 on average in VFHV and were more elevated than the RQs of controls (see Table 2 and Fig. 1B); the difference however was not statistically significant ($p > .05$ in Student test). Inspection of individual RQ values revealed that five subjects of the twelve VFHVs (S1, S3, S4, S11 and S12) showed RQs superior than 3 while among the controls, such values occurred for one subject only.

In summary, the Romberg test in VFHV showed high instability and more frequent RQ superior than 3 (i.e. more instability when the eyes are closed).

Prism test

Results are shown in the Table 2. There was a main effect of group on the surface of CoP ($F_{(1,22)} = 4.49$; $p = .046$), on SDx ($F_{(1,22)} = 5.03$; $p = .035$) and on the variance of speed ($F_{(1,22)} = 10.10$; $p = .0043$). Such parameters were higher in VFHV than in controls.

The prism condition had no main effect on any postural parameters. However, there was a significant interaction between the prism condition and the group on the surface of CoP ($F_{(1,22)} = 6.29$; $p = .02$), on SDx ($F_{(1,22)} = 9.61$; $p = .005$) and on SDy ($F_{(1,22)} = 7.93$; $p = .01$): the VFHV subjects presented significantly higher values of surface and of SDx when they wore the convergent prisms ($p = .027$ and $p = .013$ respectively see Fig. 2A and 2B). In contrast, the control subjects showed significantly lower SDy when they wore the convergent prisms ($p = .033$, see Fig. 2C). Consequently in the prism condition, postural values were significantly higher for subjects with VFHV than for control subjects ($p < .001$ for the surface of CoP, $p < .001$ for the SDx and $p < .001$ for the SDy, see Fig. 2A, 2B and 2C).

In summary, use of convergent prisms deteriorated stability for subjects with VFHV while improved stability for control subjects; the latter results are in line with a prior study (Kapoula and L   [16]).

Distance evaluation

There was a main effect of distance on the surface of CoP ($F_{(1,22)} = 8.41$; $p < .01$), on SDx ($F_{(1,22)} = 5.15$; $p = .03$) and on SDy ($F_{(1,22)} = 19.32$; $p < .001$): these parameters increased significantly when the subjects fixated at 200 cm than at 40 cm for both groups. No interaction between group and distance was found. In summary, distance effect was the same for both groups.

Posture measures after orthoptic training

The orthoptic training consisted of fusional vergence movements driven by disparity induced by a prism bar or with the synoptophore; sensory fusion exercises with the use of stereograms. The reeducation program was conducted by orthoptist in the hospital and the type of exercises (divergence *versus* convergence) was adjusted according to the type of vergence abnormality (convergence, divergence or mixed).

Six VFHV subjects (S1, S4, S8, S9, S10 and S12) who completed the twelve sessions became asymptomatic and their post values of orthoptic examination were normal. Postural values globally decreased after the orthoptic training (see Table 3) but the difference was not statistically significant ($p > .05$ in Wilcoxon test). In four of the six subjects (S4, S8, S10 and S12) there was improvement of posture performance in terms of either smaller area of surface (Fig. 3A and 3B), or smaller SDx and SDy consecutive of the orthoptic training.

DISCUSSION

Subjects with VFHV symptoms showed similar postural behaviour with control subjects for the following aspects: they presented better postural stability when they fixated at 40 cm compared with fixation at 200 cm; they presented better postural stability when their eyes were open than when their eyes were closed (Romberg test). However, there were several differences in their behaviour: in general, VFHV subjects showed higher lateral sway amplitudes and higher variance of speed for almost all conditions.

Instability in the Romberg test

In the Romberg test, variability of almost all postural parameters was higher in both conditions but also the RQ values tended to be higher than 3 for many of the VFHV subjects, while among the control subjects only one showed such value. As mentioned previously, high RQ values could result from two different reasons: (a) from reduced quality of visual input and (b) from reduced quality of internal oculomotor signals particularly those related to vergence. Reduced quality of internal oculomotor signals seems to be the most plausible explanation. The prism test provides further support (see below).

Convergent prisms impairs postural stability in VFHV subjects

The use of convergent prisms decreased postural stability for subjects with VFHV symptoms. Such behaviour was opposite to that of control subjects and opposite to the results reported in a prior study (Kapoula and Lê [16]). When convergent prisms are placed on the eyes, eyes are converging by appropriate amount. Kapoula and Lê [16] though argue that efferent or proprioceptive signals related to such increase of convergence angle contribute to the improvement of postural stability. Such involvement could be mediated by neuromuscular connexions between extra ocular and neck muscles. Moreover, the existence of this connexion is supported by study of Han and Lennerstrand [26] who showed that accommodative vergence speed is accelerated after neck muscle vibration. In line with this study, Lê and Kapoula [24] provided further support by showing correlation between the convergent angle with the eye movement recordings and the postural stability continuum to different distances. Thus, the evidence for a link between convergence and postural stability in controls is convincing. The negative effect of convergent prisms on posture for VFHV subjects could be either visual, oculomotor or both. However, subjects did not report sense of blur, double vision, visual discomfort when the prisms were put on the eyes. Consequently, one can suppose that either VFHV subjects were able to fuse images of target fixated despite the prisms or they suppressed temporally vision from one eye. Given that the subjects had normal binocular alignment (see Table 1) and the strength of the prisms was relatively low, one could exclude the possibility of suppression. Consequently, the subjects were able to fuse and obtain single binocular vision during the prism test. Nevertheless, the quality of vergence movement, their dynamics could be lower in VFHV relative to controls. As mentioned previously the eye movement studies of vergence in children with vertigo revealed several subtle abnormalities such as reduced speed, long duration and low accuracy (Bucci *et al.* [10], [9]; Yang *et al.* [27]). Vergence responses induced by the prism could present similar abnormalities in their dynamics; compromising at the visual level, the capacity to maintain sustained fusion of the target. A complementary reason would be that the proprioceptive and the efferent vergence signals would be delayed and reduced of amplitude and this could also deteriorate postural stability.

In summary, the fact that subjects with VFHV symptoms were more instable when the disparity prisms were put on the eyes provides evidence that the quality of disparity vergence is responsible for such deterioration.

Effect of vergence training

After twelve sessions of orthoptic training of vergence, symptoms disappear and the values of vergence measured with orthoptic tests became normal. At the level of postural performances, however the results were more mitigated. Indeed, improvements were found for few subjects only, namely the subjects who had mostly convergence abnormality (except S12). The results do not excluded the efficacy of orthoptic vergence training for obtaining better postural stability; however they point that classical orthoptic training is perhaps insufficient for producing systematic and strong improvement of posture stability. As we hypothesize that the postural instability results from poor vergence dynamics (long latency, low speed and long duration), the classic orthoptic training techniques do not allow exercising these aspects. New training techniques of vergence dynamics are needed.

In conclusion, the present study shows, for the first time, that visual fatigue associated to headaches, vertigo and vergence abnormality is also associated with poor postural performances; disparity vergence abnormality (measured orthoptically) could be at the origin of the postural instability. Yet, classical orthoptic training of vergence has no statistically significant effect; new techniques which train dynamics of vergence need to be developed.

REFERENCE

1. MJ Anoch-Tanon, D Bremond-Gignac, SR Wiener-Vacher: Vertigo is an underestimated symptom of ocular disorders: dizzy children do not always need MRI. *Pediatr Neurol* 2000, 23:49-53.
2. NM Capobianco: The subjective measurement of the near point of convergence and its significance in the diagnosis of convergence insufficiency. *Am Orthopt J* 1952, 2:40-2.
3. JW Passmore, F Maclean: Convergence insufficiency and its managements; an evaluation of 100 patients receiving a course of orthoptics. *Am J Ophthalmol* 1957, 43:448-56.
4. V Oguz, G Iskeleli: L'évaluation du traitement de l'insuffisance de convergence. *Bull Soc Ophthalmol Fr* 1985, 85:311-2.
5. GK von Noorden: Near point convergence. In: *Binocular vision and ocular motility: theory and management of strabismus* Edited by EA Klein, 5 ed. pp. 202. St Louis: Mosby; 1996: 202.
6. M Scheiman, J Cooper, GL Mitchell, LP de, S Cotter, E Borsting, R London, M Rouse: A survey of treatment modalities for convergence insufficiency. *Optom Vis Sci* 2002, 79:151-7.
7. M Scheiman, M Gallaway, KA Frantz, RJ Peters, S Hatch, M Cuff, GL Mitchell: Nearpoint of convergence: test procedure, target selection, and normative data. *Optom Vis Sci* 2003, 80:214-25.
8. S Shippman, J Infantino, D Cimbol, KR Cohen, AC Weseley: Convergence insufficiency with normal parameters. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus* 1983, 20:158-61.
9. MP Bucci, Z Kapoula, Q Yang, S Wiener-Vacher, D Bremond-Gignac: Abnormality of vergence latency in children with vertigo. *J Neurol* 2004, 251:204-13.
10. MP Bucci, Z Kapoula, Q Yang, D Bremond-Gignac, S Wiener-Vacher: Speed-accuracy of saccades, vergence and combined eye movements in children with vertigo. *Exp Brain Res* 2004, 157:286-95.
11. MP Bucci, Z Kapoula, D Bremond-Gignac, S Wiener-Vacher: Binocular coordination of saccades in children with vertigo: dependency on the vergence state. *Vision Res* 2006, 46:3594-602.
12. W Bles, TS Kapteyn, T Brandt, F Arnold: The mechanism of physiological height vertigo. II. Posturography. *Acta Otolaryngol* 1980, 89:534-40.
13. T Brandt, W Paulus, A Straube: Vision and posture. In: *Disorders of posture* Edited by W Bles, T Brandt. pp. 157-75. Amsterdam, New-York, Oxford: Elsevier Science Publishers B.V.; 1986: 157-75.
14. WM Paulus, A Straube, T Brandt: Visual stabilization of posture. Physiological stimulus characteristics and clinical aspects. *Brain* 1984, 107 (Pt 4):1143-63.
15. W Paulus, A Straube, S Krafczyk, T Brandt: Differential effects of retinal target displacement, changing size and changing disparity in the control of anterior/posterior and lateral body sway. *Exp Brain Res* 1989, 78:243-52.
16. Z Kapoula, TT Le: Effects of distance and gaze position on postural stability in young and old subjects. *Exp Brain Res* 2006, 173:438-445.
17. GK von Noorden: Diplopia test, red glass test and others. In: *Binocular vision and ocular motility: theory and management of strabismus* Edited by EA Klein, 5 ed. pp. 185. St Louis: Mosby; 1996: 185.
18. GK von Noorden: Measurement with major amblyoscope. In: *Binocular vision and ocular motility: theory and management of strabismus* Edited by EA Klein, 5 ed. pp. 180. St Louis: Mosby; 1996: 180.
19. GK von Noorden: Methods for determination of AC/A ratio. In: *Binocular vision and ocular motility: theory and management of strabismus* Edited by EA Klein, 5 ed. pp. 90. St Louis: Mosby; 1996: 90.
20. G Horn, G Zdenek: Method and apparatus for the correction of presbyopia using high intensity focused ultrasound. 2004.
21. S Airiani, RE Braunstein: Accommodative spasm after laser-assisted in situ keratomileusis (LASIK). *Am J Ophthalmol* 2006, 141:1163-4.
22. KM Daum: Accommodative dysfunction. *Doc Ophthalmol* 1983, 55:177-98.
23. KM Daum: Predicting results in the orthoptic treatment of accommodative dysfunction. *Am J Optom Physiol Opt* 1984, 61:184-9.
24. TT Le, Z Kapoula: Role of ocular convergence in the Romberg quotient. *Gait Posture* 2008, 27:493-500.
25. TT Le, Z Kapoula: Distance impairs postural stability only under binocular viewing. *Vision Res* 2006, 46:3586-93.
26. Y Han, G Lennerstrand: Effects of neck muscle proprioceptive activation on the dynamics of monocularly driven horizontal vergence movements. *Acta Ophthalmol Scand* 1998, 76:283-8.

27. Q Yang, F Jurion, MP Bucci, A Lucek, S Wiener-Vacher, D Bremond-Gignac, C Orssaud, Z Kapoula: Six adults cases with a pseudo-vestibular syndrome related to vergence abnormalities. *Neuro-ophthalmology* 2007, 31:1-12.

Table legends

Table 1: (A) Most of VFHV subjects had visual fatigue and headaches symptoms (+). Subject 1, 9, 11 and 12 showed clinical signs of divergence “d” abnormalities; S3, S5, S8 and S10 the signs of convergence “c” trouble and S2, S4, S6 and S7 the signs of “mixed” abnormalities. Eight of them presented signs of accommodative spasms (+). (B) The results of orthoptic examination revealed normal visual acuity, stereocacuity. The NPC was remote for two subjects (results in bold). Most of subjects had exophoria (X) with the cover test while almost all of them showed esophoria (S) with the Maddox rod. Vergence amplitudes of VFHV measured with prisms bar were out from normal range (see table C). Objective and subjective angle (oa and sa respectively) indicated no exotropia. Vergence amplitudes assessed with synoptophore revealed abnormalities for S1, S2 and S9 (in bold). Finally, most of them showed high AC/A ratio (> 4).

Table 2: Group mean \pm standard deviation of postural measures (surface of CoP, SDx, SDy and variance of speed) in the Romberg test, the prism test and the distance evaluation from VFHV and controls. EO corresponds to eye open condition, EC to eye closed and RQ to the Romberg quotient.

Table 3: Group mean \pm standard deviation of postural measures (surface of CoP, SDx, SDy and variance of speed) in the Romberg test, the prism test and the distance evaluation from VFHV before and after orthoptic training (OT). EO corresponds to eye open condition, EC to eye closed and RQ to the Romberg quotient.

Figure legends

Figure 1: (A) VFHV subjects presented higher standard deviation of lateral sway (SDx) and variance of speed than controls. (B) VFHVs presented greater Romberg quotients for all parameters than those from controls but such difference did not reach the statistical significance.

Figure 2: Viewing through convergent prisms increased (A) the surface, (B) the standard deviation of lateral (SDx) and (C) anteroposterior (SDy) body sway in VFHVs while such parameters decreased in controls in the same condition (the significant effects of prisms is indicated by the asterisks). Thus in prism condition these parameters were significantly higher in VFHVs than in controls (see circle)

Figure 3: The values of S4 and S12 are out of the range of the scale (400). S12 shows the highest improvements (positive values).

