



## AVERTISSEMENT

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

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

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

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

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

**UNIVERSITE HENRI POINCARÉ, NANCY 1**

**Ecole Doctorale « Biologie – Santé – Environnement »**

**THESE**

présentée et soutenue publiquement par

**Alexandre VOURIOT**  
INSERM ERI 11 [EP]<sup>2</sup>R

en vue de l'obtention du

**DOCTORAT D'UNIVERSITE**  
**Mention Neurosciences**

**S.C.D. - U.H.P. NANCY 1**  
**BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES**  
Rue du Jardin Botanique - BP 11  
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

IDENTIFICATION DE FACTEURS POSTURAUX  
INDIVIDUELS ET ENVIRONNEMENTAUX  
A L'ORIGINE DE TROUBLES DE L'EQUILIBRE  
CHEZ L'HOMME AU TRAVAIL

**JURY :**

**Rapporteurs**

- M. André CHAYS, Professeur, Université de Reims Champagne – Ardennes
- M. Jacques CREMIEUX, Professeur, Université Toulon – Var

**Directeur de thèse**

- M. Philippe PERRIN, Professeur, Université Henri Poincaré, Nancy 1

**Membres**

- M. Denis ZMIROU-NAVIER, Professeur, Directeur de l'INSERM ERI 11 [EP]<sup>2</sup>R
- M. Jean-Marie MUR, Docteur en Médecine, Adjoint au Directeur Scientifique de l'INRS
- M. Gérome GAUCHARD, Maître de Conférences, Université Henri Poincaré, Nancy 1

**12 juillet 2005**

## TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>4</b>
<b>I - INTRODUCTION</b>	<b>7</b>
<b>II - ANATOMIE DESCRIPTIVE ET FONCTIONNELLE DE LA FONCTION D'EQUILIBRATION</b>	<b>15</b>
II - 1 - Les différentes entrées sensorielles	16
II - 1.1 - Système vestibulaire	16
II - 1.2 - Système visuel	19
II - 1.3 - Proprioception	20
II - 1.4 - Extéroception plantaire	22
II - 2 - Organisation centrale de l'équilibration	23
II - 2.1 - Au niveau médullaire	23
II - 2.2 - Au niveau du tronc cérébral	23
II - 2.3 - Au niveau des ganglions de la base	24
II - 2.4 - Au niveau cortical	24
II - 2.5 - Contrôle cérébelleux	24
<b>III - METHODE</b>	<b>25</b>
III - 1 - Posturographie	25
III - 1.1 - Plate-forme Toennies	25
III - 1.1.1 - Epreuves statiques	26
III - 1.1.2 - Epreuves dynamiques avec oscillations sinusoïdales lentes du support	30
III - 1.2 - Plate-forme de posturographie dynamique informatisée (EquiTest)	33
III - 1.2.1 - Test d'organisation sensorielle (SOT)	35
III - 1.2.2 - Test de contrôle moteur (MCT)	39
III - 1.3 - Plate-forme QFP	41
III - 2 - Agréments	43

<b>IV - PROTOCOLE 1 : IDENTIFICATION DE FACTEURS INDIVIDUELS POSTURAUX A L'ORIGINE DE TROUBLES DE L'EQUILIBRE</b>	<b>44</b>
IV - 1 - Rappels	44
IV - 2 - Sujets	47
IV - 3 - Procédure	49
IV - 4 - Première méthode d'analyse des données	50
IV - 4.a - Résultats	50
IV - 4.b - Discussion	53
IV - 4.c - Conclusion	58
IV - 5 - Deuxième méthode d'analyse des données	59
IV - 5.a - Résultats	59
IV - 5.b - Discussion	61
IV - 5.c - Conclusion	64
<b>V - PROTOCOLE 2 : EFFETS D'UNE EXPOSITION PROFESSIONNELLE AUX SOLVANTS SUR LE CONTROLE POSTURAL ET LA VIGILANCE</b>	<b>67</b>
V - 1 - Rappels	67
V - 2 - Sujets	74
V - 3 - Procédure	76
V - 4 - Statistiques	77
V - 5 - Résultats	77
V - 6 - Discussion	81
<b>VI – DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES</b>	<b>84</b>
<b>VII – CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	<b>92</b>
<b>VIII – BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>93</b>
ANNEXES	121
<i>Neuroscience Research</i>	122
<i>International Archives of Occupational and Environmental Health</i>	132
<i>Neurotoxicology</i>	134
<i>Neuroscience Letters</i>	136
<i>International Journal of Neuroscience</i>	138
<i>Communications à des congrès scientifiques</i>	140

## REMERCIEMENTS

Je souhaite en tout premier lieu remercier le **Professeur Philippe PERRIN** de m'avoir accueilli dans son laboratoire et par la même de m'avoir fait découvrir une vocation. Au cours de ce troisième cycle, vous m'avez guidé et soutenu afin que mon travail puisse se concrétiser. Vos conseils avisés et votre expérience m'ont permis de remettre constamment en question mes connaissances et d'acquérir la rigueur et l'esprit critique qui incombent à tout chercheur. Vous êtes à l'origine aujourd'hui de toutes mes ambitions et de mon orientation professionnelle.

Pour toutes ces raisons, soyez assuré, Professeur PERRIN, de mon profond respect et de mon éternelle reconnaissance.

Je souhaite également remercier le **Docteur Jean-Marie MUR** pour m'avoir accepté au sein de l'Unité 420 de l'INSERM. Votre disponibilité et votre aide précieuse sur le plan scientifique et méthodologique sont en grande partie à l'origine de la qualité de mon travail. Vous m'avez intégré dans votre équipe de recherche et m'avez permis financièrement de mener à terme mon doctorat.

Pour toutes ces raisons, soyez assuré, Docteur MUR, de mon estime et de ma reconnaissance.

Je souhaite également remercier le **Docteur Narkasem CHAU**, Directeur de Recherche à l'INSERM, pour sa collaboration et sa disponibilité. Vos connaissances statistiques et votre grande sagesse m'ont grandement aidé dans le bon déroulement de ce travail.

Pour toutes ces raisons, soyez assuré, Docteur CHAU, de mon estime et de ma gratitude.

Je souhaite également remercier le **Docteur Jérôme GAUCHARD** pour m'avoir éclairé de son expérience. Son esprit critique et sa disponibilité ont été des atouts majeurs pour l'ensemble de mes travaux de recherche.

Pour toutes ces raisons, soyez assuré, Docteur GAUCHARD, de mon estime et de ma reconnaissance.

Je souhaite également remercier **Monsieur Lahoucine BENAMGHAR**, Ingénieur de Recherche à l'INSERM, pour sa collaboration statistique et sa disponibilité. Vous avez comblé mes lacunes statistiques et avez particulièrement contribué à la publication de mes travaux.

Pour toutes ces raisons, soyez assuré, Monsieur BENAMGHAR, de mon estime et de ma reconnaissance.

#### **MERCI :**

A Monsieur le Professeur **Denis ZMIROU-NAVIER**

A Monsieur **Dominique DEVITERNE (Maître de conférences, IUFM Nancy)**

A Madame **Aline BERTHELIN**

A Monsieur **Alain BAROT (LICE)**

A **tout le personnel du Service de Santé au Travail du CHU de Nancy, en particulier à Madame le Docteur Marie-Line LEPORI.**

A **tout le personnel de l'entreprise de sérigraphie pour leur disponibilité, en particulier à son directeur et à la secrétaire du CHS-CT.**

Je souhaiterais enfin dédier cette thèse à ma compagne **NATHALIE**, à mes **PARENTS** et **GRANDS-PARENTS** pour leurs conseils, leur soutien inconditionnel et l'amour qu'ils me portent chaque jour. Ce travail, représentant l'aboutissement de mes études universitaires, n'aurait pu se faire sans vous. Avec tout mon amour et ma reconnaissance.

**A TOUTE MA FAMILLE**

**A TOUS MES AMIS**

Mes remerciements vont également au Conseil Régional de Lorraine, qui, en retenant ce projet, a permis le financement de mes années de thèse, ainsi qu'au CHU de Nancy, qui a financé l'un des axes de ce travail dans le cadre d'un Contrat de Recherche Clinique.

## I - INTRODUCTION

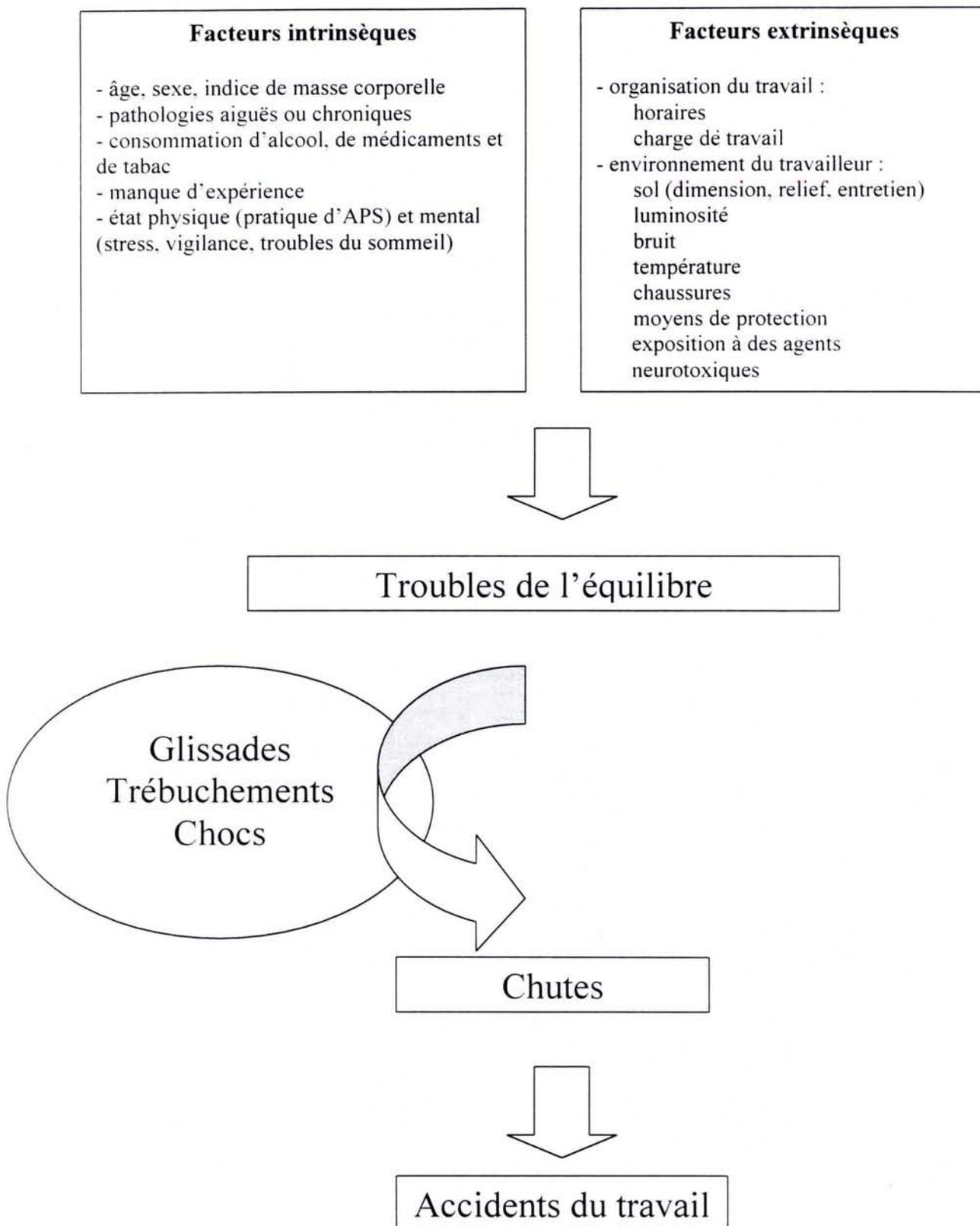
Les accidents du travail sont fréquents en France (Caisse Nationale d'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés [CNAMTS], 1996) et ont d'importantes répercussions socio-économiques (Margeat, 1982). Les chutes sont l'une des causes principales d'accident du travail (Arndt *et al.*, 2004 ; Carangan *et al.*, 2004 ; McCurdy *et al.*, 2004 ; Nishide *et al.*, 2004) et représentent un important coût financier et humain, que ce soit chez les travailleurs (Leamon & Murphy, 1995 ; Lipscomb *et al.*, 2003 ; Webster *et al.*, 2004 ; O'Sullivan *et al.*, 2004) ou chez les personnes âgées (Overstall *et al.*, 1978). Les chutes, dont les principales conséquences sont les fractures et les entorses (Manning, 1983, Skiba, 1983 ; Buck & Coleman, 1995), peuvent conduire à des arrêts de travail dont la durée varie avec l'âge (Arbetsjukdomar och arbetsolyckor, 1996 ; Kemmlert & Lundholm, 1998) et avoir des répercussions économiques pour les employeurs. En France, les chutes de plain-pied sont en effet responsables de 22% des jours de travail perdus et ce quel que soit le secteur d'activité (CNAMTS 1999 ; Leclercq, 1999). En Suède, les arrêts de travail consécutifs à des accidents causés par des glissades ont une durée moyenne de 30 jours (Strandberg, 1983).