Table 1 Lê and Kapoula
A

VFHV	S1 (23)	S2 (26)	S3 (30)	S4 (33)	S5 (39)	S6 (40)	S7 (42)	S8 (42)	S9 (46)	S10 (48)	S11 (55)	S12 (66)
Headache	+	+		+		+		+		+	+	+
Visual Fatigue	+	+				+		+		+		
Eye Strain			+				+					+
Tears			+									
Blur Vision										+		
Diplopia									+			
Type abnormality	d	mix	c	mix	c	mix	mix	c	d	c	d	d
Accommodative spasms	+		+		+	+	+			+	+	+

B

Subject (years)	Visual acuity	Stere	NPC (cm)	Cover test	Maddox	Diverg.	Converg.	Synopt op oa /sa	Synop Fusion	AC/A
VFHV										
S1 (23)	10/10;10/10	40	5	O;X' ₄	E ₂ ;O'	D ₄ ;D' ₁₆	C ₂₀ ;C' ₃₀	oa=sa=0	-2,+30,-4	4.7
S2 (26)		40	10	X ₁ ;X' ₈	X ₄	D ₂ ;D' ₆₋₄	C ₄ ;C' ₄	oa=sa=+4	-6,+10,-2	3.7
S3 (30)		40	12	O;X' ₆	E ₂ ;E' ₆	D ₄₋₂ ;D' ₁₄	C ₁₄ ;C' ₈	oa=sa=0	-6,+10,-6	4.0
S4 (33)	10/10;10/10	40	5	O;X' ₆	E ₁ ;X' ₈	D ₂ ;D' ₁₆	C ₁₆ ;C' ₁₈	oa=sa=0	-4,+14,-4	4.0
S5 (39)		40	3	O;X' ₂	E ₂ ;E' ₄	D ₄₋₆ ;D' ₁₈	C ₂₀ ;C' ₄₀	oa=sa=0	-6,+20,-6	5.3
S6 (40)		40	3	O;X' ₂	E ₁ ;X' ₁	D ₈₋₆ ;D' ₁₂₋₁₀	C ₁₀ ;C' ₂₅	oa=sa=+2	-8,+14,	5.3
S7 (42)		40	3	O;O'	E ₁ ;E' ₂	D ₂ ;D' ₁₈₋₁₆	C ₁₀ ;C' ₄₀	oa=sa=+4	-4,+20,-4	6.0
S8 (42)	10/10;10/10	40	3	O;X' ₄	E ₁ ;X' ₄	D ₄ ;D' ₁₈	C ₁₄ ;C' ₄₀	oa=sa=0	-6,+16,-6	4.7
S9 (46)	10/10;10/10	40	4	EE ^{T6} E' ₈	E ₈ ;E' ₂	D ₀ ;D' ₁₆₋₁₄	C ₄₀ ;C' ₃₀₋₄₀	oa=sa=+8	0,+50,0	
S10 (48)	10/10;10/10	40	4	O;E' ₂₋₄	E ₂ ;E' ₈	D ₆ ;D' ₁₄	C ₆ ;C' ₂₅	oa=sa=+2	-4,+14,-4	7.3
S11 (55)		40	15	O;X' ₂	E ₂ ;X' ₂	D ₄ ;D' ₁₂₋₁₀	C ₂₀ ;C' ₃₀	oa=sa=+2	-4,+20,-4	5.3
S12 (66)	8/10;10/10	40	5	O;X' ₂₀	E ₁ ;E' ₁₀	D ₂ ;D' ₁₈	C ₃₀ ;C' ₄₀	oa=sa=+6	-4,+26,-4	-0.7

NPC	Phoria		Divergence range		Convergence range		AC/A
< 10 cm	Far:0-2	Close:4-6	Far: 5-9	Close:15-23	Far:18-24	Close:18-24	3-4

Table 2 Lê and Kapoula**Romberg test**

		EO	EC	RQ
Surface (mm ²)	VFHV	105 ± 94	286 ± 342	5.0 ± 8.5
	Control	76 ± 40	128 ± 54	2.0 ± 1.2
SDx (mm)	VFHV	2.3 ± 1.3	3.6 ± 2.3	1.9 ± 1.6
	Control	1.7 ± 0.6	2.2 ± 0.6	1.5 ± 0.6
SDy (mm)	VFHV	3.6 ± 1.9	5.9 ± 3.0	2.0 ± 1.3
	Control	3.4 ± 1.0	4.2 ± 1.2	1.4 ± 0.7
Speed Var. (mm ² /s ²)	VFHV	132 ± 110	162 ± 104	2.4 ± 2.3
	Control	21 ± 13	42 ± 30	2.1 ± 1.1

Prism test

		No prism	Prism
Surface (mm ²)	VFHV	193 ± 170	364 ± 410
	Control	153 ± 50	77 ± 37
SDx (mm)	VFHV	2.9 ± 2.0	4.4 ± 2.9
	Control	2.6 ± 1.1	1.7 ± 0.6
SDy (mm)	VFHV	5.7 ± 2.4	7.3 ± 4.6
	Control	5.8 ± 2.5	3.7 ± 1.0
Speed Var. (mm ² /s ²)	VFHV	151 ± 150	156 ± 125
	Control	34 ± 21	24 ± 18

Distance evaluation

		40 cm	200 cm
Surface (mm ²)	VFHV	105 ± 94	193 ± 170
	Control	76 ± 40	156 ± 48
SDx (mm)	VFHV	2.3 ± 1.3	2.9 ± 2.0
	Control	1.7 ± 0.6	2.3 ± 0.6
SDy (mm)	VFHV	3.6 ± 1.9	5.7 ± 2.4
	Control	3.4 ± 1.0	5.7 ± 2.0
Speed Var. (mm ² /s ²)	VFHV	132 ± 110	151 ± 150
	Control	21 ± 13	31 ± 19

Table 3 Lê and Kapoula**Romberg test**

		EO	EC	RQ
Surface (mm ²)	Pre-OT	87 ± 53	318 ± 434	3.1 ± 2.5
	Post-OT	81 ± 69	117 ± 68	1.9 ± 1.1
SDx (mm)	Pre-OT	2.1 ± 0.7	3.3 ± 1.8	1.7 ± 1.0
	Post-OT	2.3 ± 0.8	2.6 ± 0.5	1.3 ± 0.4
SDy (mm)	Pre-OT	3.6 ± 1.6	6.2 ± 4.3	1.7 ± 0.5
	Post-OT	3.1 ± 0.9	4.0 ± 1.1	1.4 ± 0.4
Speed Var. (mm ² /s ²)	Pre-OT	131 ± 128	177 ± 142	2.2 ± 1.6
	Post-OT	156 ± 81	179 ± 78	1.2 ± 0.5

Prism test

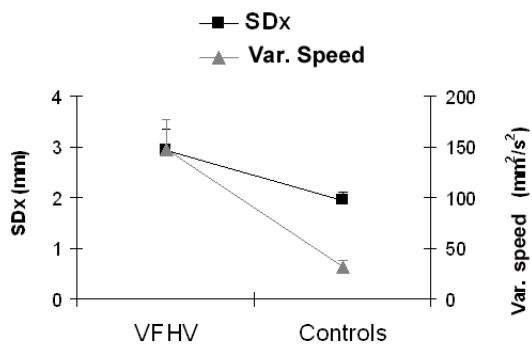
		No prism	Prism
Surface (mm ²)	Pre-OT	256 ± 218	270 ± 356
	Post-OT	159 ± 140	183 ± 115
SDx (mm)	Pre-OT	3.6 ± 2.6	4.0 ± 3.2
	Post-OT	2.8 ± 1.3	3.2 ± 1.3
SDy (mm)	Pre-OT	6.4 ± 2.9	5.7 ± 3.4
	Post-OT	4.3 ± 1.8	5.0 ± 1.4
Speed Var. (mm ² /s ²)	Pre-OT	176 ± 209	154 ± 162
	Post-OT	149 ± 59	166 ± 51

Distance evaluation

		40 cm	200 cm
Surface (mm ²)	Pre-OT	87 ± 53	256 ± 218
	Post-OT	81 ± 69	159 ± 140
SDx (mm)	Pre-OT	2.1 ± 0.7	3.6 ± 2.6
	Post-OT	2.3 ± 0.8	2.8 ± 1.3
SDy (mm)	Pre-OT	3.6 ± 1.6	6.4 ± 2.9
	Post-OT	3.1 ± 0.9	4.3 ± 1.8
Speed Var. (mm ² /s ²)	Pre-OT	131 ± 128	176 ± 209
	Post-OT	156 ± 81	149 ± 59

Figure 1 Lê et al.

A)



B)

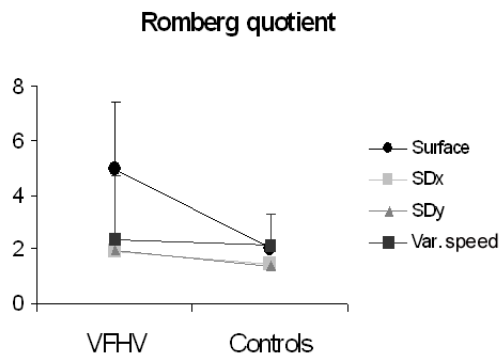


Figure 2 Lê et al.

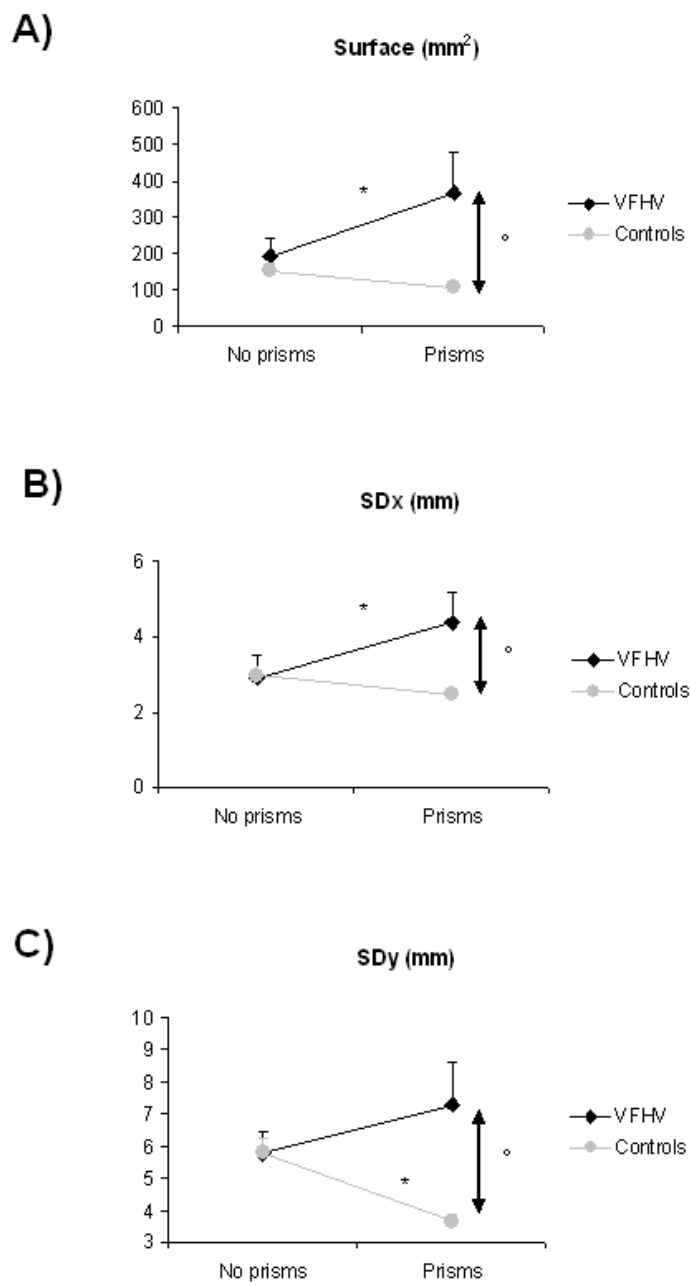
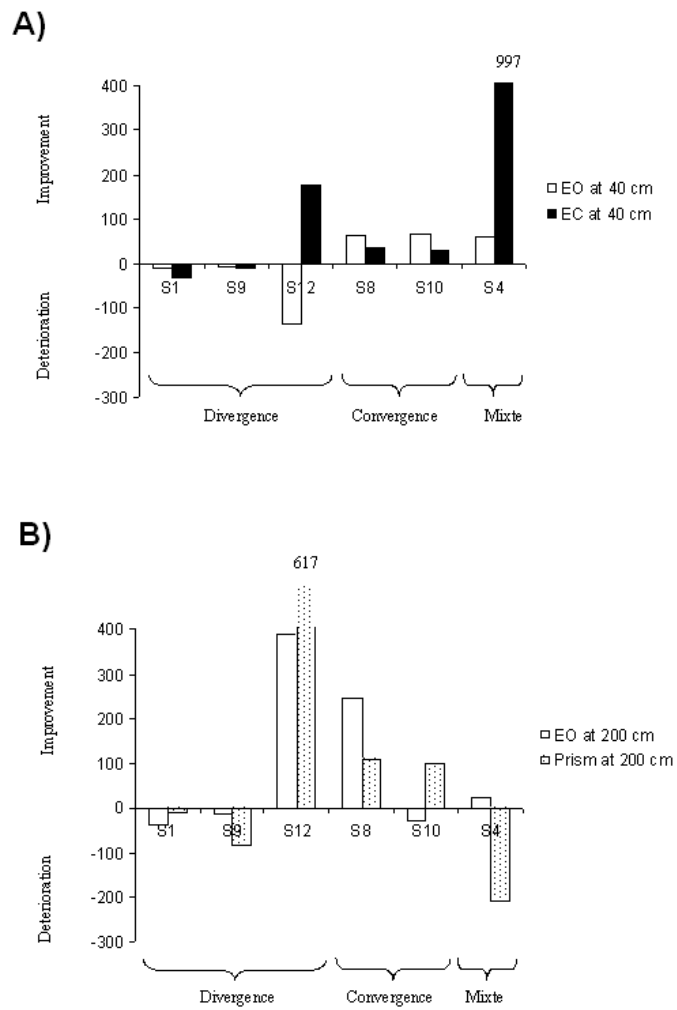


Figure 3 Lê et al.

Difference of surface of CoP (mm²) "before minus after" orthoptic training



Etude complémentaire

Effects of a two-diopter vertical prism on posture

Eric Matheron^{a,b}, Thanh-Thuan Lê^a, Qing Yang^a, Zoi Kapoula^{a,*}

^a IRIS Group, CNRS-MR 7152, Collège de France, 11 place M. Berthelot, 75005 Paris, France

^b Université de Bourgogne, Faculté des Sciences du Sport, Campus Universitaire Montmuzard, B.P. 27877, 21078 Dijon Cedex, France

Received 19 April 2007; received in revised form 4 July 2007; accepted 7 July 2007

Abstract

Postural control in upright stance requires the central integration of visual, vestibular, somatosensory (as cutaneous receptors) and proprioceptive (as joint receptors) inputs. Clinical studies seem to indicate an association between vertical heterophoria (VH) and balance control. The purpose of the study was to simulate a VH and examine its influence on body stabilisation in quiet stance. We studied 15 healthy subjects (25.6 ± 3.0 years). The postural stability was measured with a platform under the following conditions: normal viewing, with a two-diopter prism base down placed on the dominant eye (PDE) or the non-dominant eye (PNDE). Both eyes were open in all conditions. All conditions were run at two distances: 200 and 40 cm. The results showed: (i) PNDE increased the antero-posterior body sway for both distances; this result could be related to sensory processing of disparity and/or to inappropriate eye movement response to the disparity induced by the prism; (ii) PDE improved the postural stability only at far distance (reduction of the center-of-pressure excursion area and of the lateral body sway). Such positive result could be due to appropriate sensory processing of disparity and/or eye movement response; the latter would reduce vertical disparity and modify the dynamic and tonic eye muscle activity relative to normal viewing at far distance. We conclude that: (i) experimentally induced vertical phoria does indeed influence postural control; (ii) vertical prisms, even of small power, can have complex effects, positive or negative, depending on the eye wearing it and at the distance fixated.

© 2007 Elsevier Ireland Ltd. All rights reserved.

Keywords: Quiet stance; Postural stability; Vertical heterophoria; Vertical disparity; Prism; Distance fixation

Maintenance of postural balance is multi-determined and requires processing of signals from the visual, vestibular and somatosensory systems. Extra-ocular proprioceptive cues can also influence the postural control in upright stance and play an important part in the organisation of whole body posture as well as in interrelating body space with extrapersonal space [19,32]. Multisensory interaction for equilibrium control may not result from a simple convergence of raw sensory inputs of different modalities but may imply appropriate coordinate transformations [18]. Clinical studies indicate an association between chronic pain in the absence of neuropathy or rheumatism, vertical heterophoria (VH) and qualitative balance control [26]. VH is a relative deviation of the visual axes of the eyes which are reduced via binocular vision mechanisms [1].

In order to substantiate these clinical observations, we undertook a study that aimed to simulate pathologic vertical phoria and the consequence on the postural control. We recruited healthy young adults without abnormal VH and we inserted in front of one eye a two-diopter vertical prism (VP) in order to cause binocular disparity. The prism should mobilise oculomotor compensatory movements that reduce the binocular disparity caused by the prism.

Earlier studies showed that the oculomotor responses provoked by a same VP (i) was slow [23,37]; (ii) could be asymmetric between the two eyes [23,37]; (iii) the magnitude of the response fluctuated and could be high or low [21,32]; (iii) depended on the viewing distance [37]. Small VH exists in normal subjects, on average $0.16 \pm 0.01^\circ$ corresponding to 0.28 diopter [36]. In the present study we used a two-diopter prism which accentuated or reduced the natural VH.

The postural control in quiet stance implies the vestibulo-ocular, vestibulospinal and reticulospinal systems. Now the gaze signals have a powerful control over these systems [3] and their neurones show a tonic or phasic eye position related

* Corresponding author at: IRIS Group attaché pour ordre au Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action, CNRS-UMR 7152, Collège de France, 11 place M. Berthelot, 75005 Paris, France. Tel.: +33 1 44 27 16 35; fax: +33 1 44 27 13 82.

E-mail address: zoi.kapoula@college-de-france.fr (Z. Kapoula).

activity and also receive cortical inputs. Moreover, eye muscles possess a proprioceptive system and the afferent information from extraocular muscles plays a functional role in oculomotor control and in vision [9,14]. Büttner-Ennever [6] pointed that stimulation of extra-ocular muscles evokes responses in the mesencephalic trigeminal nucleus, superior colliculus, visual cortex, cerebellum and nucleus prepositus, confirmed by anatomical tracing studies. The afferent proprioceptive signal could be used to adjust eye alignment. The relationship between postural control, gaze control and the associated proprioceptive feedback from extraocular muscles was shown [19,32]. Roll and Roll [31] suggested that muscle-spindle inputs might form a continuous proprioceptive chain from the feet to the eyes necessary for the internal representation of the body posture, and a multitude of proprioceptive information serves to regulate and orient a single posture.

Thus, the search for a possible link between eye alignment and postural control is physiologically plausible. The present study aims to test the influence of a VP on body stabilisation in quiet stance while the subjects fixate a target at a far or near distance. It is the deviation of the luminous ray by a prism which is at the origin of the difference in relationship between extraocular proprioception eye alignment and vision. The postural system which integrates visual and proprioceptive information should be influenced by such mismatch.

The results showed that the prism influences posture stability differently according to the viewing distance, and according to the eye wearing the prism, e.g. dominant or non-dominant.

Fifteen healthy young subjects (nine females) in the age range of 22–31 years (25.6 ± 3.0 years), were recruited among laboratory co-workers, without neurological, otoneurological or ophthalmological symptom, no medication, no musculo-skeleton problems. They all had normal vision with no history of strabismus. The subjects with glasses were not included as their glasses can already have some prismatic effects. Eleven subjects were right DE and four were left DE. Eye dominance was determined by asking the subject to fixate a target via a hole, initially binocularly and then close alternatively each eye; the eye for which the target was seen was the DE.

We used the Maddox rod test which is appropriate for clinically measuring the vertical deviation or heterophoria [7]. The subject stood erect, 5 m in front of a point of light, in an anatomically referenced position. Maddox's rod, with its stripes running vertically, was placed in front of one eye, transforming this point into a red horizontal line; the other eye saw the point. The task consisted of positioning the light point on the red line; presence of VH was concluded when the point was over or under the line. The Maddox rod test was combined with the bar-prism to measure the deviation of the eyes, i.e. to align the red horizontal line with the light [7]. According to this test, four of the subjects recruited showed orthophoria, which is perfect alignment of the eyes and 11 subjects had small VH which was in the range of normal values, i.e. inferior to 1 diopter [36].

The investigation adhered to the tenets of the declaration of Helsinki and was approved by the institutional human experimentation committee. Informed consent was obtained from all subjects after the nature of the procedure had been explained.

To measure postural stability, we used a platform (principle of strain gauge) consisting of two dynamometric clogs (Standards by Association Française de Posturologie; produced by TechnoConcept, Céreste, France). Body sway was evaluated by computing the excursions of the centre of pressure (CoP) measured during 25.6 s; the equipment contained a 16-bit Analog-Digital converter and the sampling frequency of the CoP was 40 Hz.

A vertical screen was used to display a target along the vertical midline. The target was a letter "x" placed between two vertical segments. The angular size of the letter "x" was adjusted to subtend 1° for both viewing distances (200 and 40 cm). At 200 cm, the angle of vergence was 2° while at 40 cm it was 9° . The visual target was placed at eye level for each subject in upright stance on the platform.

Quiet stance posturography was studied in a normally furnished experimental room. Subjects were placed on the platform and were asked to fixate the "x" target. The subjects wore a special spectacle frame upon which one could easily stick the press-on Fresnel prism (2-diopter base down). During posturography, subjects looked the target that was clearly visible for both distances. The order of the two distances was counterbalanced between subjects. For each distance, a normal viewing condition (NV) without prism was performed twice, at the beginning of the experiment and at the end; the two other conditions, with the prism on the DE (PDE) and with the prism on the NDE (PNDE), were counterbalanced among the subjects. Between conditions the subjects sat on a chair for 1 min rest period. At the end of this period we asked the subjects to close their eyes and in prism condition, the prism was inserted on the spectacle frame while the eyes were still closed. Then, we asked the subjects to stand up and upon a "go" signal given by the investigator; the subjects opened their eyes at the moment the posturography recording started. These precautions were taken so that subjects had vision with the prism at the beginning of posturography recording; recall that eye movement responses to a vertical disparity are executed within a few seconds (up to 8 s see [23]). Our measure of posture included the period of such oculomotor responses evoked by the prism. After a prism condition, the prism was removed. During the rest period, the subjects kept their eyes open and looked about the room. So the previous possible effect of the prism was eliminated by normal visual experience.

We analysed the surface of the CoP excursions (SCoP), the standard deviations of lateral (SDx) and antero-posterior (SDy) body sways and the variance of speed (VS). The surface was measured with the confidence ellipse including 90% of the CoP positions sampled [12,35], eliminating the extreme points.

A mixed ANOVA design was used with two main factors: the distance with two levels (far and close); and prism-no prism viewing conditions with three levels (NV, PDE, PNDE). The post hoc comparisons were done by Fischer's PLSD test.

Means and standard errors are shown in Table 1 for each viewing condition (NV, PDE, PNDE) and each distance (close and far) for all postural parameters. Next, we will present the results of ANOVA evaluating the effects of distance and viewing conditions on postural parameters.

Table 1
Postural stability measurements in quiet stance (25.6 s duration) for 15 subjects

Distance						
40 cm			200 cm			
NV	PDE	PNDE	NV	PDE	PNDE	
Surface area of CoP (mm ²)						
95.9 ± 12.3	126.1 ± 19.1	104.4 ± 8.9	135.3 ± 21.4	96.1 ± 12.6	118.5 ± 17.2	
Standard deviation of lateral sway (mm)						
2.1 ± 0.2	2.3 ± 0.3	1.9 ± 0.1	2.3 ± 0.3	1.7 ± 0.2	1.9 ± 0.2	
Standard deviation of antero-posterior sway (mm)						
3.9 ± 0.4	4.8 ± 0.6	4.9 ± 0.5	4.4 ± 0.5	4.3 ± 0.4	5.0 ± 0.6	
Speed variance (mm ² /s ²)						
34.2 ± 5.4	37.8 ± 7.0	36.7 ± 6.9	39.5 ± 6.5	37.0 ± 6.3	37.6 ± 7.7	

Means and standard errors of SCoP, SDx, SDy and VS for each distance (40 and 200 cm) each viewing conditions, i.e. normal viewing (NV), with prism on the dominant eye (PDE) and the non-dominant eye (PNDE).

The prism had a significant main effect on the SDy ($F_{(2,28)}=4.97$; $p=.014$) and not on the others parameters. Fisher's PLSD post hoc test showed significant increment of the SDy when the prism was inserted on the NDE compared with the NV condition ($p=.004$, see Fig. 1A).

There was a significant interaction between distance and prism viewing condition for the SCoP ($F_{(2,28)}=4.48$; $p=.020$) and SDx ($F_{(2,28)}=3.90$; $p=.032$).

The post hoc test showed the following. In the absence of prism (NV), the SCoP was smaller at the closer distance than the farther one ($p=.024$, see Fig. 1B); this is a confirmatory result [4,5,22,28].

The post hoc test showed that, at 200 cm, there was significant decrement of SCoP ($p=.024$, see Fig. 1B) and SDx ($p=.007$, see Fig. 1C) when the prism was inserted on the DE compared with the NV. By contrast, at 40 cm, no significant effect was found other than an opposite tendency, i.e. mild increase of the SCoP when the prism was on the DE relative to the NV ($p=.079$, see Fig. 1B). The prism on the NDE had no significant effect other than a tendency to decrease the SDx at 200 cm ($p=.077$, see Fig. 1C).

To summarize, the results show a main negative effect of the prism, i.e. increasing of the SDy when the prism was on the NDE. Second, the results show a local interaction with a positive effect at far viewing distance, i.e. decreasing of the SCoP and SDx when the prism was on the DE.

Several types of physiologic dominance were described between the two eyes in previous studies: sensory [2,10,27,34], motor [20,25,29], both sensory and motor [8,17] and "postural" which is not necessarily the DE [15]. In this study the posture stability was differently influenced according to whether the dominant or non-dominant eye was wearing the prism.

The first finding was the significant increment of SDy when the 2-diopter prism base down was on the NDE occurring both at close and far distance. This effect could be due to sensory processing of disparity and/or to oculomotor signals triggered by the disparity. There is evidence that the oculomotor response which reduces vertical disparity, e.g. induced by prisms is slow [23,37].

On the other hand, the group of Brandt [5,16,33] showed that oculomotor signals influence postural control. Glasauer et al. found that slow pursuit movements performed by the eyes alone can induce a significant increase of body sway in compared to fixation [16]. As the retinal slip amplitude was similar between smooth pursuit and fixation and on the basis of this result, the author suggest that gaze signal is a better indicator of head and body motion in space than retinal slip when the subjects fixated a target. Whether, disparity driven vertical vergence eye movements influence postural stabilisation, to our knowledge, has not been examined. In the present study, the VP activated the vertical extra-ocular muscles inducing oculomotor responses and thereby providing proprioceptive signals from such muscles. Roll and Roll [31] and Roll et al. [32] showed that vibration of extra-ocular muscles alone elicit prominent body sway in a direction that depends on the stimulated muscles, particularly backward and forward body tilts occur respectively after inferior and superior eye-muscle vibration. The authors argue that such extraocular proprioceptive signals are able to give rise to conscious kinaesthetic sensation of the whole body and thus to contribute to the coding of egocentric references involved in spatial information processing. In case it does, why the increment of SDy occurs only when the prism was on the NDE? As previously mentioned, oculomotor response to a vertical disparity is variable and different from one eye to the other [21,23,37]. Such difference has been also found in sensory processing level (e.g. the ocular dominance columns in V1, see [24]). Even though these earlier studies did not specify whether the response to the vertical disparity was larger in the DE than NDE, they did show an oculomotor asymmetry; thus the non-dominant eye movement response to the prism disparity could be inappropriate for the required value (1.14°) and this could induce posture instability. Further investigation with simultaneous eye movement recording and posturography could help to test this. One could ask whether such increase of the SDy could be due to discomfort and anxiety related to the insertion of the prism. Although we cannot exclude such aspects, it is clear that the prism modify sensory visual information which induces vertical disparity and eye movements. Moreover, the following results showing that

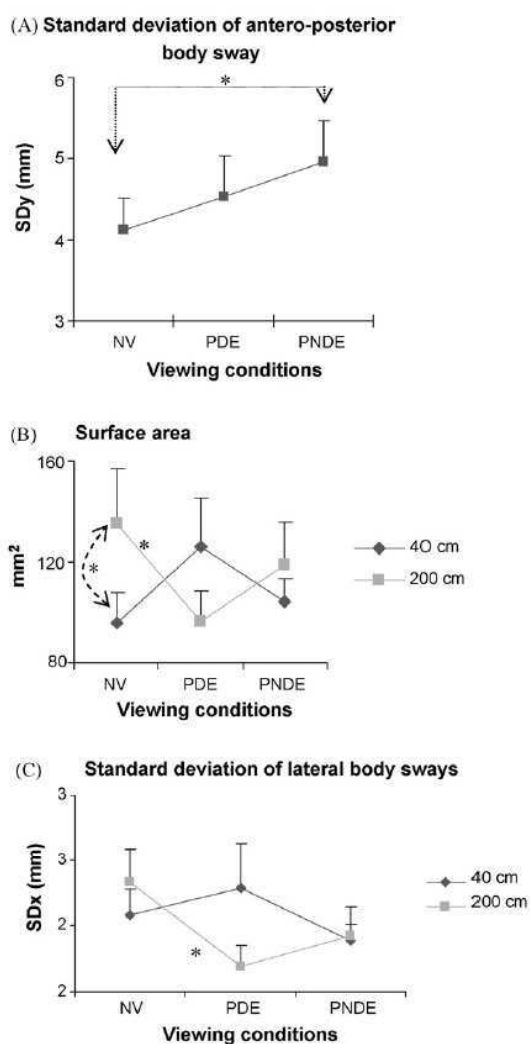


Fig. 1. (A) Means of SDy under NV, PDE and PNDE conditions (data for the distance are grouped). (B) Means of the SCoP (mm²) for NV, PDE and PNDE conditions for each distance (40 and 200 cm). (C) Means of SDx under NV, PDE and PNDE conditions for each distance (40 and 200 cm). Asterisk indicates significant difference ($p < .05$).

insertion of prism on the DE led to a decrease in body sway do not fit with the anxiety and discomfort explanation.