Pour tous secteurs industriels confondus, 20 à 25 % des accidents de travail sont dus à des chutes (Skiba, 1983 ; Health and safety Executive [HSE], 1985 ; CNAMTS, 1999) et ce taux atteint 33 % dans certains secteurs (HSE, 1985). Ces accidents, plus fréquents chez les femmes que chez les hommes (Andersson & Lagerlöf, 1983 ; Davis, 1983 ; Benamghar *et al.*, 1998 ; Bentley & Haslam, 1998 ; Kemmlert & Lundholm, 1998), augmentent avec l'âge des travailleurs (Root, 1981 ; Andersson & Lagerlöf, 1983 ; HSE, 1985 ; Agnew & Saruda, 1993 ; Laflamme & Menckel, 1995 ; Arbetsjukdomar och arbetsolyckor, 1996 ; Laflamme, 1996) et surviennent dans 40 % des cas durant les cinq premières années d'ancienneté dans l'entreprise (Chau *et al.*, 1995).

Les chutes de plain-pied, qui représentent 12 à 14% des accidents du travail (Strandberg & Lanshammar, 1981 ; Ballance *et al.*, 1985), interviennent le plus souvent lors de la marche (Strandberg & Lanshammar, 1981), sur sol souillé (Manning *et al.*, 1988 ; Gronqvist & Roine, 1993) et deux fois plus fréquemment sur le lieu de travail (Strandberg & Lanshammar, 1981). Les nombreuses études portant sur le pas et sur ses interactions avec le sol ont mis en avant le fait que les facteurs contribuant principalement aux chutes sont les glissades et les trébuchements (Perkins, 1978 ; Strandberg & Lanshammar, 1981 ; Andersson & Lagerlöf, 1983 ; Bates *et al.*, 1983 ; Strandberg, 1983 ; Manning *et al.*, 1988 ; Leclercq *et al.*, 1995).

Les chutes représentent 2 % des accidents mortels en France (Leclercq, 1999a) et 10 % aux Etats-Unis (Agnew & Saruda, 1993). La chute est la quatrième cause majeure d'accidents mortels aux Etats-Unis (Agnew & Saruda, 1993) mais aussi la première chez les personnes âgées (Overstall *et al.*, 1978 ; Waller, 1978). Bien que les accidents du travail aient fait l'objet dans leur ensemble de mesures préventives, les chutes ont, quant à elles, souvent été délaissées (Andersson & Lagerlöf, 1983).

Il existe une grande diversité dans le nombre et le type de facteurs de risque associés aux chutes. Ces facteurs de risque sont typiquement classés en deux groupes : facteurs extrinsèques (ou environnementaux) et intrinsèques (ou individuels), même si certains facteurs extrinsèques agissent directement sur les facteurs intrinsèques, l'association des deux étant communément appelée facteurs mixtes (Grönqvist *et al.*, 2001a).



**Fig. 1** – Hypothèse de recherche

Les facteurs individuels associés aux chutes sont mal connus chez les travailleurs, contrairement à ceux très bien décrits chez les personnes âgées. Il semblerait ainsi que les facteurs intrinsèques joueraient un rôle dans les processus de chutes et que les facteurs extrinsèques révéleraient des déficits physiologiques. Un dysfonctionnement à un des niveaux de régulation de l'équilibre peut altérer le contrôle postural et induire une chute, phénomène particulièrement bien étudié chez les personnes âgées (Over, 1966 ; Overstall *et al.*, 1977 ; Waller, 1978 ; Spooner *et al.*, 1980 ; Skinner *et al.*, 1984 ; Maki *et al.*, 1991 ; Alexander *et al.*, 1992 ; Brandt & Dieterich, 1993).

Les afférences neurosensorielles participant au contrôle postural ont chacune un poids relatif qui varie d'un individu à l'autre (Lacour *et al.*, 1997 ; El-Kahky *et al.*, 2000) et, chez le même sujet, d'une période de sa vie à une autre (Lee & Lishman, 1975 ; Brandt *et al.*, 1976 ; Mirka & Black, 1990 ; Assaiante et Amblard, 1995 ; Perrin *et al.*, 1995), voire d'un instant à l'autre selon les difficultés d'équilibration à résoudre et le contexte environnemental. La contribution de ces afférences peut également varier en fonction de pathologies atteignant soit directement ces capteurs (Tagushi, 1978 ; Norré, 1990 ; Vitte *et al.*, 1991 ; Roques *et al.*, 1992 ; Guidetti *et al.*, 1993), soit les centres nerveux supérieurs (Mauritz *et al.*, 1979 ; Diener *et al.*, 1984 ; Horak & Nashner, 1986 ; Horak, 1988 ; Bronstein *et al.*, 1990 ; Norré, 1990 ; Horak, 1992 ; Roques *et al.*, 1992 ; Vitte, 1992). De plus, la sensibilité des individus aux informations visuelles varie également en fonction du sexe dans certaines tranches d'âge (Wolfson *et al.*, 1992), de l'expérience et des apprentissages (Mesure et Crémieux, 1992 ; Crémieux et Mesure, 1994). Enfin, la pratique des activités physiques et sportives semble améliorer le contrôle postural (Burton & Davis, 1992 ; Crémieux et Mesure, 1992 ; Mesure *et al.*, 1994 ; Crémieux *et al.*, 1995 ; Mesure *et al.*, 1995a ; Mesure *et al.*, 1995b), en permettant l'acquisition de nouvelles stratégies motrices (Lord & Castell, 1994 ; Wolfson *et al.*, 1996 ; Buchner *et al.*, 1997), mais également le maintien de la sensibilité de certains capteurs (Hu &

Woollacott, 1994 ; Perrin *et al.*, 1998 ; Gauchard *et al.*, 2003b ; Gauchard *et al.*, 2004). La dépendance visuelle augmente avec l'âge (Paulus *et al.*, 1984 ; Pyykkö *et al.*, 1990), induisant ainsi une détérioration de la qualité du contrôle postural (Perrin *et al.*, 1997a).

Un déficit d'une des entrées neurosensorielles peut engendrer des perturbations de la fonction d'équilibration. Un dysfonctionnement vestibulaire peut être à l'origine de chutes soudaines chez l'adulte (Brandt & Dieterich, 1993), qu'il s'agisse d'un vertige positionnel paroxystique bénin, d'une maladie de Menière ou d'une névrite vestibulaire (Proctor *et al.*, 1979 ; Schuknecht & Kitamura, 1980 ; Baloh *et al.*, 1989, 1990 ; Dieterich *et al.*, 1989 ; Brandt & Dieterich, 1993 ; Brandt & Steddin, 1993). Les informations vestibulaires jouent, en effet, un rôle important dans la l'activation tonique des muscles anti-gravitaires des jambes (Lacour *et al.*, 1997) et dans la stabilisation adaptée de la tête et du tronc lors de déplacements (Borel *et al.*, 2002). Enfin, la détérioration des cellules sensorielles vestibulaires (Johnsson & Hawkins, 1972 ; Rosenhall & Rubin, 1975 ; Richter, 1980) et de la qualité de l'information proprioceptive (Skinner *et al.*, 1984) croît avec l'âge.

L'ostéoporose qui accompagne la période périménopausale augmente l'instabilité posturale, particulièrement chez les femmes présentant des symptômes vasomoteurs (Ekblad *et al.*, 2000) par une utilisation préférentielle de la « stratégie de hanche » (Lynn *et al.*, 1997) et en aggrave ses conséquences (Winner *et al.*, 1989). Le fait de pratiquer régulièrement une activité physique ou de suivre un programme d'entraînement proprioceptif (Sinaki & Lynn, 2002) en période postménopausale améliorerait, contrairement à la prise de substituts hormonaux, le contrôle postural (Lindmark *et al.*, 1999 ; Brooke-Wavell *et al.*, 2001).

L'expérience du sujet, à travers la connaissance de son lieu de travail, est un facteur intrinsèque important, qui va lui permettre de s'adapter à son environnement (Swensen *et al.*, 1992) ; un sujet expérimenté confronté à une surface glissante va ainsi adapter sa démarche sur ce type de sol (Gronqvist, 1989 ; Andres *et al.*, 1992 ; Myung *et al.*, 1993 ; Hanson *et al.*,

1999). Son attention va également jouer un rôle conséquent (Laurent, 1991 ; Lajoie *et al.*, 1993 ; Wooley *et al.*, 1997) sur les ajustements posturaux, permettant de ce fait de limiter le risque de chutes (McIlroy & Maki, 1995).