Another contrasting but more local finding was the significant decrease on average of the SCoP and SDx when the prism was placed on the DE and the subjects viewed at far distance. For instance, the mean value difference between PDE and NV was 39.2 mm² for the SCoP. One could ask whether such difference had a functional meaning. Previous studies dealing with different questions (e.g. [13,22]) reported effects of similar magnitude. For instance, Gangloff et al. found significant difference between intercupal occlusion and centric relation conditions within the order of 34.4 mm² [13]. Moreover, the individual results showed that the decrease occurred for 9 and 11 out of the 15 subjects for the SCoP and SDx, respectively.

The explanation of this effect could be similar to that previously mentioned: sensory processing of disparity could be more efficient when the prism was over the DE. Another complementary possibility is that the disparity caused by the prism drove more appropriate motor response when the prism was placed on the DE than on the NDE; appropriate motor response would in its turn reduce or eliminate the disparity thus contributing to the improvement of posture control. Moreover, afferent proprioceptive and efferent oculomotor signals could be useful in such case leading to a better stabilisation of body oscillations and reduction of the SCoP. The idea here is that active eye movements reducing disparity could even assist and improve posture stabilisation mechanisms. Our hypothesis is that, in general, afferent and efferent oculomotor signals related to eye movements could be useful and beneficial for posture stabilisation, under the condition, however, that these movements subservise visual needs and do not create additional sensory errors. Our thinking on the role of eye movements on posture is in general agreement with the recent study of Glasauer et al. [16].

A final question to be asked is why such improvement occurs at far distance only. Perhaps at farther distances, the vertical re-alignment of the eyes caused by the prism creates substantial change in the weight of the contribution of oculomotor signals. Without prism and while fixating at far distance the visual axes were almost parallel (the vergence angle was 2°), the oculomotor signals poorer. At near, oculomotor signals from vertical re-alignment were combined with those from horizontal convergence (9° convergence angle). Consequently, the additional benefit was weak at near distance, because at this distance eye convergence being already important provides strong input for body stabilisation. Kapoula and Lê [22] have previously shown the importance of vergence oculomotor signals. In their study, convergence of the eyes induced by insertion of convergent prisms reduced significantly postural stabilisation. Furthermore they showed that at far distance viewing the depression or elevation of the eyes produced better postural stability than when the subjects fixated straight-ahead. According to the authors this effect could be due to efferent or proprioceptive signals from extraocular muscles required elevation or depression of the eyes while looking straight-ahead, extraocular muscles are more relaxed.

Clinicians use small prisms in cases of postural syndromes or dyslexia [11,30]; the exact mechanisms of prism action on postural control are unknown but as previously mentioned there are muscular synergies between extraocular muscles, neck, trunk and lower limbs muscles [31]. The clinical implications and the general conclusion that can be drawn from this work are that VP, even of small power, could have a notable influence on postural stability, positive or negative, depending on the eye. It is clearly shown that a small prism could impair postural stability when inserted on the NDE. These negative and, to at least extent, positive effects could be attributed to differences in disparity processing and/or to differences in eye movement responses induced by the prism on the NDE versus DE. Clinical use of prisms should be considered carefully as their action is complex and interacts with many other factors (eye dominance and distance). Further studies with simultaneous recordings of disparity

induced vergence movements and posturography are needed to test some of these hypotheses.

The motivation of this study came from clinical observations that suggest a link between VH clinically measured, chronic pain and qualitative balance control [26]. In line with this, the present study suggests that there is indeed a link between VH experimentally induced and postural stabilisation. However, the effects were not always negative, they could be positive as the interactions between eye movements and postural control might be more complex than initially thought. Thus, studies of patients with VH examining the correlation between vertical phoria (e.g. measured with the Maddox rod test) and measurement of posture would be of interest.

Acknowledgements

The authors thank the subjects and Carolyn Delelee for English revision. Eric Matheron thanks Dr. France Mourey and Pr Pierre Pfitzenmeyer for their constant support.

References

- [1] F.J. Amos, R.P. Rutstein, Vertical deviation, in: F.J. Amos (Ed.), *Diagnosis and Management in Vision Care*, Butterworths, Amsterdam, New-York, Oxford, 1987, pp. 515–583.
- [2] N. Berardi, T. Pizzorusso, G.M. Ratto, L. Maffei, Molecular basis of plasticity in the visual cortex, *Trends Neurosci.* 26 (2003) 369–378.
- [3] A. Berthoz, The role of gaze in compensation of vestibular dysfunction: the gaze substitution hypothesis, *Prog. Brain Res.* 76 (1988) 411–420.
- [4] W. Bles, T.S. Kapteyn, T. Brandt, F. Arnold, The mechanism of physiological height vertigo. II. Posturography, *Acta Otolaryngol.* 89 (1980) 534–540.
- [5] T. Brandt, W. Paulus, A. Straube, Vision and posture, in: W. Bles, T. Brandt (Eds.), *Disorders of Posture*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, New-York, Oxford, 1986, pp. 157–175.
- [6] J.A. Büttner-Ennever, in: J.A. Büttner-Ennever (Ed.), *Progress in Brain Research: Neuroanatomy of the Oculomotor System*, 151, Elsevier Science Publishing Company, 2006, pp. 1–574.
- [7] K.M. Daum, Heterophoria and heterotropia, in: J.B. Eskridge, F.J. Amos, J.D. Barlett (Eds.), *Clinical Procedures in Optometry*, J.B. Lippincott Company, Philadelphia, 1991, pp. 72–90.
- [8] R.S. el-Mallakh, R.J. Wyatt, S.W. Looney, Does motor cerebral dominance develop secondary to sensory dominance? *Percept. Mot. Skills* 76 (1993) 647–652.
- [9] A. Fiorentini, L. Maffei, Instability of the eye in the dark and proprioception, *Nature* 269 (1977) 330–331.
- [10] Q.S. Fischer, C.J. Beaver, Y. Yang, Y. Rao, K.B. Jakobsdottir, D.R. Storm, G.S. McKnight, N.W. Daw, Requirement for the RIIbeta isoform of PKA, but not calcium-stimulated adenylyl cyclase, in visual cortical plasticity, *J. Neurosci.* 24 (2004) 9049–9058.
- [11] P.M. Gagey, R. Gentaz, C. Bodot, Postural checkup, *Agressologie* 28 (1987) 925–929.
- [12] P.M. Gagey, B. Weber, Stabilométrie, in: P.M. Gagey, B. Weber (Eds.), *Posturologie: régulation et dérèglements de la station debout*, Editions Masson, Paris, 1999, pp. 45–59.
- [13] P. Gangloff, J.P. Louis, P.P. Perrin, Dental occlusion modifies gaze and posture stabilization in human subjects, *Neurosci. Lett.* 293 (2000) 203–206.
- [14] G.M. Gauthier, D. Nommay, J.L. Vercher, Ocular muscle proprioception and visual localization of targets in man, *Brain* 113 (Part 6) (1990) 1857–1871.
- [15] R. Gentaz, The postural eye, *Agressologie* 29 (1988) 685–686.
- [16] S. Glasauer, E. Schneider, K. Jahn, M. Strupp, T. Brandt, How the eyes move the body, *Neurology* 65 (2005) 1291–1293.
- [17] T. Handa, K. Mukuno, H. Uozato, T. Niida, N. Shoji, K. Shimizu, Effects of dominant and nondominant eyes in binocular rivalry, *Optom. Vis. Sci.* 81 (2004) 377–383.
- [18] Y.P. Ivanenko, R. Grasso, F. Lacquaniti, Effect of gaze on postural responses to neck proprioceptive and vestibular stimulation in humans, *J. Physiol.* 519 (Part 1) (1999) 301–314.
- [19] Y.P. Ivanenko, R. Grasso, F. Lacquaniti, Neck muscle vibration makes walking humans accelerate in the direction of gaze, *J. Physiol.* 525 (Part 3) (2000) 803–814.
- [20] L.F. Jones 3rd, J.G. Classe, M. Hester, K. Harris, Association between eye dominance and training for rifle marksmanship: a pilot study, *J. Am. Optom. Assoc.* 67 (1996) 73–76.
- [21] Z. Kapoula, T. Eggert, M.P. Bucci, Disconjugate adaptation of the vertical oculomotor system, *Vis. Res.* 36 (1996) 2735–2745.
- [22] Z. Kapoula, T.T. Le, Effects of distance and gaze position on postural stability in young and old subjects, *Exp. Brain Res.* 173 (2006) 438–445.
- [23] A.E. Kertesz, Vertical and cyclofusional disparity vergence, in: C.M. Schor, K.J. Ciuffreda (Eds.), *Vergence Eye Movements*, Butterworth-Heinemann, Boston, MA, 1983, pp. 317–348.
- [24] M.S. Livingstone, S. Nori, D.C. Freeman, D.H. Hubel, Stereopsis and binocularity in the squirrel monkey, *Vis. Res.* 35 (1995) 345–354.
- [25] A.P. Mapp, H. Ono, R. Barbeito, What does the dominant eye dominate? A brief and somewhat contentious review, *Percept. Psychophysiol.* 65 (2003) 310–317.
- [26] E. Matheron, P. Quercia, B. Weber, P.M. Gagey, Vertical heterophoria and postural deficiency syndrome, *Gait Posture* 21 (2005) S132–S133.
- [27] H. Nakagama, S. Tanaka, Self-organization model of cytochrome oxidase blobs and ocular dominance columns in the primary visual cortex, *Cereb. Cortex* 14 (2004) 376–386.
- [28] W.M. Paulus, A. Straube, T. Brandt, Visual stabilization of posture. Physiological stimulus characteristics and clinical aspects, *Brain* 107 (Part 4) (1984) 1143–1163.
- [29] J.M. Portal, P.E. Romano, Major review: ocular sighting dominance—a review and a study of athletic proficiency and eye-hand dominance in a collegiate baseball team, *Binocul. Vis. Strabismus Q* 13 (1998) 125–132.
- [30] P. Quercia, A. Seigneuric, S. Chariot, A. Bron, C. Creuzot-Garcher, F. Robichon, Proprioception changes induced by prismatic glasses wear in children suffering from developmental dyslexia, *J. Fr. Ophthalmol.* 30 (2007) 380–389.
- [31] J.P. Roll, R. Roll, From eye to foot: a proprioceptive chain involved in postural control, in: B. Amblard, A. Berthoz, F. Clarac (Eds.), *Posture and Gait: Development, Adaptation, and Modulation*. Proceedings of the 9th International Symposium on Postural and Gait Research, Marseille, France, May 29–June 1, Elsevier, Amsterdam, 1988, pp. 155–164.
- [32] J.P. Roll, J.P. Vedel, R. Roll, Eye, head and skeletal muscle spindle feedback in the elaboration of body references, *Prog. Brain Res.* 80 (1989) 113–123 (discussion 57–60).
- [33] M. Strupp, S. Glasauer, K. Jahn, E. Schneider, S. Krafczyk, T. Brandt, Eye movements and balance, *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1004 (2003) 352–358.
- [34] S. Taha, M.P. Stryker, Rapid ocular dominance plasticity requires cortical but not geniculate protein synthesis, *Neuron* 34 (2002) 425–436.
- [35] A. Takagi, E. Fugimura, S. Suehiro, A new method of statokinesigram area measurement. Application of a statistically calculated ellipse, in: M. Igarashi, F.O. Black (Eds.), *Vestibular and visual control on posture and locomotion equilibrium*. Proceedings of the 7th International Symposium of the International Society of Posturography, Karger, Basel, Houston, Texas, 1985, pp. 74–79.
- [36] L.J. van Rijn, M.P. ten Tusscher, I. de Jong, F. Hendrikse, Asymmetrical vertical phorias indicating dissociated vertical deviation in subjects with normal binocular vision, *Vis. Res.* 38 (1998) 2973–2978.
- [37] J. Ygge, D.S. Zee, Control of vertical eye alignment in three-dimensional space, *Vis. Res.* 35 (1995) 3169–3181.

Chapitres de la revue Posture et Équilibre

LA DISTANCE DÉTÉRIORE LA STABILITÉ POSTURALE CHEZ LE SUJET JEUNE ET ÂGÉ SEULEMENT EN VISION BINOCULAIRE

INTRODUCTION

La vision joue un rôle majeur dans le contrôle de la posture. En absence d'information visuelle (les yeux fermés durant le test de Romberg) la stabilité posturale se détériore (Gagey et Weber, 1999). La vision binoculaire utilise des signaux liés à la disparité qui apportent des indices sur notre environnement en terme de profondeur et de distance. La richesse des indices visuels en vision binoculaire rend-elle cette dernière plus efficace en terme de stabilisation du corps en comparaison à la vision monoculaire ?

Les études qui ont comparé l'influence de la vision binoculaire *versus* monoculaire ont obtenu des résultats contradictoires. Les sujets de l'étude de Fox (1990) ont présenté une amélioration de l'équilibre postural en vision binoculaire (avec la présence ou non de stimuli visuels) alors qu'Isotalo *et al.* (2004) n'ont observé ce renforcement que pour la moitié de leurs sujets. Il est possible que ces différences soient dues à la distance utilisée dans chacune de ces études. En effet, les sujets de l'étude de Fox (1990) ont été placés à une distance plus grande que celle utilisée par Isotalo *et al.* (2004), (145 cm *versus* 90 cm respectivement). Or, des auteurs ont montré une meilleure stabilité posturale

1. Groupe IRIS, CNRS-UMR 7152, Collège de France, 11 Place Marcelin Berthelot, 75005 Paris

lorsque les sujets fixent une cible en distance proche en comparaison de la distance lointaine (Bles *et al.*, 1980; Paulus *et al.*, 1984; Brandt *et al.*, 1986; Paulus *et al.*, 1989).

Notre étude a pour objectif de réexaminer l'influence de la vision binoculaire *versus* monoculaire avec des distances plus extrêmes (40 et 200 cm) que celles utilisées dans l'étude de Fox (1990) et d'Isotalo *et al.* (2004).

Nombreuses sont les études portées sur l'influence de l'âge dans le contrôle de la posture (Corriveau *et al.*, 2001; Corriveau *et al.*, 2004a; Corriveau *et al.*, 2004b). Elles révèlent généralement une détérioration de l'équilibre postural chez les septuagénaires en terme d'élargissement de la surface du centre de pression « CdP » (Doyle *et al.*, 2004; Aufauvre *et al.*, 2005). Il est possible qu'avec l'âge il soit plus difficile de maintenir une posture stable lorsque les indices visuels diminuent (par exemple en vision monoculaire). En effet, plusieurs études ont montré qu'avec l'âge l'acuité visuelle (Ivers *et al.*, 2000; Laitinen *et al.*, 2005) et la stéréoacuité (Zaroff *et al.*, 2003) se détériorent. Dans notre étude, nous avons appliqué l'examen de la posture chez un groupe de sujets de plus de 60 ans en comparaison à un groupe de sujets contrôle (25 ans).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

SUJETS

Seize sujets d'âge moyen $25,7 \pm 2,7$ ans et 14 sujets d'âge moyen $61,2 \pm 4,6$ ans ont participé à l'étude. Tous les sujets retenus pour l'étude présentaient une dominance oculaire droite (voir le test de l'œil directeur plus bas). Le questionnaire utilisé au préalable confirmait que tous les sujets ne présentaient pas de trouble neurologique et qu'aucun ne suivait de traitements médicaux. Enfin, tous les participants présentaient des fonctions visuelles satisfaisantes (acuité visuelle, *Punctum Proximum de Convergence*, stéréoacuité, phorie horizontale, amplitude de vergence).

TEST DE L'ŒIL DIRECTEUR

Dans notre test, les sujets devaient viser avec les 2 yeux ouverts une cible à 5 mètres à travers le « trou » formé par leurs 2 mains. Ensuite, ils devaient successivement fermer chaque œil et juger avec lequel ils continuaient à percevoir la cible. Cet œil correspond à l'œil directeur.

POSTUROGRAPHIE

Caractéristiques

Nous avons utilisé une plate-forme de force composée de sabots dynamométriques, un pour chaque pied (Posturewin, *TechnoConcept*, Céreste, France). Les excursions du centre de pression « CdP » sont enregistrées durant 51,2 s; la plate-forme de posturographie est équipée d'un convertisseur analogique digital (16 bits) et la fréquence d'acquisition est de 40 Hz.

Conditions de l'expérience

Les sujets ont été placés sur la plate-forme et devaient garder une position érigée et statique (position standard de Romberg, 5 cm de distance entre les 2 talons et un angle d'écartement entre les 2 gros orteils de 30°). Durant l'enregistrement posturographique, la consigne donnée aux participants était de fixer la lettre « X » de taille angulaire égale à 1° placée entre deux segments verticaux de taille angulaire de 0,29° qui était placée à 40 cm ou à 200 cm. Pour chacune des deux distances, la fixation de la cible était binoculaire, avec l'œil directeur (OD) ou avec l'œil non directeur (OND) ouvert. Pour ces 2 conditions, un masque en papier était fixé avec un élastique autour de la tête couvrant ainsi un seul œil. L'ordre des 2 distances (40 et 200 cm) était contrebalancé entre les sujets et, pour chaque distance, l'ordre des 3 conditions « binoculaire, OD et OND » était aussi contrebalancé.

Paramètres posturographiques

Nous avons analysé la surface du CdP, les écart-types des oscillations latérales (ETx) et antéropostérieures (ETy) et la variance de vitesse du CdP. La surface du CdP recouvre 90 % des positions instantanées du CdP les plus proches de la position moyenne (Gagey et Weber, 1999).

Analyse statistique

Pour tous les paramètres, nous avons effectué une analyse de la variance comprenant 1 facteur inter-individuel, le groupe d'âge (jeune et âgé), 2 facteurs intra-individuels, la distance (40 et 200 cm) et la vision binoculaire *versus* monoculaire (OD et OND). Les comparaisons *a posteriori* ont été faites avec le test de Scheffé ; l'effet d'un facteur est significatif si la valeur du « p » qui lui est associé est inférieure ou égale à 0,05.

RÉSULTATS

EFFET DE L'ÂGE

L'âge n'influe pas sur la surface du CdP ni sur les ETx et les ETy. L'âge n'a pas non plus d'influence sur la variance de vitesse (Fig. 1). Cependant, l'interaction entre l'âge et la distance est significative sur ce dernier paramètre ($F_{(2,56)} = 4,69$, $p = 0,039$). La variance de vitesse est plus importante chez les sujets âgés que chez les sujets jeunes pour la distance de 200 cm ($p = 0,00058$).

EFFET DE LA DISTANCE

L'effet de la distance est significatif pour la plupart des paramètres étudiés, la surface du CdP (Fig. 2) ($F_{(1,28)} = 10,2$, $p = 0,0034$), l'ETy ($F_{(1,28)} = 15,7$, $p = 0,00046$) et la variance de vitesse ($F_{(1,28)} = 4,86$, $p = 0,036$). Tous ces paramètres sont significativement inférieurs dans la condition distance proche par rapport à la condition distance lointaine.

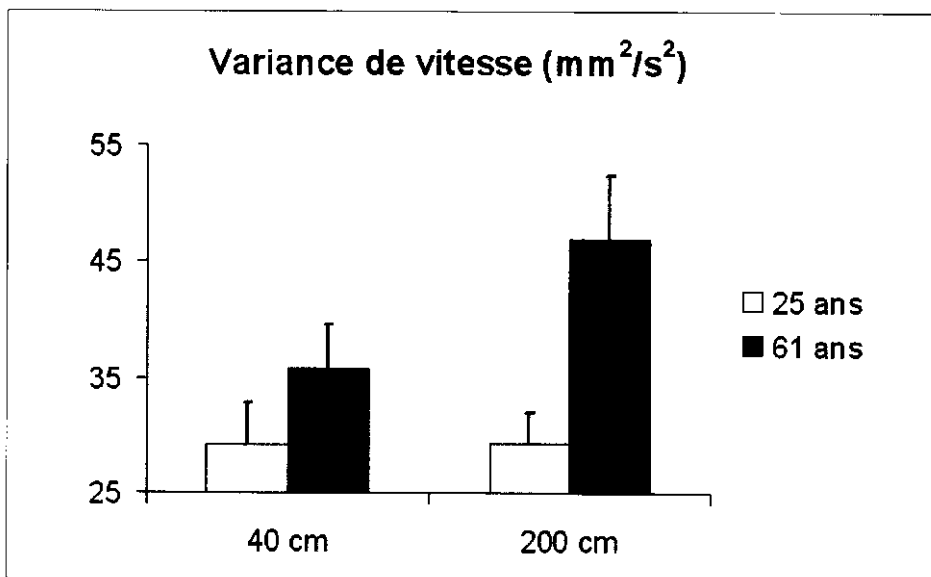


Figure 1. Effet de l'âge sur la variance de vitesse du CdP
 Le groupe de sujets de plus de 60 ans présente une variance de vitesse plus élevée que celle des sujets jeunes et ceci particulièrement en distance lointaine. La valeur de la variance de vitesse est sensible aux variations de la pression exercée par les deux pieds. Nous concluons que les personnes de plus de 60 ans réalisent un maintien de leur posture au détriment d'une activité forte de leurs muscles des membres inférieurs.

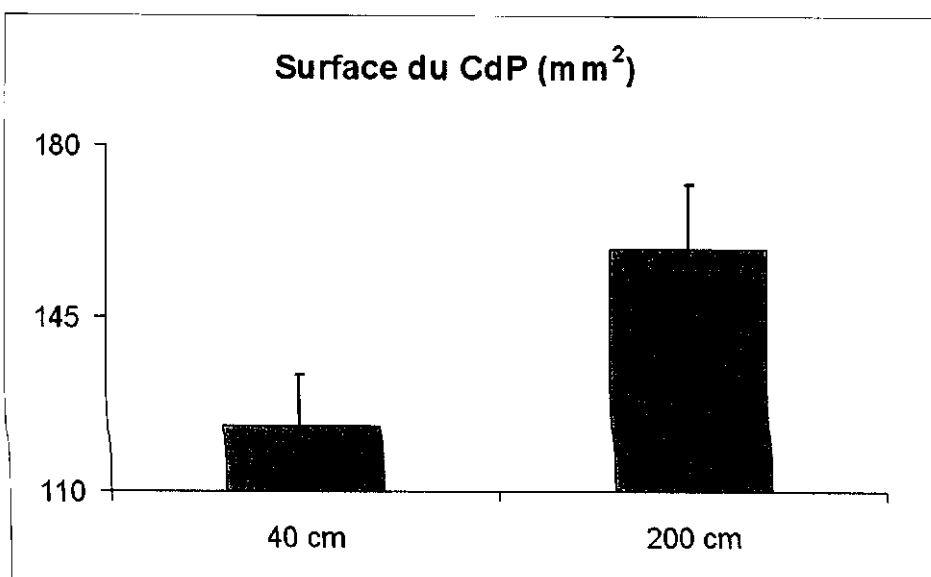


Figure 2. Effet classique de la distance
 En distance lointaine les paramètres posturaux (ici la surface) augmentent de façon significative et ceci quel que soit le groupe d'âge ; que l'on regarde avec les deux yeux ouverts ou avec l'œil directeur ou non directeur ouvert.

VISION BINOCULAIRE VERSUS MONOCULAIRE

La vision binoculaire *versus* monoculaire n'influence pas de façon significative la surface du CdP ni l'écart-type des oscillations latérales. Seul l'écart-type dans le plan antéropostérieur est influencé par la vision binoculaire versus monoculaire ($F_{(2,56)} = 4,79$, $p = 0,011$). Les oscillations antéropostérieures sont plus fortes lorsque les sujets fixent avec leur OND qu'en condition de vision binoculaire ($p = 0,032$), ou qu'avec leur OD ouvert ($p = 0,029$) (Fig. 3). Enfin, il n'y a pas de différence significative entre les 2 conditions monoculaires.

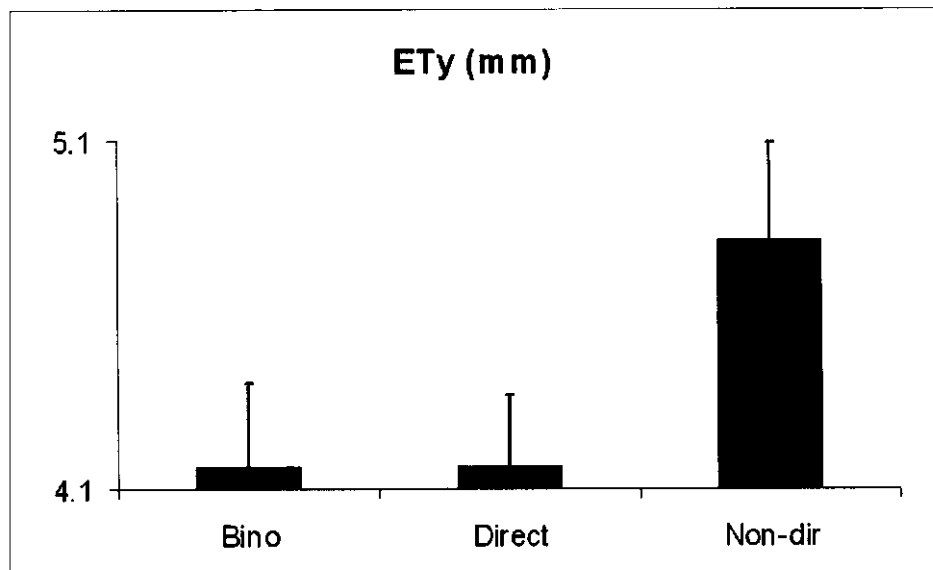


Figure 3. Effet de la vision binoculaire *versus* monoculaire

Les oscillations dans le plan antéropostérieur sont significativement plus fortes avec l'œil non directeur ouvert en comparaison de celles avec l'œil directeur ouvert ou avec les deux yeux ouverts. Ces résultats suggèrent l'importance de l'œil directeur dans le contrôle des oscillations antéropostérieures, qu'il soit ouvert seul ou avec l'autre œil.

INTERACTION DISTANCE ET VISION BINOCULAIRE VERSUS MONOCULAIRE

L'interaction entre la distance avec la vision binoculaire *versus* monoculaire est significative pour la surface du CdP ($F_{(2,56)} = 3,73$, $p = 0,030$) mais reste une tendance pour les ETx ($F_{(2,56)} = 2,55$, $p = 0,087$) et les ETy ($F_{(2,56)} = 2,64$, $p = 0,080$).

La surface du CdP en vision binoculaire est plus grande dans la condition distance lointaine que dans la condition distance proche ($p = 0,0028$). Au contraire, en vision monoculaire, les paramètres posturaux restent peu affectés par la distance (Fig. 4).

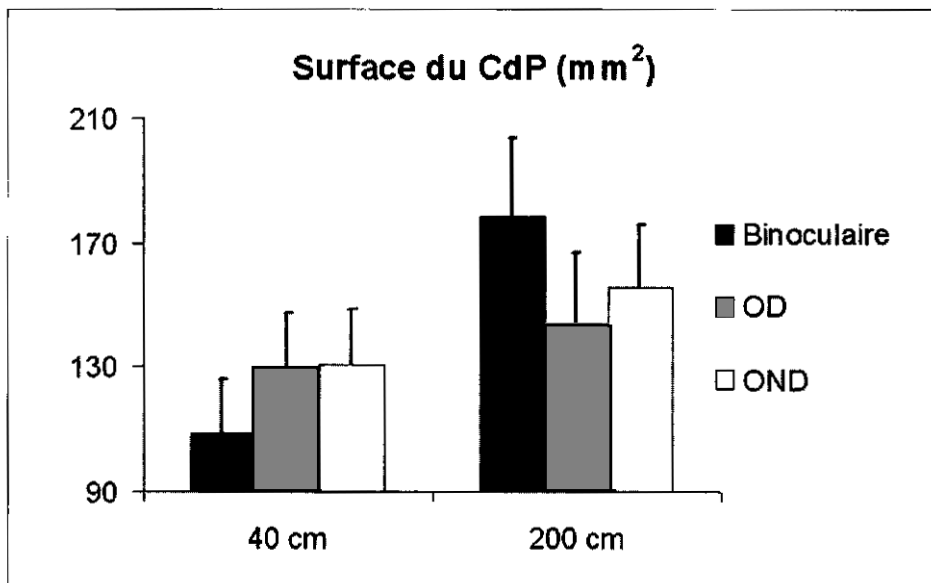


Figure 4. Moyenne chez tous les sujets de la surface du CdP à 40 et à 200 cm avec les 2 yeux ouverts ou avec l'œil directeur (OD) ou non directeur (OND) ouvert
 En vision binoculaire, la surface augmente significativement en distance lointaine. Par contre, en vision monoculaire (OD ou OND ouvert) la surface du CdP varie moins avec la distance.

DISCUSSION

Quatre résultats ont été observés dans cette étude : (i) un effet de l'âge sur la variance de la vitesse pour la distance lointaine ; (ii) un effet robuste de la distance sur plusieurs paramètres, quel que soit l'âge ; (iii) un effet de l'œil directeur sur les écart-types des oscillations antéropostérieures ; (iv) une interaction entre la distance et la vision binoculaire versus monoculaire.

ÂGE

Le groupe de sujets âgés n'a pas présenté de détérioration de la posture en termes d'augmentation de la surface du CdP. Cette absence d'effet de l'âge sur ce paramètre semble en désaccord avec les résultats de Doyle *et al.* (2004) et d'Aufauvre *et al.* (2005). Cependant, ces différences peuvent être expliquées par l'âge. En effet, la moyenne d'âge des groupes de sujets de Doyle *et al.* (2004) et d'Aufauvre *et al.* (2005) est supérieure à 70 ans alors que celle de notre groupe tourne autour de 60 ans.