L'ensemble constitué par le travailleur, les tâches exercées avec les matériels utilisés et son environnement représente un système homme-tâche-environnement évolutif. Aussi, le fait de réaliser simultanément plusieurs tâches peut constituer une composante perturbatrice de la posture, en réduisant particulièrement l'habilité à identifier et à éviter les glissades et les trébuchements (Marletta, 1991 ; Bentley & Haslam, 1998). De plus, l'activité de double-tâche peut conduire à une plus grande difficulté à résoudre les conflits sensoriels causés par les interférences cognitives et ainsi générer des réponses motrices inadaptées et des déséquilibres (Maki & McIlroy, 1996 ; Rankin *et al.*, 2000 ; Jamet *et al.*, 2004). Finalement, les facteurs intrinsèques peuvent être considérés aussi bien comme permanents (à travers des stratégies de ré-équilibration types et des facteurs physiologiques et psychologiques prédisposés) que momentanés (à travers des stratégies de re-stabilisation ponctuelles mises en jeu en accord avec la condition physique, la fatigue, le régime alimentaire, la prise de médicaments ou encore la vigilance). Après une situation déstabilisante, l'équilibre peut être retrouvé, non pas grâce à une stratégie de ré-équilibration stéréotypée, mais plutôt par une stratégie sensorimotrice spécifique sélectionnée à partir de répertoires communs et adaptée à la situation et à l'environnement (Gauchard *et al.*, 2001a).

Les facteurs extrinsèques semblent quant à eux concerner deux grands domaines, d'une part l'organisation du travail et d'autre part l'environnement dans lequel évoluent les salariés (Gauchard *et al.*, 2001a), l'ensemble de ces facteurs contribuant à leur manière à la perturbation de l'équilibre.

Ainsi, l'activité elle-même peut être à l'origine de chutes, la stabilité posturale étant en effet modifiée par la taille, le poids des objets ou encore la technique employée dans la

manutention de ceux-ci (Davis, 1983). La contrainte temporelle relative à l'urgence d'une tâche constitue également un facteur important dans la survenue des accidents du travail causés par des chutes.

Concernant l'environnement du travailleur, divers facteurs tels que la lumière, la nature et qualité du sol (Fothergill *et al.*, 1995) ou encore la présence d'un obstacle (Manning, 1983) peuvent être à l'origine de perturbations de l'équilibre et ainsi contribuer à augmenter le risque de chutes. Le rôle des chaussures dans le processus des chutes a également fait l'objet d'un grand nombre d'études (pour synthèse voir Grönqvist *et al.*, 2001b).

Le processus central, impliqué dans le contrôle postural, permet l'emmagasinement des différentes informations neurosensorielles, leur comparaison et leur intégration et la production d'une réponse motrice adaptée à la situation. Des troubles de l'équilibre causés par une sensibilité importante à différentes sources de nature dégénérative (Destée, 1994) peuvent également être à l'origine de chutes. Les pathologies centrales, spécialement celles qui touchent le cervelet, peuvent induire des troubles de l'équilibre ; la plus fréquente étiologie de ces syndromes cérébelleux est la consommation d'alcool (Torvik *et al.*, 1982 ; Ledin & Ödkvist, 1991) mais les solvants peuvent aussi être impliqués (Destée, 1994). L'étude des effets neurotoxiques sur le système nerveux central d'une exposition professionnelle a mis en évidence des perturbations de la fonction d'équilibration chez des travailleurs exposés aux gaz anesthésiques (Vouriot *et al.*, 2005), à certains solvants (Ledin *et al.*, 1989 ; Kuo *et al.*, 1996 ; Smith *et al.*, 1997 ; Yokoyama *et al.*, 1997), au manganèse (Chia *et al.*, 1993 ; Chia *et al.*, 1995 ; Kilburn, 1999 ; Lucchini *et al.*, 1999 ; Myers *et al.*, 2003), ou encore au plomb (Chia *et al.*, 1994 ; Ratzon *et al.*, 2001).

Cette thèse a donc pour objet d'identifier les facteurs individuels posturaux, en terme d'organisation sensorielle et de latences des réponses neuromusculaires, et extrinsèques, en

l'occurrence une exposition professionnelle aux solvants, à l'origine de troubles de l'équilibre chez l'homme au travail.

En effet, si de nombreux profils posturaux à l'origine de la survenue et de la récurrence de chutes ont été mis en évidence chez le sujet âgé, il existe, à notre connaissance, peu d'études à ce sujet chez l'homme au travail. En terme de Santé Publique, il apparaît important de déterminer si une organisation sensorielle particulière peut être un facteur de risque de chutes important. Cette démarche pourrait aider les professionnels de la santé dans la détection d'éventuels salariés à risque et la mise en place de stratégies préventives adaptées.

Concernant l'étude des relations entre exposition professionnelle et troubles de l'équilibre, peu de travaux ont porté sur une exposition aux hydrocarbures benzéniques à faible concentration et surtout en lien avec des troubles de la vigilance. La détermination de signes précoces d'atteinte du système nerveux central par une exposition professionnelle aux solvants, à l'aide d'outils d'investigations ambulatoires, s'inscrit dans une démarche visant à mieux appréhender les risques environnementaux auxquels sont soumis les salariés.

Enfin, une synthèse des travaux menés tentera de mettre en avant l'implication de nos résultats dans le domaine de la santé publique et plus particulièrement chez l'homme au travail.

## II - ANATOMIE DESCRIPTIVE ET FONCTIONNELLE DE LA FONCTION D'EQUILIBRATION

Définition de l'équilibration dans un plan neurophysiologique en tant que réflexe :

Le système nerveux central, plus exactement le tronc cérébral, intègre de manière continue des informations provenant d'entrées, de capteurs (vision, oreille interne, extéroception et proprioception) qui vont être comparées entre elles, mais aussi avec le vécu antérieur du sujet, de manière à élaborer une réponse motrice effectrice, visant à stabiliser d'une part le regard et d'autre part la posture (Perrin & Lestienne, 1994).

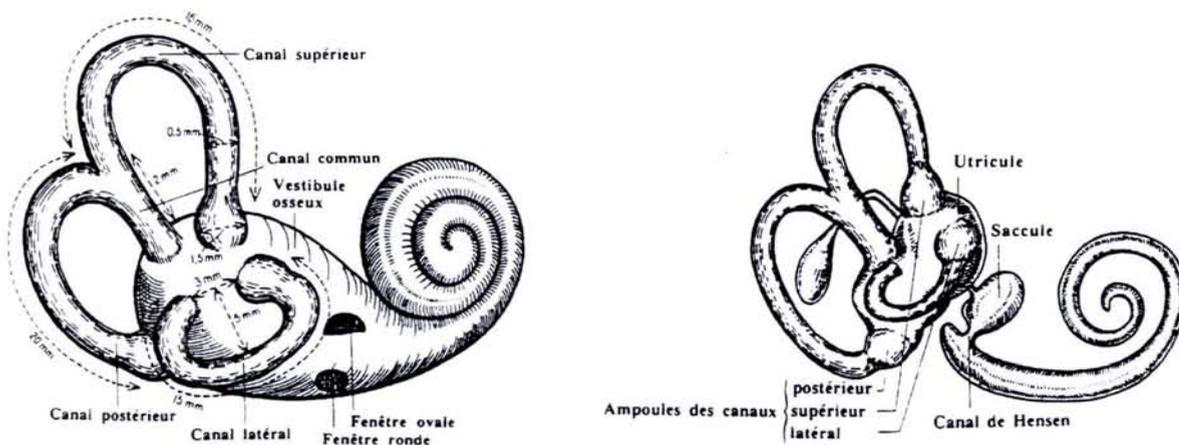
L'homme, primate érigé, est un organisme pluriarticulé soumis aux lois inéluctables de la gravité (Perrin & Lestienne, 1994). En raison de cet appui bipodal, le rapport « surface d'appui/taille » est faible du fait de l'étroitesse du polygone de sustentation et de la situation haute du centre de gravité. L'homme doit donc corriger en permanence les microdéplacements physiologiques de son centre de gravité afin que la verticale passant par celui-ci se projette toujours dans ce polygone de sustentation (Perrin & Lestienne, 1994). Le maintien de la posture, beaucoup plus instable que celle des quadrupèdes (Sidebotham, 1988 ; Smith & Porth, 1991), fait intervenir des mécanismes complexes contrôlés par le système nerveux central (Massion & Viallet, 1990) et sous-entend un système de régulation tonique postural (Crémieux *et al.*, 1995).

## II - 1 - Les différentes entrées sensorielles

### II - 1.1 - Système vestibulaire

#### II - 1.1.a - Morphologie

Les récepteurs de l'équilibration sont situés dans l'oreille interne à l'intérieur du labyrinthe qui comporte une partie osseuse et une partie membraneuse. Le labyrinthe osseux situé à l'intérieur du rocher comprend à sa partie moyenne le vestibule dont le prolongement vers l'avant constitue le limaçon renfermant la cochlée, organe de l'audition. Vers l'arrière s'abouchent les trois canaux semi-circulaires dont la disposition à l'intérieur du rocher est fixée par trois cavités définissant le canal horizontal et les deux canaux verticaux. (Fig. 2).



**Fig. 2** – *Vue antéro-externe du labyrinthe osseux (à gauche) et du labyrinthe membraneux (à droite)*  
(Legent *et al.*, 1979).

Le labyrinthe membraneux, empli d'endolymphe, forme quant à lui un entrelacement de canaux et de sacs. Séparé des structures osseuses par la périlymphe dont la composition est très semblable à celle du liquide céphalo-rachidien, le labyrinthe membraneux comporte deux types de récepteurs.

### Utricule et saccule

L'utricule et le saccule contiennent la macula qui comporte un épithélium sensoriel composé de cellules ciliées coiffées d'une masse muco-gélatineuse contenant des otolithes ou statoconies, fins cristaux de carbonate de calcium de densité élevée ( $d=2.7$ ). La macule de l'utricule est orientée horizontalement alors que celle du saccule est orientée verticalement. Elles sont donc orthogonales l'une par rapport à l'autre.

### Canaux semi-circulaires

Les canaux semi-circulaires sont au nombre de trois et situés dans des plans sensiblement orthogonaux. On peut ainsi décrire un canal vertical antérieur qui s'écarte de 40 degrés du plan frontal, un canal vertical postérieur qui s'écarte de 50 degrés du plan médian et d'un canal horizontal orienté vers le bas et vers l'arrière en formant avec le plan horizontal un angle de 30 degrés. Le canal vertical antérieur d'un côté est dans le même plan que le canal vertical postérieur de l'autre côté.

Chaque canal possède un renflement, l'ampoule, à l'intérieur duquel une membrane sensorielle, dénommée crête ampullaire est recouverte d'une substance gélatineuse en forme de cupule. Cette crête ampullaire oblitère la lumière du canal. Les cils des cellules sensorielles s'enfoncent dans cette masse gélatineuse.

### Cellules sensorielles ciliées

Les crêtes ampullaires des canaux semi-circulaires et des maculae utriculaire et sacculaire abritent deux types de cellules réceptrices : les cellules réceptrices de type I, en bouteille, et de type II, cylindriques. Elle comporte une plaque cuticulaire d'où émerge une

soixantaine de cils – stéréocils – disposés en V dont la pointe est identifiée par un cil particulier le kinocil beaucoup plus long.

Les cellules sensorielles ciliées sont des mécano-récepteurs qui dans les conditions dites de "repos" sont caractérisées par une activité tonique soutenue ou dépolarisation spontanée. Sous l'effet des accélérations linéaires et angulaires, les stéréocils subissent une inclinaison du fait de la masse inertielle de l'endolymphe. Selon la direction de l'inclinaison par rapport au kinocil qui définit une polarité, une excitation ou une inhibition se produit. Ainsi, si les stéréocils sont inclinés vers le kinocil, une augmentation de décharges se produit ; inversement, une inclinaison en sens opposé provoque une diminution ou un arrêt des décharges. Ces récepteurs sont de type tonique.

## **II – 1.1.b - L'organe vestibulaire, capteur du champ gravito-inertiel**

L'organe vestibulaire constitue une centrale gravito-inertielle. Elle permet la détection des accélérations linéaires, notamment celle de la gravité, par l'intermédiaire des organes utriculaires et sacculaires. Quant aux canaux semi-circulaires, leurs caractéristiques mécaniques sont adaptées à la détection des accélérations angulaires.

### Utricule et saccule : capteur d'accélération linéaire

Les macules utriculaires et sacculaires sont sensibles aux accélérations linéaires grâce à la disposition anatomique et spatiale des cellules réceptrices. Celles-ci sont disposées de part et d'autre d'une ligne imaginaire (la striola) qui délimite deux zones de polarité opposée. Chaque cellule possède une direction privilégiée ou vecteur de polarisation. Pour un même côté de la striola, toutes les orientations possibles sont rencontrées permettant ainsi de couvrir horizontalement et verticalement les 360 degrés. C'est la force de cisaillement qui facilitera

l'excitation d'une partie des récepteurs et inhibera l'autre partie des récepteurs de polarité opposée. En d'autre terme ce système fonctionne selon le principe du "push-pull".

#### Canaux semi-circulaires : capteurs d'accélération angulaires

Sur chaque crête ampullaire, les cils sont disposés de façon identique avec tous les kinocils orientés vers l'utricule pour le canal horizontal et inversement à l'opposé, pour les canaux postérieur et antérieur. L'accélération angulaire produite dans le propre plan de chacun des canaux semi-circulaires provoque un déplacement inertiel de l'endolymphe qui incurve la cupula assimilable à un piston. Prenant en compte l'élasticité de la cupula, la viscosité de l'endolymphe et l'inertie du système, il est alors possible par une équation différentielle linéaire du second ordre, d'exprimer la relation entre la déviation de la cupula, autrement dit le piston, et l'accélération à laquelle est soumis le labyrinthe.

### **II - 1.2 - Système visuel**

L'œil a un rôle prépondérant dans la régulation posturale (Travis, 1945 ; Dichgans *et al.*, 1978), puisqu'il permet de percevoir la position de son corps et des segments qui le composent vis-à-vis d'eux-mêmes et de l'environnement (Isableu *et al.*, 1997).

La rétine est composée de deux zones faisant intervenir deux types de vision :

- la vision centrale ou fovéale, faisant intervenir la rétine maculaire, est spécialisée dans l'analyse fine de l'image en assurant la reconnaissance des formes, des couleurs, l'évaluation des dimensions, l'orientation et la localisation spatiale (Perrin & Lestienne, 1994).
- la vision périphérique ou extrafovéale, fait intervenir la rétine périphérique dont la fonction est la perception du mouvement et la détermination de ses paramètres

dynamiques ; vitesse linéaire et angulaire, trajectoires (Lestienne *et al.*, 1976 ; Pelissier *et al.*, 1993).

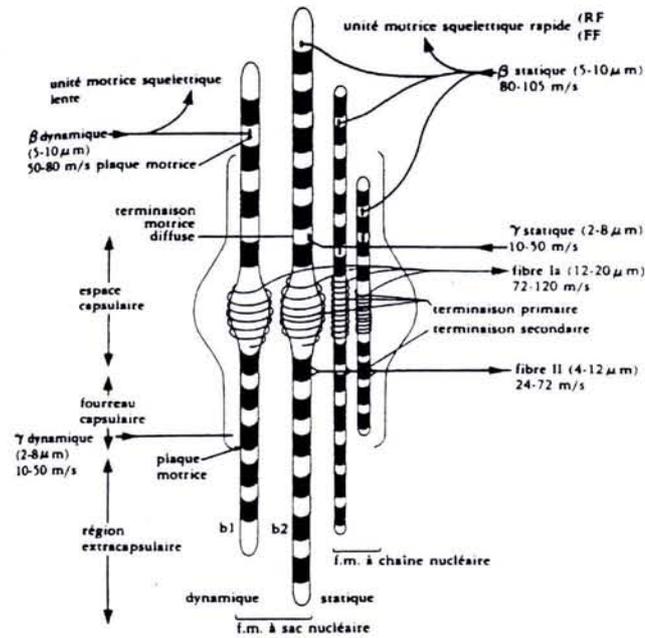
La complémentarité des informations rétiniennes, céphaloproprioceptives et oculoproprioceptives (Berthoz *et al.*, 1989) est indispensable dans la détermination de la verticalité (Roll & Roll, 1987) ; l'ensemble de ces signaux semble former le lien entre les traitements cognitifs des coordonnées spatiales et la régulation posturale (Kerr *et al.*, 1985).

## **II - 1.3 - Proprioception**

Les informations proprioceptives relatives aux mouvements des articulations, aux déformations des tissus musculaires et cutanés jouent un rôle important dans le maintien de l'équilibre (Roll & Roll, 1988). Ces afférences sensorielles émanent de trois types de récepteurs :

### Récepteurs fusoriaux

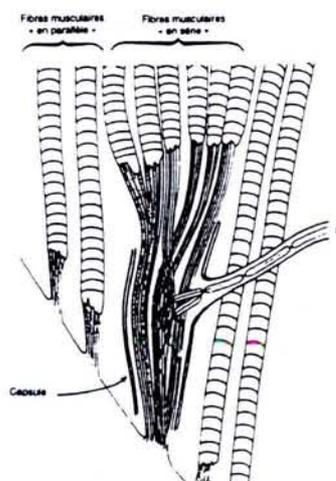
Dispersés à l'intérieur du muscle, ils participent de façon prépondérante au maintien de l'activité tonique des motoneurones par la voie réflexe dite myotatique. Sollicités par l'étirement des muscles antigravitaires, ces capteurs, appelés aussi fuseaux neuromusculaires, sont constitués de 6 à 8 fibres intrafusales parmi lesquelles on distingue les fibres dynamiques à sac nucléaire, les fibres statiques à sac nucléaire et les fibres statiques à chaînes nucléaires (Fig. 3). Chaque fuseau neuromusculaire est, en outre, sous le contrôle de deux systèmes moteurs gamma, l'un dynamique et l'autre statique (Perrin & Lestienne, 1994).



**Fig. 3** – Représentation schématique du récepteur fusorial et de ses innervations. (Rigal, 1985).

### Récepteurs tendineux de Golgi

Situés à l'extrémité de la fibre musculaire, ces mécanorécepteurs sont sensibles à une tension exercée soit par l'étirement passif de la fibre musculaire, soit par l'activation des fibres musculaires (Fig. 4).



**Fig. 4** – Représentation schématique d'un organe tendineux. (Zelena & Soukup, 1983).

## Récepteurs articulaires

La majorité de ceux-ci est localisée au niveau des articulations de la capsule articulaire. Les récepteurs articulaires sont composés des corpuscules de Ruffini (sensibles à la position des pièces articulaires et à la rotation des articulations) des corpuscules de Pacini (en nombre plus faible que les précédents) et des récepteurs de Golgi (Perrin & Lestienne, 1994).

### **II - 1.4 - Extéroception plantaire**

L'homme déroule sa vie sur la piste terrestre dans une posture érigée et en raison du champ de gravité et des lois de la mécanique, son pied est astreint à être l'organe de l'équilibre.

Le pied contient des récepteurs sensoriels susceptibles d'informer avec précision le système nerveux central sur la situation du point d'application de la force de pression au niveau de la surface d'appui et d'assurer son contrôle permanent grâce à des boucles de rétroaction rapide. Ces récepteurs articulaires et musculaires, dont la quasi-totalité est sous la dépendance du nerf tibial postérieur (Do *et al.*, 1990), font du pied une véritable plate-forme dynamométrique chargée d'analyser les variations de pression à la base du corps humain (Enjalbert *et al.*, 1993).

Indispensables au contrôle postural (Okubo *et al.*, 1980 ; Diener *et al.*, 1984 ; Magnusson *et al.*, 1990), les informations extéroceptives de la voûte plantaire peuvent devenir prépondérantes lors de défaillances des systèmes visuel et vestibulaire (Perrin & Lestienne,

(Dubois & Levame, 1966) ; les trois points d'appui osseux de la voûte plantaire, sur le plan horizontal, sont la tubérosité postérieure du calcanéum, la tête du 1<sup>er</sup> métatarsien et la tête du 5<sup>ème</sup> métatarsien (Kahle *et al.*, 1995).

## **II - 2 - Organisation centrale de l'équilibration**

Toutes les réactions de posture et d'équilibre sont déclenchées et contrôlées à partir d'informations sensorielles et réalisées dans un ensemble d'opérations en rétro-contrôle.

### **II - 2.1 - Au niveau médullaire**

La posture érigée apparaît d'abord comme le résultat de la contraction tonique des muscles striés, dont le maintien essentiel est le réflexe myotatique, défini comme la contraction réflexe d'un muscle induite par son propre étirement (Sherrington, 1906). Celui-ci trouve son origine dans les motoneurones alpha toniques de la moelle segmentaire ; la modulation du tonus musculaire faisant intervenir des contrôles supra spinaux à partir du noyau rouge, de la substance réticulée et du cervelet (Perrin *et al.*, 1987).

### **II - 2.2 - Au niveau du tronc cérébral**

Les principales structures impliquées au niveau du tronc cérébral sont le noyau rouge, la substance réticulée et les noyaux vestibulaires. Les excitations réflexogènes par stimulations labyrinthiques, proprioceptives et visuo-sensorielles entraînent des réactions motrices, dont les réactions d'équilibration.