Les participants sexagénaires ont cependant montré une augmentation de la variance de vitesse par rapport au groupe de sujets jeunes en vision lointaine. La variance de vitesse est liée aux alternances de pression exercées par les 2 membres inférieurs. Plus l'activité des muscles des membres inférieurs

(soléaire, gastrocnémien, tibial antérieur) augmente, plus le CdP change de position (Wang *et al.*, 2006). Des études en électromyographie ont observé une activité des muscles des membres inférieurs plus forte chez les sujets de plus de 60 ans que chez les sujets jeunes durant les tests de posture (Amiridis *et al.*, 2003; Jonsson *et al.*, 2005). Ainsi, il semble que l'accroissement de la variance du CdP soit un signe plus précoce du vieillissement sur la stabilité posturale que celle de la surface du CdP.

DISTANCE

Quel que soit l'âge, la vision proximale a diminué la surface du CdP, les ETy et la variance de vitesse. Ces résultats restent en accord avec ceux de Bles *et al.* (1980), Brandt *et al.* (1986), Paulus *et al.* (1984) et Paulus *et al.* (1989). Dans une précédente étude (Kapoula et Lê, 2006), nous avons reproduit cet accroissement de la stabilité lié à la vision proche (40 cm) chez nos sujets qui fixaient une cible située en distance lointaine (200 cm). Ce résultat a été obtenu par la mise en place d'un prisme convergent (5 Δ) devant chaque œil des sujets. Ces prismes ont augmenté l'angle de convergence de la vision lointaine (1,7°) à une valeur semblable à celle de la vision proche (8,6°). Ce résultat suggère que le bénéfice de la distance proche, en terme de réduction des oscillations posturales, peut impliquer les signaux efférents et afférents issus des muscles extra-oculaires, en activation durant le maintien du haut degré de l'angle de convergence.

ŒIL DIRECTEUR ET OSCILLATIONS ANTÉROPOSTÉRIEURES

Avec l'œil dominant ouvert ou en vision binoculaire, les oscillations antéro-postérieures sont plus faibles que celles avec l'œil non directeur ouvert. Par contre, les oscillations sur ce même plan ne diffèrent pas significativement entre l'œil directeur ouvert et la vision binoculaire. Ainsi on peut se demander si la diminution des oscillations antéro-postérieures en vision binoculaire est liée aux indices binoculaires ou bien au fait de pouvoir utiliser aussi les indices monoculaires avec l'œil directeur ouvert seulement. En d'autres termes, il suffit que l'œil directeur soit ouvert (en vision binoculaire ou monoculaire) pour diminuer de façon notable les oscillations antéro-postérieures en comparaison de l'œil non directeur ouvert. L'absence d'effet de la condition du regard sur le paramètre de la surface est en accord avec les observations d'Isotalo *et al.* (2004).

Les oscillations antéro-postérieures modifient la taille angulaire des objets fixés. Ce changement pourrait être mieux détecté par l'œil directeur que l'œil non directeur. Une étude chez le singe (Fu et Boothe, 2001) a montré une différence des seuils de détection du mouvement dans le plan latéral. Il existerait un œil qui détecterait les mouvements latéraux plus rapidement que l'autre œil. A notre connaissance aucune étude ne s'est penchée sur le même sujet dans le cadre des mouvements en profondeur.

INTERACTION ENTRE LA DISTANCE ET VISION BINOCULAIRE VERSUS MONOCULAIRE

Le résultat majeur de notre étude est l'augmentation de l'instabilité avec la distance mais seulement en vision binoculaire. En vision monoculaire, un tel effet n'a pas été observé. Ce résultat semble surprenant puisque les indices visuels sont plus riches en vision binoculaire qu'en vision monoculaire. Par exemple, McKnight *et al.* (1991) ont observé une meilleure acuité visuelle et une meilleure perception de la profondeur en vision binoculaire que monoculaire.

Les oscillations antéropostérieures produisent un mouvement visuel en profondeur. La détection (ou la sensibilité) de ces oscillations est basée sur la disparité binoculaire. Les oscillations latérales entraînent un mouvement visuel en latéralité. La sensibilité à ces oscillations est possible autant en vision binoculaire que monoculaire. La sensibilité à ces deux types de mouvements diminue avec la distance. Cependant, pour des raisons géométriques, la perte de sensibilité basée sur les indices de disparité binoculaire est plus forte en comparaison de celle sur les mouvements visuels latéraux.

Des facteurs cognitifs pourraient aussi expliquer les résultats obtenus. Plusieurs études ont observé une amélioration de la stabilité posturale lorsque des tâches cognitives, telle que la discrimination spatiale (Dault *et al.*, 2001), la répétition vocale avec mémorisation ou non des mots formés par ces lettres (Dault *et al.*, 2001 ; Dault *et al.*, 2003), était ajoutée à la posture. L'attention et la mémoire de travail impliquées par ces tâches seraient responsables de la diminution des excursions du CdP. Un contexte émotionnel élevé, provoqué par la peur de chuter d'une plate-forme mobile aux mouvements imprévisibles ou par le placement au bord d'une rampe en hauteur (Adkin *et al.*, 2002 ; Carpenter *et al.*, 2004) modifie la stratégie du contrôle de la posture. Le sujet produit alors des oscillations plus serrées. Dans notre étude, lorsque la distance de fixation augmente et que les informations visuelles diminuent (vision monoculaire) les sujets pourraient par analogie adopter une stratégie de posture plus rigide. Au contraire, lorsque les sujets sont en vision binoculaire, ils ne se sentent pas en difficulté et ne contrôlent pas de façon aussi intentionnelle leurs oscillations posturales.

En conclusion, la présente étude montre une diminution de la stabilité posturale avec la distance lointaine seulement en vision binoculaire. Cette détérioration peut être attribuée à la réduction de la sensibilité avec la distance qui est plus forte lorsqu'elle est basée sur les indices de disparité binoculaires que sur les indices des mouvements latéraux. Sinon, des facteurs attentionnels pourraient intervenir dans le contrôle d'une posture plus rigide en vision monoculaire.

RÉSUMÉ

Nous avons comparé la stabilité posturale enregistrée en vision binoculaire *versus* monoculaire (œil directeur « OD » ou œil non-directeur « OND » ouvert) à 2 distances différentes (40 et 200 cm) chez des sujets jeunes et

âgés. En distance proche la posture est plus stable qu'en distance lointaine. En vision binoculaire ou avec l'OD ouvert les oscillations dans le sens antéro-postérieur « AP » sont réduites en comparaison de celles enregistrées avec l'OND ouvert. Les sujets âgés présentent une augmentation de la variance de vitesse du centre de pression. Enfin, la stabilité de la posture se détériore avec la distance seulement en vision binoculaire. Ces résultats peuvent être expliqués par la détection des oscillations et par des facteurs attentionnels. Pour des raisons géométriques, la détection des oscillations AP basée sur la disparité binoculaire baisse plus rapidement avec la distance que celle des oscillations latérales. Cette diminution peut être source d'instabilité en vision binoculaire. Enfin, la diminution des indices visuels en vision monoculaire combinée à la fixation de loin peut entraîner un changement du mode de contrôle de la posture la rendant plus rigide.

BIBLIOGRAPHIE

- Adkin, A.L., Frank, J.S., Carpenter, M.G., Peysar, G.W. (2002). Fear of falling modifies anticipatory postural control. *Exp Brain Res*, 143: 160-170.
- Amiridis, I.G., Hatzitaki, V., Arabatzi, F. (2003). Age-induced modifications of static postural control in humans. *Neurosci Lett*, 350: 137-140.
- Aufauvre, V., Kemoun, G., Carette, P., Bergeal, E. (2005). Evaluation posturale à domicile chez la personne âgée: comparaison chuteurs-non chuteurs. *Ann Readapt Med Phys*, 48: 165-171.
- Bles, W., Kapteyn, T.S., Brand, T., Arnold, F. (1980). The mechanism of physiological height vertigo. II. Posturography. *Acta Otolaryngol*, 89: 534-540.
- Brandt, T., Paulus, W., Straube, A. (1986). Vision and posture. In Bles, W., Brandt, T. (Eds), *Disorders of posture*, (pp. 157-175). Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, New York, Oxford.
- Carpenter, M.G., Frank, J.S., Adkin, A.L., Paton, A., Allum, J.H. (2004). Influence of postural anxiety on postural reactions to multi-directional surface rotations. *J Neurophysiol*, 92: 3255-3265.
- Corriveau, H., Hebert, R., Prince, F., Raiche, M. (2001). Postural control in the elderly: an analysis of test-retest and interrater reliability of the COP-COM variable. *Arch Phys Med Rehabil*, 82: 80-85.
- Corriveau, H., Hebert, R., Raiche, M., Dubois, M.F., Prince, F. (2004a). Postural stability in the elderly: empirical confirmation of a theoretical model. *Arch Gerontol Geriatr*, 39: 163-177.
- Corriveau, H., Hebert, R., Raiche, M., Prince, F. (2004b). Evaluation of postural stability in the elderly with stroke. *Arch Phys Med Rehabil*, 85: 1095-1101.
- Dault, M.C., Frank, J.S., Allard, F. (2001). Influence of a visuo-spatial, verbal and central executive working memory task on postural control. *Gait Posture*, 14: 110-116.
- Dault, M.C., Yardley, L., Frank, J.S. (2003). Does articulation contribute to modifications of postural control during dual-task paradigms? *Brain Res Cogn Brain Res*, 16: 434-440.

-
- Doyle, T.L., Dugan, E.L., Humphries, B., Newton, R.U. (2004). Discriminating between elderly and young using a fractal dimension analysis of centre of pressure. *Int J Med Sci*, 1: 11-20.
- Fox, C.R. (1990). Some visual influences on human postural equilibrium: binocular versus monocular fixation. *Percept Psychophys*, 47: 409-422.
- Fu, L.N., Boothe, R.G. (2001). A psychophysical measurement and analysis of motion perception in normal and binocularly deprived monkeys. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 42: 2547-2553.
- Gagey, P.M., Weber, B. (1999). Stabilométrie. In Masson (Ed.), *Posturologie: régulation et dérèglements de la station debout*, (pp. 45-59). Paris
- Isotalo, E., Kapoula, Z., Feret, P.H., Gauchon, K., Zamfirescu, F., Gagey, P.M. (2004). Monocular versus binocular vision in postural control. *Auris Nasus Larynx*, 31: 11-17.
- Ivers, R.Q., Mitchell, P., Cumming, R.G. (2000). Visual function tests, eye disease and symptoms of visual disability: a population-based assessment. *Clin Experiment Ophthalmol*, 28: 41-47.
- Jonsson, E., Seiger, A., Hirschfeld, H. (2005). Postural steadiness and weight distribution during tandem stance in healthy young and elderly adults. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 20: 202-208.
- Kapoula, Z., Lê, T.T. (2006). Effects of distance and gaze position on postural stability in young and old subjects. *Exp Brain Res*, 173: 438-445.
- Laitinen, A., Koskinen, S., Harkanen, T., Reunanen, A., Laatikainen, L., Aromaa, A. (2005). A nationwide population-based survey on visual acuity, near vision, and self-reported visual function in the adult population in Finland. *Ophthalmology*, 112: 2227-2237.
- McKnight, A.J., Shinar, D., Hilburn, B. (1991). The visual and driving performance of monocular and binocular heavy-duty truck drivers. *Accid Anal Prev*, 23: 225-237.
- Paulus, W., Straube, A., Krafczyk, S., Brandt, T. (1989). Differential effects of retinal target displacement, changing size and changing disparity in the control of anterior/posterior and lateral body sway. *Exp Brain Res*, 78: 243-252.
- Paulus, W., Straube, A., Brandt, T. (1984) Visual stabilization of posture. Physiological stimulus characteristics and clinical aspects. *Brain*, 107(Pt 4): 1143-1163.
- Wang, Y., Zatsiorsky, V.M., Latash, M.L. (2006). Muscle synergies involved in preparation to a step made under the self-paced and reaction time instructions. *Clin Neurophysiol*, 117: 41-56.
- Zaroff, C.M., Knutelska, M., Frumkes, T.E. (2003). Variation in stereoacuity: normative description, fixation disparity, and the roles of aging and gender. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 44: 891-900.
-

L'EFFET DE LA DISTANCE SUR LE QUOTIENT DE ROMBERG

INTRODUCTION

Le contrôle de la posture se base sur plusieurs entrées sensorielles (visuelles, vestibulaires, proprioceptives et somatosensorielles). L'influence de la vision sur la stabilité posturale a été mesurée pour la première fois par Moritz Heinrich Romberg (1795-1873) avec le test qui porte le même nom. Il consiste à comparer la stabilité de la posture en position érigée et stable dans les conditions les yeux ouverts *versus* fermés (Gagey et Weber, 1999). Généralement la posture est plus instable les yeux fermés que ouverts; le ratio de la surface d'oscillations du centre de pression du corps entre ces deux conditions est de l'ordre de 2,5 (le quotient de Romberg).

Nous avons recensé le quotient de Romberg de différentes études mesurant la posture en condition yeux ouverts et yeux fermés auprès de populations saines, jeunes ou âgées (Bles *et al.*, 1980; Paulus *et al.*, 1984; Brandt *et al.*, 1986; Paulus *et al.*, 1989; Gerr *et al.*, 2000; Ouaknine *et al.*, 2004; Bryant *et al.*, 2005). Les quotients sont très variables et différent de la valeur de 2,5. Pour quelles raisons le quotient de Romberg varie-t-il d'une étude à l'autre? Notre hypothèse est que la distance utilisée pourrait être responsable de ces différences. En effet, des travaux préalables ont montré une détérioration de la stabilité du corps lorsque la distance entre le sujet et la cible fixée augmentait (Bles *et al.*, 1980; Paulus *et al.*, 1984; Brandt *et al.*, 1986; Paulus *et al.*, 1989; Kapoula et Le, 2006). A notre connaissance, aucune étude n'a examiné l'influence de la distance sur le quotient de Romberg. Un deuxième facteur est l'âge, étudié par Blaszczyk *et al.* (2000), Doyle *et al.* (2004), Bosek *et al.* (2005).

1. Groupe IRIS, CNRS-UMR 7152, Collège de France, 11 Place Marcelin Berthelot, 75005 Paris.

Ces auteurs ont présenté des quotients supérieurs chez les sujets âgés (par exemple 1,15 *versus* 1,08 dans Blaszczyk *et al.*, 2000), mais ces différences restent faibles.