### **II - 2.3 - Au niveau des ganglions de la base**

L'ensemble des noyaux gris de la base peut être considéré comme un jeu de deux servomécanismes superposés, qui assure la répartition du tonus musculaire, la régulation de certains automatismes moteurs, le choix et l'ajustement des schémas moteurs posturocinétiques les plus appropriés en fonction des informations sensorielles et visuelles notamment (Perrin & Lestienne, 1994).

### **II - 2.4 - Au niveau cortical**

Les aires motrices corticales sont à l'origine du faisceau pyramidal dont le rôle fonctionnel essentiel est le contrôle moteur. Le cortex cérébral apparaît également comme une structure qui, à partir de multiples afférences sensorielles, gère le tonus musculaire et les ajustements posturaux nécessaires au maintien de l'équilibre (Perrin *et al.*, 1987).

### **II - 2.5 - Contrôle cérébelleux**

La microcircuiterie cérébelleuse est assimilable à une étonnante machinerie capable de moduler le jeu des muscles agonistes et antagonistes permettant de réguler l'amplitude et la vitesse du mouvement ou/et d'assurer la coordination temporelle des activités musculaires (Perrin & Lestienne, 1994). Le cervelet est principalement impliqué dans la mise en place de nouvelles combinaisons musculaires lors de la création d'un geste (Massion, 1992) et assure par l'intermédiaire des trois parties qui le composent (archécervelet, palécervelet et neocervelet) la régulation des activités musculaires du mouvement volontaire global, des activités musculaires toniques de la posture et des activités musculaires toniques du maintien de l'équilibre.

### **III - METHODE**

Depuis plus d'un siècle, des médecins et des physiologistes tentent d'enregistrer et d'analyser les petites oscillations corporelles fines du corps de l'homme debout immobile (Vierordt, 1884 ; Mitchell & Lewis, 1886 ; Hinsdale, 1887 ; Bullard & Brackett, 1888 ; Hancock, 1894 ; Bolton, 1903 ; Miles, 1922 ; Fearing, 1924 ; Latmanizova, 1931 ; Hellebrandt, 1938 ; Edwards, 1942 ; Goldberg, 1943). Ces travaux ont été à l'origine de la mise au point de différentes plates-formes de forces normalisées (Bizzo *et al.*, 1985). Celles-ci, placées dans un environnement visuel normalisé (Gagey *et al.*, 1990), permettent l'enregistrement des petits déplacements du centre de pression des pieds de l'homme debout immobile pendant un temps donné (Gagey *et al.*, 1992).

#### **III - 1 - Posturographie**

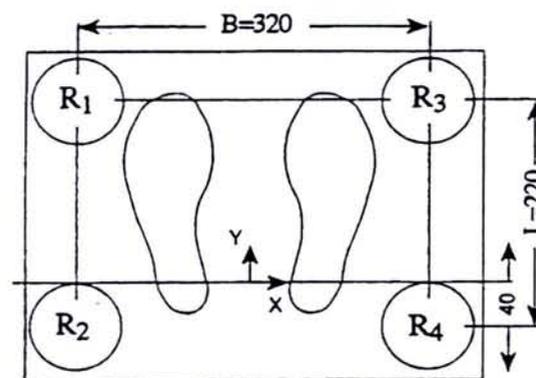
##### **III - 1.1 - Plate-forme Toennies**

L'ensemble des sujets a été soumis à des épreuves de posturographie statique et/ou dynamique sur une plate-forme de forces verticales (Toennies GmbH, Freiburg, Allemagne), composée d'un plateau muni d'empreintes permettant le positionnement des pieds et reposant sur 4 jauges de contraintes réparties aux angles, à partir desquelles sont enregistrées les positions du centre de pression des pieds (CPP) et ses déplacements (Fig. 5). Une interface permet la transformation des informations de pression en informations électriques. Ces tests sont réalisés dans une pièce insonorisée, avec un éclairage artificiel.

Il a été demandé à chacun des sujets, durant la durée des enregistrements, en position orthostatique sur la plate-forme, les pieds nus au niveau des repères, les bras le long du corps, respirant normalement sans inspiration ni expiration forcée, de rester le plus stable, mais le

plus détendu possible, la tête dans l'axe d'une cible à hauteur des yeux placée 2 mètres devant eux.

Deux tests posturographiques, test statique et test dynamique avec oscillations lentes, ont été réalisés. La posturographie statique a pour objet l'appréciation des qualités naturelles du sujet à maintenir son équilibre ; la posturographie dynamique a, quant à elle, pour objet l'appréciation des réactions posturales consécutives à une déstabilisation donnée (Perrin *et al.*, 1992).



**Fig. 5** – Plate-forme de posturographie (Toennies GmbH).  
X : oscillations latérales – Y : Oscillations antéro-postérieures  
R1, R2, R3, R4 : Jauges de contraintes

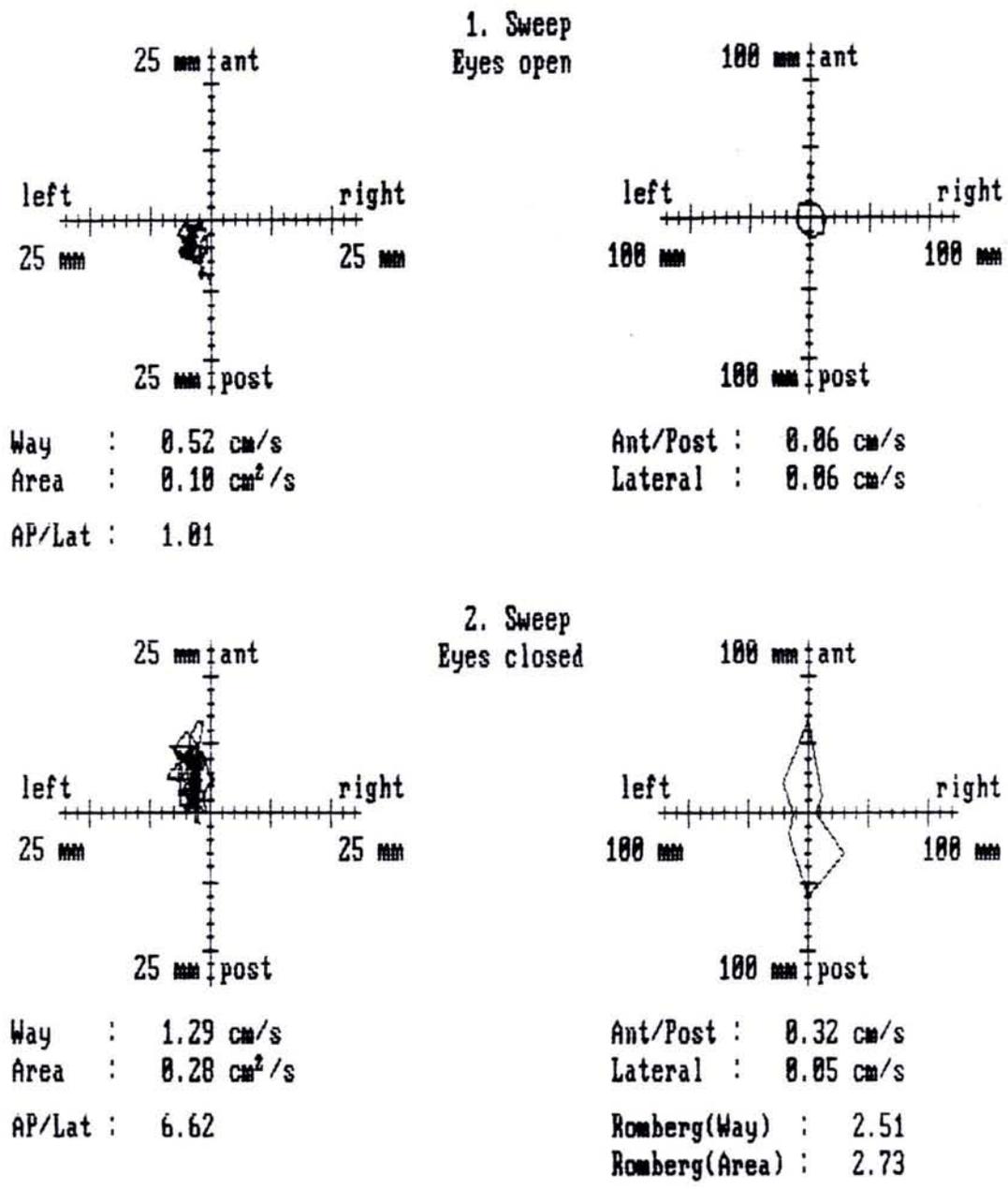
### III - 1.1.1- Epreuves statiques

Dans le cadre de l'examen de l'équilibre statique des sujets, les déplacements du centre de pression des pieds (CPP) sont enregistrés pendant 20 secondes à l'aide du logiciel T-Post (Toennies Posturographic Software, Tübingen, Allemagne) et à une fréquence d'échantillonnage de 50 Hz. L'interface transformant les informations de pression en informations électriques permet de visualiser les positions successives du CPP au cours de l'enregistrement selon une abscisse droite / gauche et une ordonnée antéro-postérieure (statokinésigramme) et en fonction du temps d'enregistrement (stabilogramme).

Le statokinésigramme (Fig. 6) permet de recueillir les paramètres de longueur (Lg) parcourue et de surface (S) couverte par les déplacements du CPP ainsi que les oscillations antéropostérieures (AP) et latérales (Lat). L'obtention de valeurs faibles aux paramètres Lg et S traduit une bonne stabilité du sujet. Le paramètre Lg représente la dépense d'énergie mise en jeu par le sujet pour réguler son équilibre, et le paramètre S, la précision du contrôle postural (Toupet & Gagey, 1991 ; Perrin *et al.*, 1996). Les déplacements antéropostérieurs sont généralement plus importants que les déplacements latéraux (Magnusson *et al.*, 1990b ; Magnusson *et al.*, 1990c) du fait d'un nombre de degrés de liberté dans le plan sagittal (sous la dépendance de muscles extenseurs-fléchisseurs) plus élevé que dans le plan frontal (sous la dépendance de muscles abducteurs-adducteurs). Les oscillations posturales dans les plans antéropostérieur et latéral sont indépendantes (Kapteyn, 1973), leur fonction d'intercorrélation étant aléatoire. De plus, en condition YO, la vision permet une meilleure correction des oscillations dans le plan Lat que dans le plan AP.

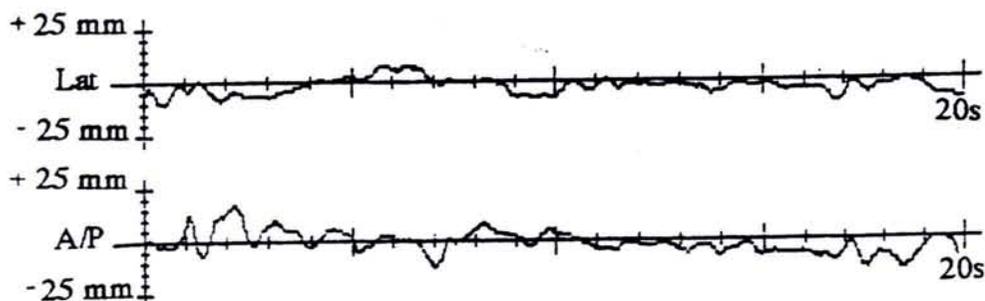
Chaque test a été réalisé en condition yeux ouverts (YO) puis yeux fermés (YF), afin de quantifier le poids de l'afférence visuelle dans le contrôle de l'équilibre statique par l'intermédiaire du quotient de Romberg (QR). Celui-ci correspond au rapport entre la longueur parcourue par le CPP en condition YF et celle en condition YO pour le QR Lg, et au rapport entre la surface couverte par le CPP en condition YF et celle en condition YO pour le QR S (Van Parys & Njiokiktjien, 1976 ; Tropp *et al.*, 1987).

Le stabilogramme (Fig. 7) représente l'amplitude des déplacements du CPP (ordonnées, en millimètres) en fonction du temps (abscisses, en secondes) dans les plans frontal (mouvements droite-gauche) et sagittal (mouvements avant-arrière) successivement.



**Fig. 6 – Statokinésigrammes.**  
 Longueur (way) et surface couverte (area) par le centre de pression des pieds.  
 Oscillations antéro-postérieures (AP) et latérales (Lat).  
 Tracés obtenus chez une femme âgée de 45 ans.

## 1. Stabilogrammes



Lat + : Déplacement à droite

A/P + : Déplacement vers l'avant

Lat - : Déplacement à gauche

A/P - : Déplacement vers l'arrière

## 2. Transformées rapides de Fourier

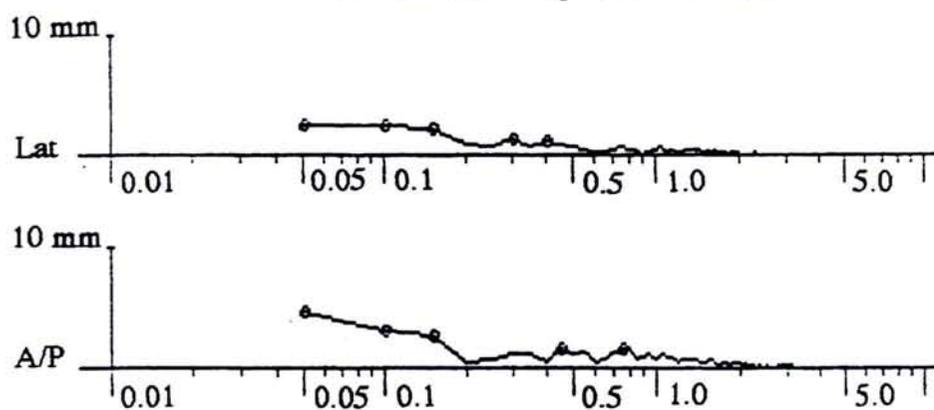


Fig. 7 - Stabilogrammes et transformée rapide de Fourier (FFT).  
Tracés obtenus chez une femme âgée de 45 ans.

Le contenu fréquentiel des oscillations est analysé au moyen de la transformée rapide de Fourier (FFT), moyen d'analyse mathématique, permettant d'étudier l'amplitude des oscillations (en ordonnées, en millimètre) en fonction du logarithme des fréquences (en abscisse, en Hertz) dans les plans frontal et sagittal. Les FFT sont utilisées, lors des épreuves d'équilibre statique, pour définir la normalité ou non des valeurs du sujet.

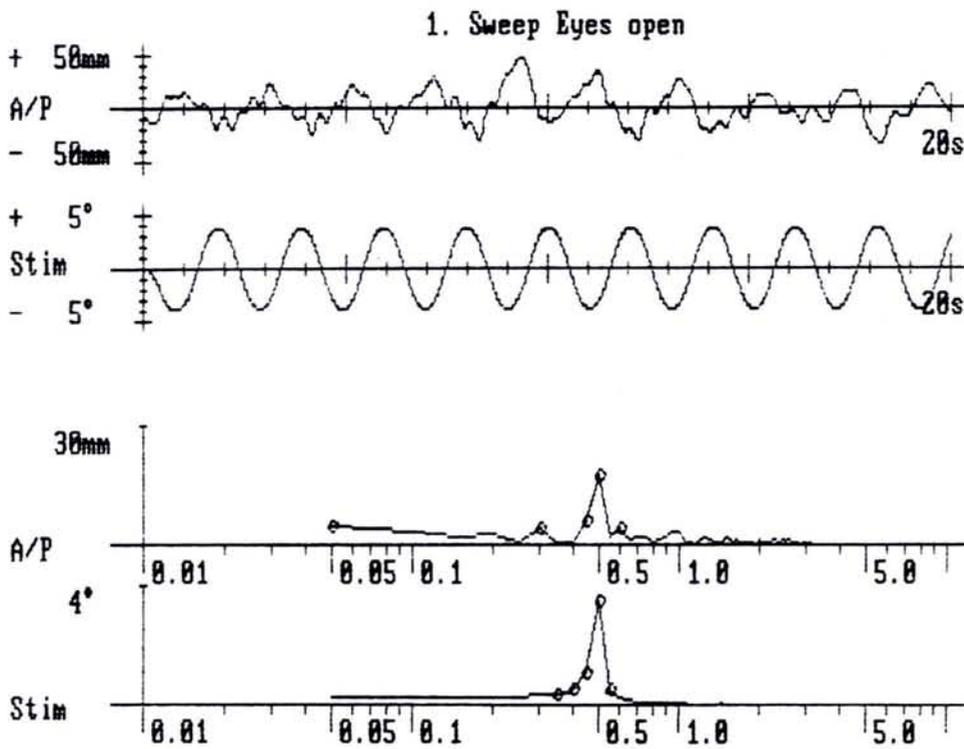
### III - 1.1.2 - Epreuves dynamiques avec oscillations sinusoïdales lentes du support

Cette investigation posturographique, visant à déterminer le type de stratégie de coordination sensori-motrice privilégiée par le sujet pour réguler son état d'équilibre, soumet le sujet à un mouvement d'oscillations sinusoïdales lentes du support, dans le plan antéropostérieur, de 4° d'amplitude à la fréquence de 0,5 Hertz. On enregistre ainsi l'adaptation posturale du sujet à cette situation déstabilisante, en condition YO puis YF (Diener & Dichgans, 1988), pendant 20 secondes après une période d'adaptation de 2 à 3 secondes. Après cette courte phase d'adaptation, l'équilibre est essentiellement régulé par un rétrocontrôle positif provenant d'une activation programmée des muscles des membres inférieurs (Dietz *et al.*, 1993).

Les déplacements linéaires du CPP et leur transformée de Fourier ont été enregistrés. La transformée de Fourier exprime la répartition fréquentielle de l'amplitude et de la phase des déplacements du CPP ; elle est représentée graphiquement sous la forme d'une (ou de plusieurs) raie(s) spectrale(s) caractéristique(s) du signal échantillonné, la fréquence d'oscillation du CPP du sujet étant par ailleurs comparée à celle de la plate-forme. La qualité de la réponse à la déstabilisation va donc être évaluée par le caractère homogène ou non des tracés au cours de l'épreuve (Perrin & Perrin, 1993 ; Perrin *et al.*, 1997a ; Perrin *et al.*, 1997b) :

- Un tracé homogène (type H), isofréquentiel (pic de fréquence d'oscillations du sujet à 0,5 Hz comme celui de la stimulation), en opposition de phase par rapport à la celui de la plate-forme est décrit comme une stratégie de type I (Fig. 8), distoproximale correspondant à une stratégie « ascendante » ou de cheville (Nashner, 1985 ; Horak & Nashner, 1986). Ce type de stratégie traduit une grande stabilité. Cette séquence d'activation du bas vers le haut, utilisée par l'adulte normal en réponse à des perturbations lentes et modérées sur un surface ferme et étendue (Wolfson *et al.*, 1986), déplace le centre de gravité corporel par rotation autour de

l'axe formé par l'articulation de la cheville, le sujet oscillant comme un pendule inversé, les mouvements des genoux et des hanches étant négligeables (Rouanne *et al.*, 1993). Ce type de stratégie est considéré comme anticipatoire (Gauchard *et al.*, 2001b).

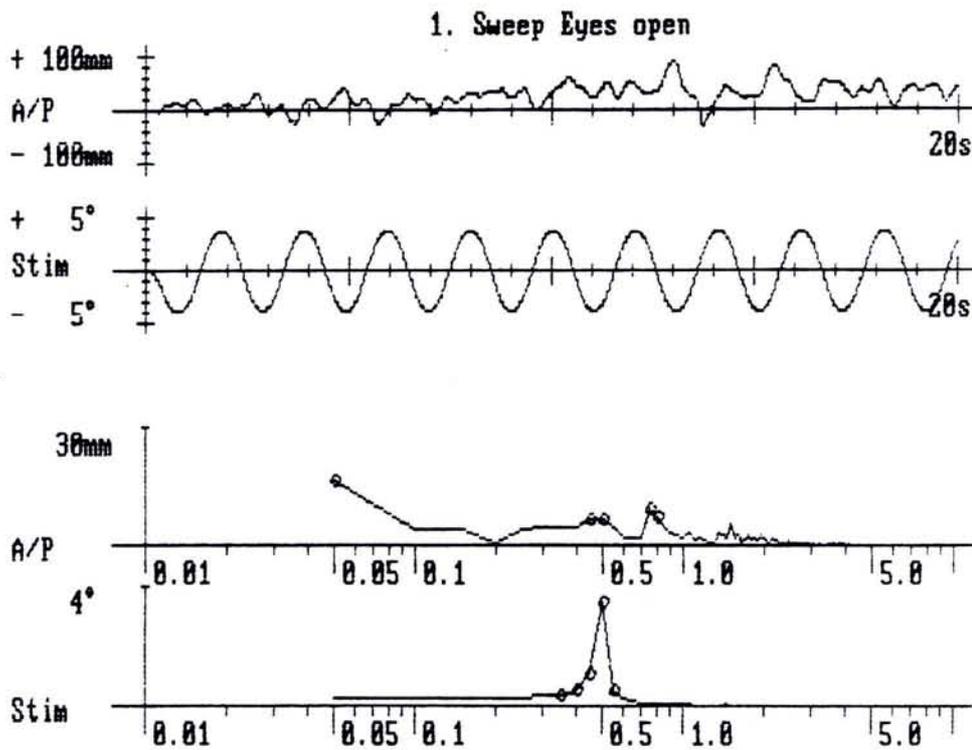


**Fig. 8** – Stratégie de type I.

Tracés obtenus en condition yeux ouverts chez une femme âgée de 45 ans.