Le but principal de notre étude est d'examiner le rôle de la distance sur les éventuelles variations du quotient de Romberg chez des populations de différents âges. Si le test de Romberg reflète uniquement le rôle de la vision sur la stabilisation du corps, le quotient de Romberg devrait être supérieur à 1 quelle que soit la distance. Notre hypothèse alternative est la suivante : la différence en termes de stabilité posturale entre les yeux ouverts *versus* fermés pourrait être due non seulement à la vision mais aussi aux signaux oculomoteurs liés à l'angle de convergence (l'angle des axes visuels). Dans une étude précédente (Kapoula et Lê, 2006), nous avons montré l'implication des signaux oculomoteurs dans le contrôle de la posture. Avec des prismes convergents insérés devant les yeux (5 dioptries), nous avons provoqué une augmentation de l'angle de convergence qui a entraîné une amélioration de la stabilité posturale. Avec la fermeture des yeux ou dans le noir, l'angle de convergence doit probablement se modifier. Par ailleurs, il est fort probable que la modification de la convergence entre les yeux ouverts et fermés soit d'autant plus grande lorsque la distance de fixation est d'autant plus proche (angle de convergence requis élevé). En effet, avec la fermeture des paupières, les axes visuels se mettent en position parallèle voire en exo-déviations (Takagi *et al.*, 1992).

Dans une première expérience, nous avons comparé le quotient de Romberg chez une population d'adultes jeunes (25,3 ans) avec une population d'adultes plus âgés (61,4 ans) ; et ceci à deux distances, 40 et 200 cm. Dans une seconde étude, nous avons étudié à nouveau le quotient de Romberg (lumière, *versus* obscurité) avec des sujets jeunes seulement, mais cette fois avec un continuum de plusieurs distances (20, 40, 90, 200 et 350 cm). De surcroît nous avons enregistré les mouvements des yeux et l'angle de convergence durant le test de Romberg.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

SUJETS

Pour la première expérience, 18 sujets de moyenne d'âge $25,3 \pm 2,7$ ans et 17 sujets de moyenne d'âge $61,6 \pm 4,4$ ans ont participé à l'étude. Quinze autres sujets de moyenne d'âge $26,7 \pm 5,5$ ans ont participé à la seconde étude. Le questionnaire utilisé au préalable confirmait que tous les sujets ne présentaient pas de trouble neurologique et qu'aucun ne suivait de traitements médicaux.

PLATE-FORME

Nous avons utilisé une plate-forme de force composée de sabots dynamométriques, un pour chaque pied (Posturewin, *TechnoConcept*, Céreste, France). Les excursions du centre de pression « CdP » sont enregistrées durant 51,2 s. La plate-forme de posturographie est équipée d'un convertisseur analogique digital (16 bits) et la fréquence d'acquisition est de 40 Hz.

VIDÉO-OCULOMÈTRE

Dans la seconde étude, nous avons utilisé le vidéo-oculomètre Chronos Skalar (50 Hz) permettant d'enregistrer l'angle de convergence. Le système est équipé de caméras infrarouges qui permettent des acquisitions dans le noir.

PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Les sujets étaient placés sur la plate-forme et devaient garder une position érigée, statique (position standard de Romberg, 5 cm de distance entre les 2 talons et un angle d'écartement entre les 2 gros orteils de 30°) devant un écran placé à 40 ou à 200 cm. Les sujets devaient fixer une cible au centre de l'écran au niveau des yeux. La cible consiste en une lettre « X » de taille angulaire d'1 degré placée entre 2 segments verticaux de taille angulaire de 0,29° ; et ceci quelle que soit la distance utilisée (40 ou 200 cm). Durant l'enregistrement posturographique, la consigne donnée aux participants était de fixer la lettre « X ».

Pour chacune des 2 distances, le sujet devait fixer la cible les yeux ouverts puis les yeux fermés (Gagey et Weber, 1999). L'ordre des distances était contrebalancé entre les sujets.

Pour la seconde étude, cinq distances étaient testées : 20, 40, 90, 200 et 350 cm. Pour chacune de ces distances, le sujet devait fixer la cible à la lumière

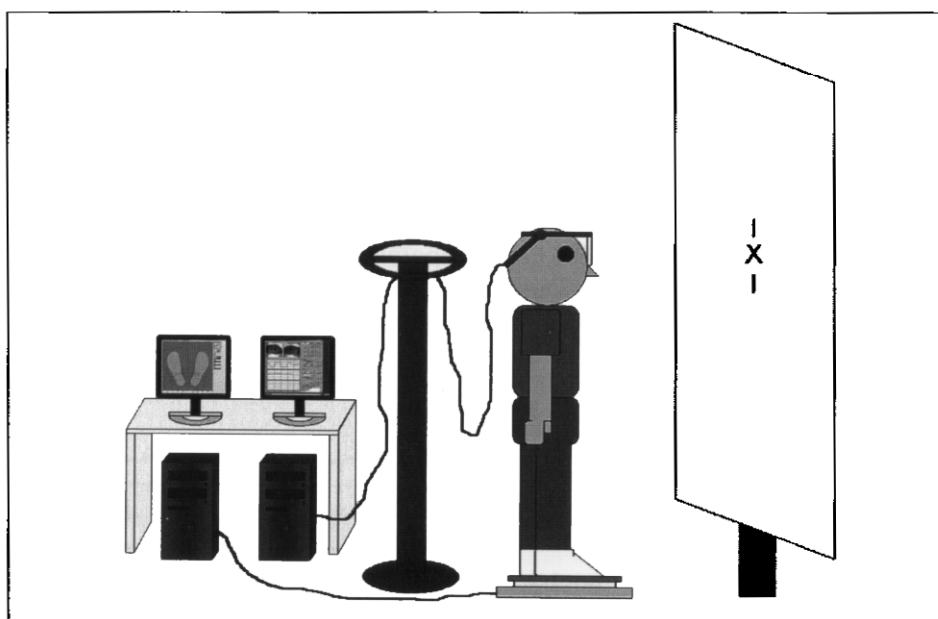


Figure 1. Dispositif expérimental de la seconde expérience

Le sujet est debout sur la plate-forme de force connectée à un ordinateur. En position érigée et statique, le sujet fixe la cible placée au niveau de son regard. Les mouvements binoculaires du sujet sont enregistrés par un vidéo-oculomètre posé sur sa tête et connecté lui aussi à un ordinateur. Notons que le poids du câble du vidéo-oculomètre a été atténué par un poteau positionné verticalement. Suffisamment de lest a été laissé pour que le poteau n'atténue pas les oscillations corporelles. Le dispositif de la première expérience reste semblable au second hormis l'absence du vidéo-oculomètre.

ou dans le noir avec le vidéo-oculomètre installé sur la tête du sujet (Fig. 1). L'ordre des distances était contrebalancé entre les sujets et, pour chaque distance, l'ordre des conditions lumière *versus* noir était aussi contrebalancé.

PARAMÈTRES POSTUROGRAPHIQUES

Nous avons analysé la surface des déplacements du CdP, les écart-types des oscillations latérales (ETx) et antéro-postérieures (ETy), et la variance de vitesse du CdP. La surface du CdP recouvre 90 % des positions instantanées du CdP les plus proches de la position moyenne (Gagey et Weber, 1999).

ACQUISITION DES MOUVEMENTS BINOCULAIRES

A partir des signaux calibrés de chaque œil, nous avons calculé l'angle de convergence correspondant à la différence de la position de l'œil gauche et celle de l'œil droit (Fig. 2). Dix mesures de l'angle de convergence ont été effectuées pour chaque enregistrement : une mesure 3 secondes avant la fin de l'acquisition posturographique et une mesure toutes les 5 secondes dans le sens rétrograde. De ces dix mesures était calculé l'angle de vergence moyen pour chaque condition posturographique.

ANALYSE STATISTIQUE

Dans la première étude, une analyse de variance est réalisée sur les paramètres posturographiques comprenant un facteur intra-individuel, la distance (40 et 200 cm), et un facteur inter-individuel, le groupe d'âge (jeune *versus* âgé). Pour la seconde étude, une ANOVA à un seul facteur, la distance (20, 40, 90, 200 et 350 cm), est effectuée. Quant à l'angle de convergence, une ANOVA à 2 facteurs intra-individuels : la distance (20, 40, 90, 200 et 350 cm) et la lumière *versus* noir est réalisée. Les comparaisons *a posteriori* ont été réalisées avec le test de plus petite différence significative de Fisher ; l'effet d'un facteur est significatif si la valeur du « p » qui lui est associé est inférieure ou égale à 0,05.

RÉSULTATS

MESURES POSTURALES DE L'EXPÉRIENCE 1

Distance

L'effet de la distance est significatif sur le quotient de Romberg pour la plupart des paramètres étudiés, la surface du CdP ($F_{(1,33)} = 12,7$, $p = 0,001$), l'ETx ($F_{(1,33)} = 17,1$, $p = 0,0002$) et l'ETy ($F_{(1,33)} = 9,11$, $p = 0,005$). Le quotient de Romberg est significativement plus élevé à 40 cm qu'à 200 cm (Fig. 3).

Âge

L'âge ne présente pas d'effet notable sur le quotient de Romberg et l'interaction avec la distance n'est pas significative.

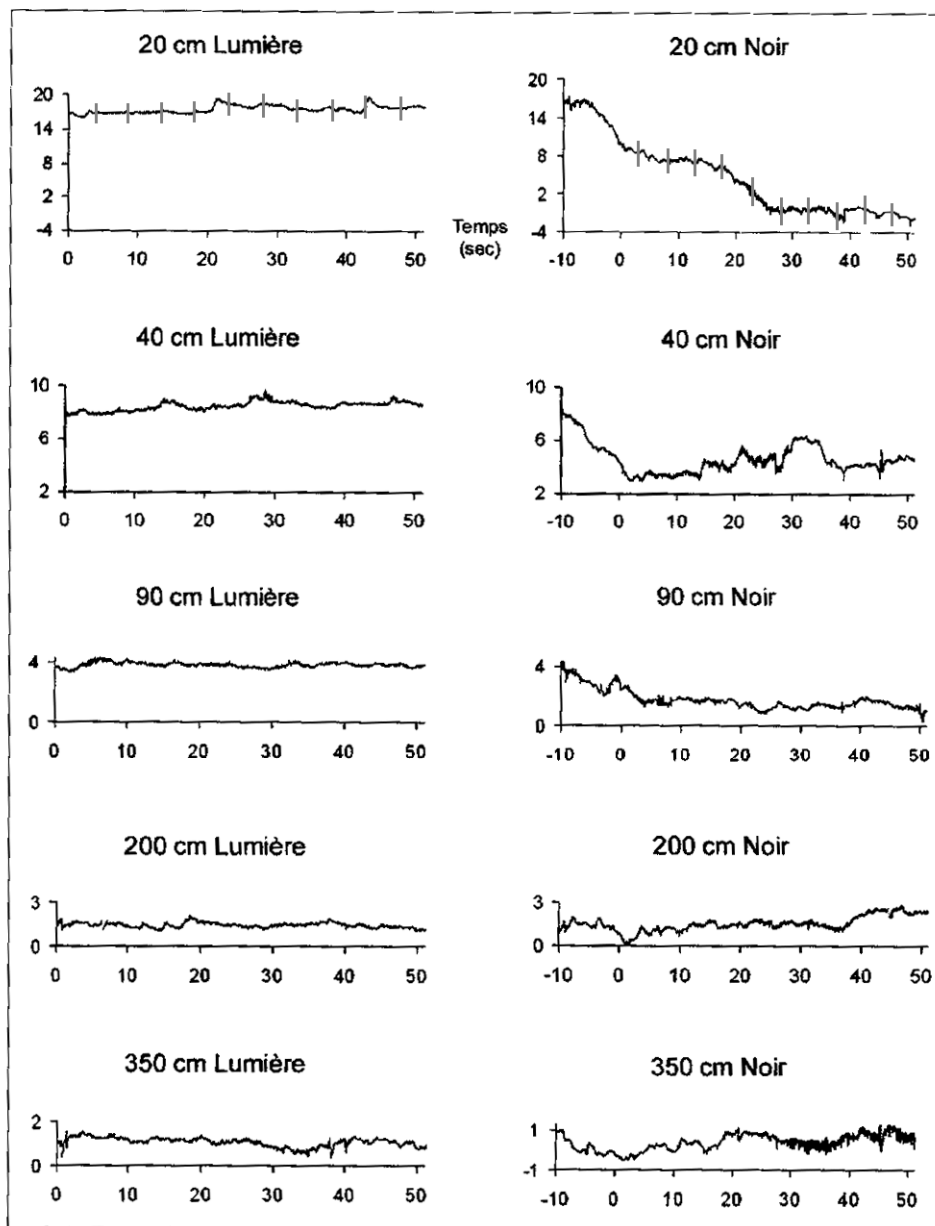


Figure 2. Évolution de l'angle de convergence durant les enregistrements posturographiques

L'acquisition de la posture démarre à zéro sec sur l'échelle des temps. Une mesure de l'angle ($^{\circ}$) est réalisée 3 s avant la fin de l'acquisition posturographique et toutes les 5 secondes dans le sens rétrograde (barres verticales en pointillé). Le haut degré de convergence à 20 et à 40 cm n'est pas maintenu dans le noir. L'angle de convergence diminue de façon progressive dans ces conditions. Pour les distances lointaines (90, 200 et 350 cm) l'angle de convergence diffère peu entre la condition lumière *versus* noir.

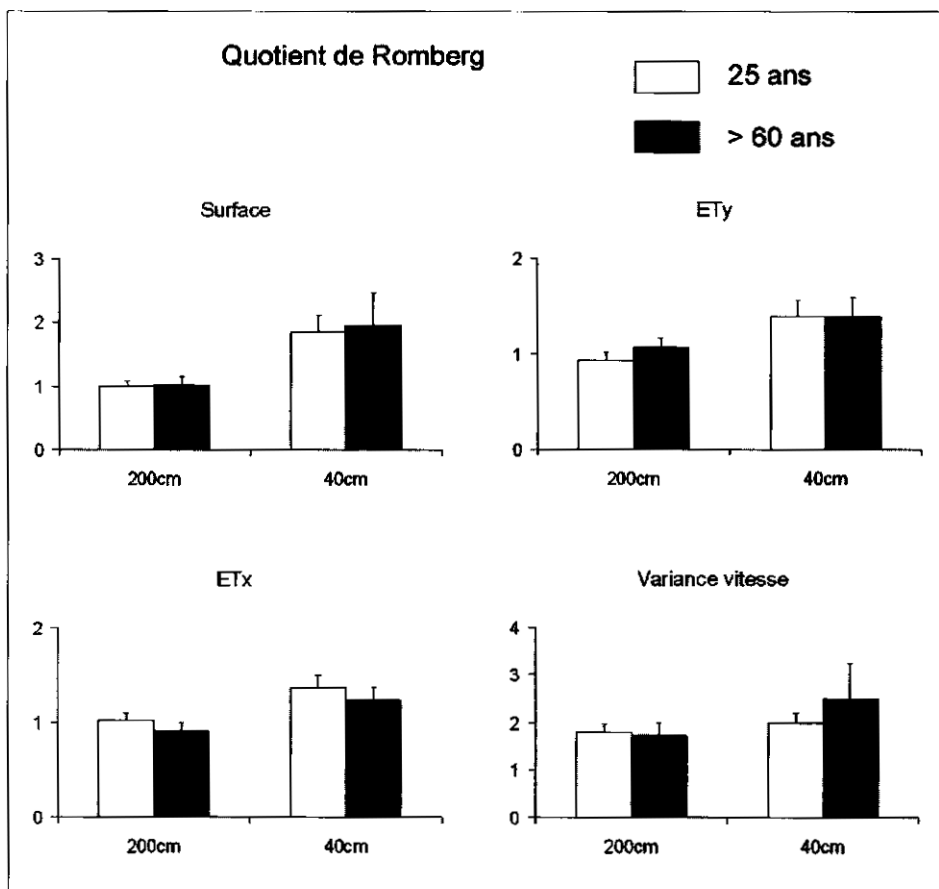


Figure 3. Quotient de Romberg de la surface du CdP, des écart-types des oscillations latérales (ETx) et antéropostérieures (ETy) et de la variance de vitesse chez les sujets jeunes et âgés à 40 et à 200 cm

Le quotient de Romberg est significativement supérieur à 40 cm qu'à 200 cm quel que soit le groupe d'âge considéré.