- Un tracé inhomogène (type NH) traduit le recours à un changement de stratégie et est décrit comme une stratégie de type II (Fig. 9). témoin d'une certaine instabilité, et se traduisant par une séquence d'activation musculaire proximodistale, correspondant à une stratégie « descendante » ou de hanche (Nashner, 1985 ; Horak & Nashner, 1986). Le pic de fréquence d'oscillations du sujet à 0,5 Hz existe mais n'est plus le pic principal, d'autres pics apparaissant en effet principalement dans les basses fréquences. Cette stratégie favorise un ancrage visuel et un référentiel vestibulaire, impliquant des mouvements de hanches et de nombreuses autres articulations qui vont repositionner le centre de gravité à l'intérieur du

polygone de sustentation. Ces mouvements, qui transmettent les forces de cisaillement à la surface portante, créent un risque de chute lorsque le sol est glissant (Horak *et al.*, 1989). Ce type de stratégie est considéré comme réactionnelle (Gauchard *et al.*, 2001b).



**Fig. 9 – Stratégie de type II.**

Tracés obtenus en condition yeux ouverts chez une femme âgée de 45 ans.

- La stratégie, conduisant à terme à une chute si le sujet ne fait pas un pas pour se rétablir, correspond à la stratégie du trébuchement ou « Stepping Strategy » (Horak & Nashner, 1986). Cette stratégie du pas réaligne la base du support sous la nouvelle position du centre de gravité par des pas rapides, des sauts ou un trébuchement. L'adulte emploie ce type de stratégie sensorimotrice en réponse à des perturbations très fortes et très brusques.

Ces épreuves de posturographie dynamique avec oscillations lentes du support sollicitent les trois types de capteurs (visuel, vestibulaire et somesthésique) et permettent d'apprécier

l'influence de facteurs intrinsèques et extrinsèques sur l'utilisation des différentes entrées sensorielles lors du maintien de la posture orthostatique stable ou lors de réactions de rattrapage de l'équilibre consécutives à des déstabilisations quantifiées induites par la plateforme.

### **III - 1.2 - Plate-forme de posturographie dynamique informatisée (EquiTest)**

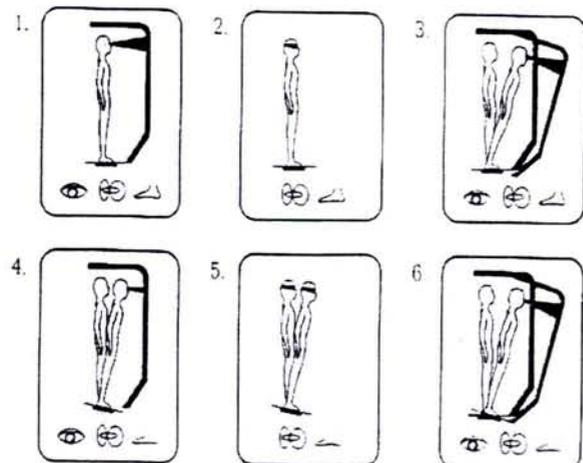
Les analyses informatisées des mouvements du corps et des réponses musculaires permettent de déterminer la vitesse des ajustements posturaux et les stratégies mises en jeu par un sujet (Nashner & McCollum, 1985 ; Kleiber *et al.*, 1990 ; Ledin *et al.*, 1990). EquiTest (NeuroCom®, Clackamas, Oregon, USA) est un outil généralement utilisé pour décrire les biomécanismes de la sensorimotricité et du contrôle postural (Voorhees, 1989 et 1990). La posturographie dynamique est également utilisée pour caractériser les aspects développementaux du contrôle postural, les biomécanismes de la posture statique et dynamique soumise à différentes conditions environnementales et les physiopathologies d'entités cliniques spécifiques (Woollacott *et al.*, 1986 ; Horak *et al.*, 1988). Cet outil utilise une technique appelée posturographie dynamique informatisée qui analyse les possibilités d'un sujet à maintenir ou à retrouver l'équilibre dans une suite de tests reproduisant les situations complexes que le sujet peut rencontrer dans la vie courante. Le principe du test repose sur le fait qu'en position debout sur une surface plane un peu plus grande que les pieds, l'équilibre se fait grâce à des oscillations du corps dans le sens antéro-postérieur autour de l'axe passant par l'articulation des chevilles. Ces oscillations autour d'un axe vertical ne peuvent dépasser une amplitude de 8,5 degrés en avant et de 4 en arrière : au-delà de cette limite le sujet est obligé d'avancer un pied pour éviter la chute.

EquiTest est composé d'une plate-forme munie de capteurs de force (Fig. 10). Cette plate-forme est soit fixe, soit mobile avec les mouvements du sujet, qui lui imprime des mouvements de bascule antérieurs ou postérieurs exactement proportionnels à ces oscillations. Les capteurs détectent les oscillations du sujet, exercées par ses pieds pour assurer le maintien de son équilibre.



**Fig. 10** – Plate-forme de posturographie dynamique informatisée.  
(EquiTest, NeuroCom International, Inc., Clackamas, OR).

**Fig. 11** – Les six conditions du test d'organisation sensorielle (SOT).  
(EquiTest, NeuroCom International, Inc., Clackamas, OR).



Lorsque la plate-forme est mobile de façon synchrone aux mouvements du sujet, elle est dite asservie et donne ainsi au sujet, par l'intermédiaire de la proprioception, l'impression de ne pas osciller.

Un panorama visuel englobe le sujet sur le devant et les côtés. Celui-ci est également soit fixe, soit mobile avec les oscillations du sujet grâce aux informations fournies par la plate-forme. Dans ce dernier cas, la vision est dite faussée.

### **III - 1.2.1 - Test d'organisation sensorielle (SOT)**

Dans le test d'organisation sensorielle (SOT), les informations visuelles et somato-sensorielles sont modifiées pour évaluer la capacité du sujet :

- à utiliser chacune des entrées visuelles, vestibulaires et proprio-extéroceptives pour contrôler sa position (Black *et al.*, 1983 ; Nashner *et al.*, 1989).
- à supprimer chacune des afférences donnant des informations d'orientation inexactes (Nashner, 1976 ; Nashner & Berthoz, 1978).

Le sujet est testé dans six conditions sensorielles différentes (Fig. 11 ; Tableau I). Dans les trois premières, la plate-forme est fixe :

Première condition : la plate-forme et le panorama sont fixes et le sujet a les yeux ouverts. Le sujet dispose alors des informations visuelles, vestibulaires et proprioceptives toutes concordantes.

Deuxième condition : la plate-forme et le panorama sont fixes, mais cette fois-ci, le sujet a les yeux fermés. Le patient ne dispose que des informations vestibulaires et proprioceptives.

Troisième condition : la plate-forme est fixe et la vision est stabilisée. Le panorama suit très exactement les oscillations du sujet, donnant par là même à son système visuel une fausse information d'immobilité.

Dans les trois conditions suivantes, la plate-forme est asservie aux oscillations antéro-postérieures du sujet donnant à son système proprioceptif la fausse impression d'une absence d'oscillation.

Quatrième condition : la plate-forme est asservie, le panorama est fixe et le sujet a les yeux ouverts. Pour maintenir son équilibre, le sujet dispose des informations visuelles et vestibulaires et des informations contradictoires d'immobilité fournies par le système proprioceptif.

Cinquième condition : la plate-forme est asservie et le sujet a les yeux fermés. Il y a un conflit entre les informations vestibulaires et proprioceptives et une absence d'informations visuelles.

Sixième condition : la plate-forme est asservie et la vision stabilisée. Il y a donc un conflit entre les informations vestibulaires qui rendent compte de l'oscillation du sujet et les informations erronées provenant des entrées visuelles et proprioceptives.

**Tableau I.** Les six conditions du test d'organisation sensorielle (SOT)(EquiTest, NeuroCom International, Inc., Clackamas, OR).

CONDITION	PANORAMA	PLATE-FORME	INFORMATIONS	
			exactes	trompées
1	Fixe	Fixe	Vis,vest,prop	...
2	Yeux fermés	Fixe	Vest,prop	...
3	Asservie	Fixe	Vest,prop	Vis
4	Fixe	Asservie	Vis,vest	Prop
5	Yeux fermés	Asservie	Vest	Prop
6	Asservie	Asservie	Vest	Vis,prop

vis = visuelles      vest = vestibulaires      prop = proprioceptives

### **III – 1.2.1.a Procédure du SOT**

Les six conditions du SOT ont été réalisées chez tous les sujets. Pendant les 20 secondes de chaque essai, il a été demandé au sujet de rester bien droit, les bras ballants le long du corps et de fixer un point du panorama (adapté à la taille du sujet) ou bien au contraire, de fermer les yeux, en fonction de la condition donnée. Les conditions 3, 4, 5 et 6 qui sont des conditions dynamiques, ont fait l'objet de trois essais entrecoupés d'une pause d'environ 15 secondes. A l'inverse, les conditions statiques 1 et 2, dites de référence, n'ont pas été répétées, puisque généralement les scores d'équilibre obtenus lors de ces deux conditions sont très élevés lors du premier essai [sauf troubles graves de l'équilibre (Nashner & Peters, 1990), sous-entendant ainsi un effet de l'apprentissage peu significatif, voire nul, sur les essais suivants.

### **III – 1.2.1.b Expression des résultats du SOT**

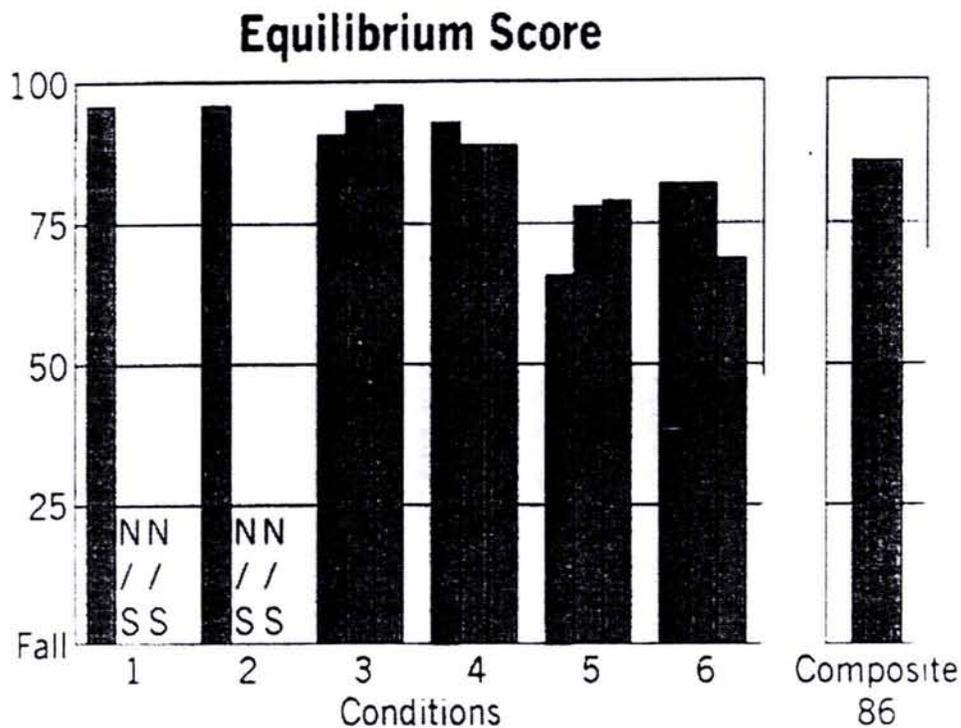
- Le score d'équilibre (ES) d'une condition SOT est une mesure de la stabilité posturale calculée à partir des oscillations du sujet et notamment de celles de son centre de pression des pieds dans le plan sagittal (Nashner & Peters, 1990 ; Shepard *et al.*, 1993). Il compare l'amplitude maximum des oscillations du sujet à sa limite de stabilité à partir de cette formule :

$$\underline{ES} = [12.5^\circ - (\theta_{\max} - \theta_{\min}) / 12.5] * 100$$

Le score est de 100 en l'absence d'oscillations et de 0 si ces dernières dépassent les limites de stabilité théorique (8,5 degrés en avant et 4 degrés en arrière) (Nashner *et al.*, 1982). Il est représenté par un histogramme de barres (Fig. 12) où chaque barre représente le score d'un essai d'une condition donnée ; le fond grisé représente, quant à lui, les valeurs normatives (score accompli par 95 % des sujets normaux de référence, soit le cinquième percentile) (Friedman *et al.*, 1988).