MESURES POSTURALES DE L'EXPÉRIENCE 2

Encore une fois, l'effet de la distance est significatif sur le quotient de Romberg pour tous les paramètres étudiés, la surface du CdP ($F_{(4,56)} = 4,8$, $p = 0,0022$), l'ETx ($F_{(4,56)} = 2,7$, $p = 0,041$), l'ETy ($F_{(4,56)} = 5,2$, $p = 0,0012$) et la variance de vitesse ($F_{(4,56)} = 3,4$, $p = 0,015$). Le quotient de Romberg est significativement plus élevé pour les distances proches (20 et 40 cm) que celui pour les distances lointaines (90, 200 et 350 cm, cf. Fig. 4).

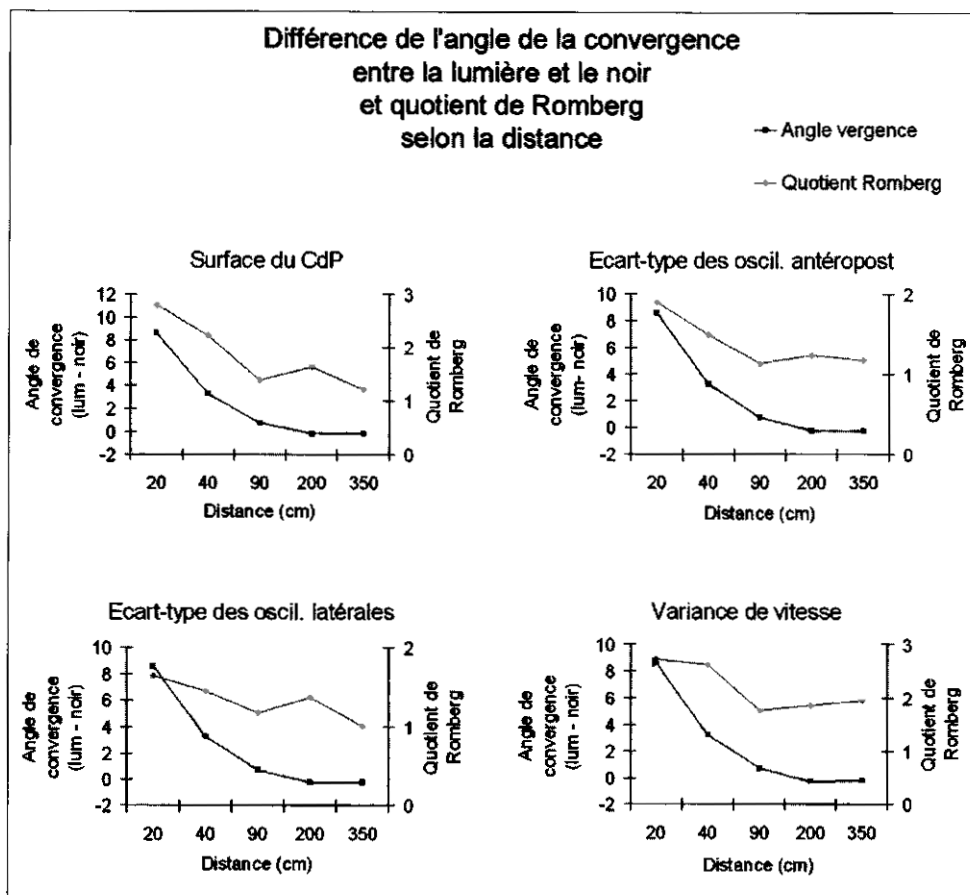


Figure 4. Différence de l'angle de convergence à la lumière et dans le noir
 Cette différence diminue avec l'augmentation de la distance. Cette diminution co-varie avec celle du quotient de Romberg, quel que soit le paramètre considéré.

MESURES DE L'ANGLE DE LA VERGENCE DE L'EXPÉRIENCE 2

Les tracés d'un participant sont présentés dans la figure 2, l'angle de convergence en distance proche (20 et 40 cm) diminue progressivement dans le noir. La figure 4 représente les valeurs moyennes du groupe de la différence de l'angle de convergence (lumière - noir) et du quotient de Romberg (noir/lumière) selon la distance. L'angle de convergence est sensiblement plus faible dans le noir que dans la lumière pour les distances proches. L'ANOVA appliquée sur les valeurs moyennes de la vergence (au cours de la période d'enregistrement de 51,2 s) montre une interaction significative entre la distance et la lumière/noir ($F_{(4,52)} = 49,1, p < 10^{-6}$). L'angle de vergence moyen pour les distances proches (20 et 40 cm) est très différent entre les conditions lumière/noir (Fisher: $p < 10^{-6}$ à 20 cm et $p < 10^{-5}$ à 40 cm). Au contraire, pour

les distances à partir de 90 cm, l'angle de vergence moyen est similaire quelle que soit la condition. Ainsi, la valeur du quotient de Romberg co-varie avec celle de la différence de l'angle de convergence entre le noir et la lumière. Plus la différence de l'angle est grande, plus le quotient augmente (Fig. 4).

DISCUSSION

Le quotient de Romberg à 40 cm est proche de 2 alors qu'à 200 cm il chute à la valeur 1. Ceci indique que l'interprétation du quotient de Romberg en termes de bénéfice de la vision n'est pas absolue. Les différences des yeux ouverts entre vision de près et de loin peuvent être imputées à la variation de l'angle de convergence. En effet, à 40 cm l'angle est de $8,6^\circ$ alors qu'à 200 cm il est de $1,7^\circ$, alors qu'avec les yeux fermés l'angle de convergence de $8,6^\circ$ à 40 cm n'est pas maintenu.

Les enregistrements oculographiques de l'expérience 2 ont montré une modification importante de l'angle de convergence des yeux en distance proche lorsque les sujets se retrouvaient dans le noir : on observe en effet une perte de l'angle de convergence requis pour les distances proches (20 et 40 cm). Pour les distances lointaines (90, 200 et 350 cm), l'angle de convergence requis en lumière étant faible (respectivement $3,8^\circ$; $1,7^\circ$ et 1°), il n'y a pas de modification majeure lorsque le sujet est mis dans le noir. Le quotient de Romberg est proche de 2 pour les distances proches (20 et 40 cm) alors qu'il chute à 1 pour les trois plus longues distances (90, 200, 350 cm).

Comme le montre la figure 2, dans le noir le début de la perte de la convergence était rapide (<10 sec) et cette perte continuait progressivement jusqu'à des valeurs d'angle de 2-3 degrés. Ainsi donc, il se produit un mouvement lent de relâchement de la convergence ou de divergence des yeux dans le noir. A notre connaissance, il n'existe pas d'études sur l'effet des mouvements de divergence sur la stabilité posturale. Ce mouvement lent de divergence relative (Fig. 2) peut, lui aussi, être source d'instabilité posturale. En effet, une récente étude a montré le caractère déstabilisateur du mouvement lent de la poursuite oculaire sur la posture (Glasauer *et al.*, 2005)

En conclusion : l'idée largement admise selon laquelle le test de Romberg indique le bénéfice de la vision est mise en doute par nos résultats. La présente étude fait apparaître un autre mécanisme, à savoir l'importance des signaux oculomoteurs efférents ou afférents liés au contrôle de la convergence oculomotrice selon la distance.

Les résultats n'infirment pas le rôle de la vision sur la stabilité posturale mais le limitent à la vision proche qui, de surcroît, serait couplée avec les signaux oculomoteurs en rapport avec le contrôle de la convergence.

Comme mentionné dans l'introduction, Kapoula et Lê (2006) ont montré le rôle de la convergence dans le contrôle postural. André-Deshays *et al.* (1988 ; 1991) ont montré l'existence de couplages entre les commandes oculomotrices et l'activation des muscles du cou ; ces derniers sont un centre majeur de la proprioception et donc très important pour le contrôle de la posture. Peut-être ce couplage est-il encore plus fort pour la convergence des yeux que pour le

regard latéral. Des études sur le couplage de la convergence et de l'activité des muscles du cou sont à faire.

Quant à la vision lointaine, il est possible que son rôle soit diminué, d'une part à cause de la faiblesse de la taille angulaire des signaux visuels (glissement rétinien, cf. Brandt *et al.*, 1986 ; parallaxe, cf. Guerraz *et al.* 2000) et, d'autre part, à cause de la faiblesse des signaux oculomoteurs de convergence (Kapoula et Lê, 2006). Ainsi, en distance lointaine, le système nerveux central régulerait la posture davantage sur la base des autres sources d'information (vestibulaires, proprioceptives, somesthésique) que sur la vision. Il y aurait donc un mode de régulation différent selon la distance qui correspondrait à l'utilisation des différentes sources d'information.

En conclusion, l'étude du quotient de Romberg selon la distance apporte un nouvel éclairage sur la manière dont le système nerveux central contrôle la posture selon les différentes distances, et sur le rôle de la vision. Les études cliniques qui mesurent le QR devraient tenir compte du paramètre de distance pour déterminer d'éventuelles anomalies.

RÉSUMÉ

Le test de Romberg montre généralement l'effet stabilisateur de la vision sur la posture et le quotient de Romberg (QR) est de 2,5 environ. Nous avons examiné le rôle de l'angle de convergence sur ce quotient. Nous avons mesuré la stabilité posturale à l'aide d'une plate-forme de posturographie chez 18 sujets jeunes (25,3 ans) et 17 sujets âgés (61,6 ans). Ils ont eu comme instruction de fixer une cible à 40 ou à 200 cm. Le QR était de 2 à 40 cm mais chute à 1 à 200 cm. Dans une seconde expérience, 15 sujets (26,7 ans) ont repassé le même test mais cette fois les conditions étaient lumière *versus* obscurité, 5 distances étaient testées (20, 40, 90, 200 et 350 cm) et l'angle de convergence était mesuré avec un vidéo-oculomètre. Le QR à 20 et à 40 cm était proche de 2 et, encore une fois, il chutait à 1 pour les distances plus grandes (90, 200 et 350 cm). En parallèle, l'écart de l'angle de convergence entre la lumière *versus* le noir est significativement plus fort pour les distances proches (20 et 40 cm) que pour ceux des distances lointaines (90, 200 et 350 cm). Ainsi, le QR co-varie avec l'écart de l'angle de convergence entre la lumière et le noir. Relative à l'idée largement admise selon laquelle le QR signale le bénéfice de la vision, cette étude apporte un certain doute sur une telle interprétation ; en distance proche les signaux relatifs à la perte de l'angle de convergence dans le noir seraient source d'instabilité.

BIBLIOGRAPHIE

- André-Deshays, C., Berthoz, A., Revel, M. (1988). Eye-head coupling in humans. I. Simultaneous recording of isolated motor units in dorsal neck muscles and horizontal eye movements. *Exp Brain Res*, 69: 399-406.
- André-Deshays, C., Revel, M., Berthoz, A. (1991). Eye-head coupling in humans. II. Phasic components. *Exp Brain Res*, 84: 359-366.

-
- Blaszczyk, J.W., Prince, F., Raiche, M., Hebert, R. (2000). Effect of ageing and vision on limb load asymmetry during quiet stance. *J Biomech*, 33: 1243-1248.
- Bles, W., Kapteyn, T.S., Brandt, T., Arnold, F. (1980). The mechanism of physiological height vertigo. II. Posturography. *Acta Otolaryngol*, 89: 534-540.
- Bosek, M., Grzegorzewski, B., Kowalczyk, A., Lubinski, I. (2005). Degradation of postural control system as a consequence of Parkinson's disease and ageing. *Neurosci Lett*, 376: 215-220.
- Brandt, T., Paulus, W., Straube, A. (1986). Vision and posture. In Bles, W., Brandt, T. (Eds), *Disorders of posture*, (pp. 157-175). Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, New York, Oxford.
- Bryant, E.C., Trew, M.E., Bruce, A.M., Kuisma, R.M., Smith, A.W. (2005). Gender differences in balance performance at the time of retirement. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 20: 330-335.
- Doyle, T.L., Dugan, E.L., Humphries, B., Newton, R.U. (2004). Discriminating between elderly and young using a fractal dimension analysis of centre of pressure. *Int J Med Sci*, 1: 11-20.
- Gagey, P.M., Weber, B. (1999). Stabilométrie. In Masson (Ed.), *Posturologie: régulation et dérèglements de la station debout*, (pp 45-59). Paris.
- Gerr, F., Letz, R., Green, R.C. (2000). Relationships between quantitative measures and neurologist's clinical rating of tremor and standing steadiness in two epidemiological studies. *Neurotoxicology*, 21: 753-760.
- Glasauer, S., Schneider, E., Jahn, K., Strupp, M., Brandt, T. (2005). How the eyes move the body. *Neurology*, 65: 1291-1293.
- Guerraz, M., Sakellari, V., Burchill, P., Bronstein, A.M. (2000). Influence of motion parallax in the control of spontaneous body sway. *Exp Brain Res*, 131: 244-252.
- Kapoula, Z., Lê, T.T. (2006). Effects of distance and gaze position on postural stability in young and old subjects. *Exp Brain Res*, 173: 438-445.
- Ouaknine, M., Hugon, M., Roman, S., Thomassin, J.M., Sarabian, N., Regis, J. (2004). Effets posturaux du traitement par gamma knife des neurinomes de l'acoustique (schwannomes vestibulaires). *Neurochirurgie*, 50: 358-366.
- Paulus, W., Straube, A., Krafczy, K., Brandt, T. (1989). Differential effects of retinal target displacement, changing size and changing disparity in the control of anterior/posterior and lateral body sway. *Exp Brain Res*, 78: 243-252.
- Paulus, W., Straube, A., Brandt, T. (1984). Visual stabilization of posture. Physiological stimulus characteristics and clinical aspects. *Brain*, 107(Pt 4): 1143-1163.
- Takagi, M., Abe, H., Hasegawa, S., Usui, T. (1992). Reconsideration of Bell's phenomenon using a magnetic search coil method. *Doc Ophthalmol*, 80: 343-352.