# Sensory Organization Test

(Sway Referenced Gain: 1.0)



**Fig. 12** - Scores d'équilibre lors des six conditions du SOT, sujet de 22 ans (EquiTest, NeuroCom International, Inc., Clackamas, OR).

Afin d'identifier le poids relatif de chaque système sensoriel dans le contrôle postural, les ratios condition 2 / condition 1 (RSOM), condition 4 / condition 1 (RVIS) et condition 5 / condition 1 (RVEST) sont calculés et interprétés comme reflétant respectivement les fonctions somatosensorielle, visuelle et vestibulaire. L'effet d'une préférence visuelle (RPREF) sur le contrôle postural a également été calculé par le ratio conditions 3+6 sur conditions 2+5 et l'effet de la proprioception faussée (RAPI) à travers le ratio conditions 4+5+6 sur conditions 1+2+3 (Black *et al.*, 1995).

### III - 1.2.2 - Test de contrôle moteur (MCT)

Le test moteur évalue les réactions motrices, automatiques provoquées par une perturbation brusque et imprévisible de la surface de support et teste ainsi:

- l'intégrité du contrôle automatique de la posture (cortex, tronc cérébral et voies spinales)  
- la capacité du sujet :

- à sélectionner un modèle (pattern) et une amplitude appropriés du mouvement.
- à exécuter rapidement le mouvement,
- à s'adapter à des mouvements imprévisibles.

#### III – 1.2.2.a Procédure du MCT

Les séquences de translations de la plate-forme, d'amplitudes variables que ce soit vers l'avant ou l'arrière, provoquent des réponses posturales réflexes. Le sujet subit trois soudaines translations vers l'avant (F) puis vers l'arrière (B), de petite (S), moyenne (M) et grande (L) amplitude. L'amplitude des translations est calibrée par rapport à la taille des sujets (tableau II).

**Tableau II.** Procédure du test de contrôle moteur.

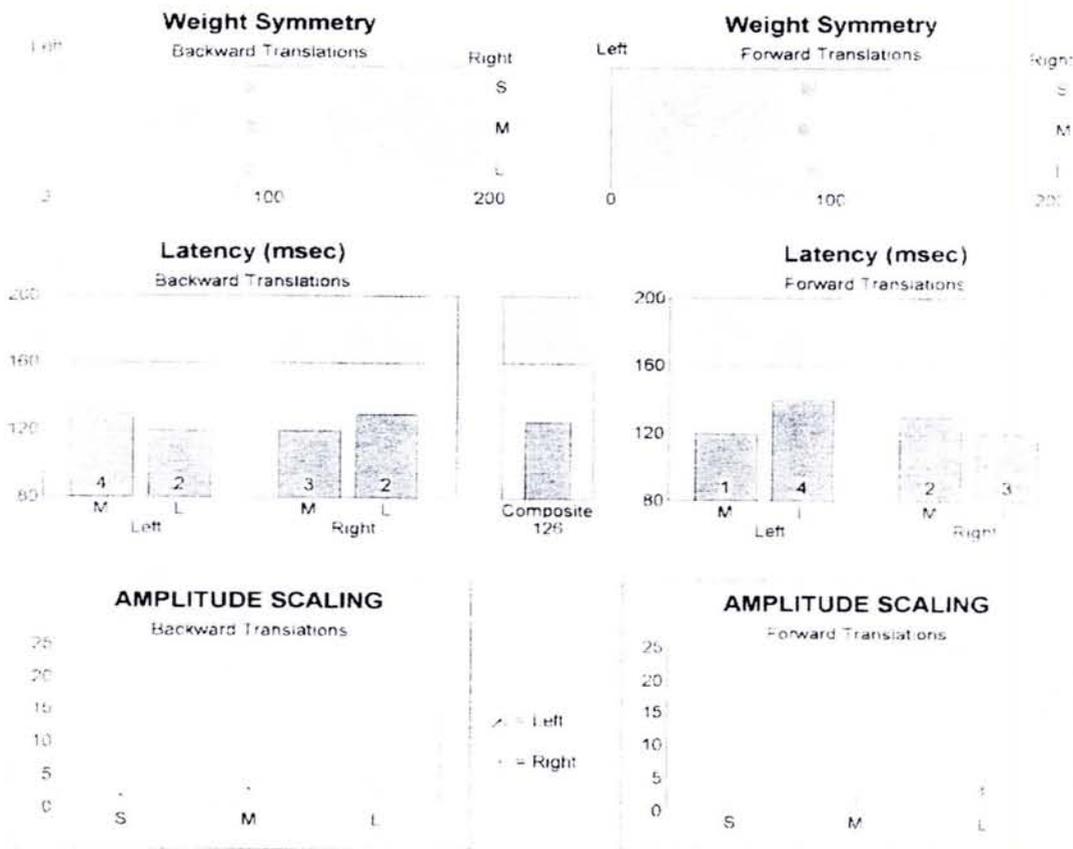
Translations	Nombre	Durée	Amplitude	Oscillation
Faible	3	250 ms	0,5 x (taille/72)	0,7°
Moyenne	3	300 ms	1,25 x (taille/72)	1,8°
Grande	3	400 ms	2,25 x (taille/72)	3,2°

### III – 1.2.2.b Expression des résultats du MCT

Les mesures indiquent la symétrie de la répartition du poids, la vitesse de réaction (latence) et la force et la symétrie de la réponse (Fig. 13).

- La latence (L), exprimée en millisecondes, est définie comme étant le temps qui s'écoule entre le début de la translation et le début d'une réponse active du sujet face à un mouvement de la surface de support.

- Le score composite de latence (LCS) reflète le temps de latence moyen pour les deux jambes et dans les deux directions.



Data Range Note: User Data Range: 20--59

Post Test Comment

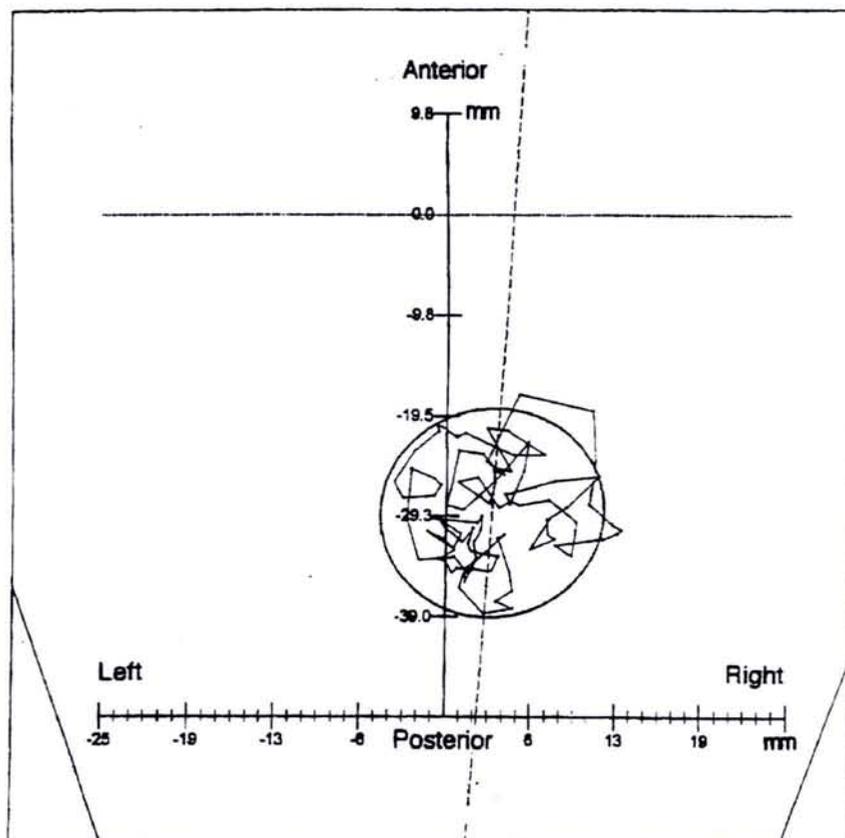
**Fig. 13** - Symétrie de la répartition du poids, vitesse de réaction (latence) et force et symétrie de la réponse neuromusculaire lors de translations du support de petite (S), moyenne (M) et grande (L) amplitude vers l'arrière (Backward) et vers l'avant (Forward).

### III - 1.3 - Plate-forme QFP

Des épreuves de posturographie statique ont également été réalisées sur une plate-forme de forces verticales (QFP Systèmes, Nice, France) à partir de laquelle sont enregistrées les positions du centre de pression des pieds (CPP) et ses déplacements durant 20 secondes (Fig. 14) à une fréquence d'échantillonnage de 40 Hz. Cette plate-forme, composée d'un plateau reposant sur 3 ponts de jauge avec une électronique basée sur un convertisseur analogique / numérique 16 bits et isolée électriquement du PC par pont optique, était couplée au logiciel d'exploitation WinPosture 2000. Les caractéristiques métrologiques du convertisseur ont permis une précision de l'ordre de 0,1 mm. La longueur parcourue et la surface couverte par les déplacements du CPP ont été enregistrées. La surface prise en compte est une ellipse de confiance englobant 90 % des points enregistrés. Cette procédure permet d'éliminer 10 % des points extrêmes qui peuvent être causés par des mouvements parasites et qui ne reflètent pas la régulation posturale (Lacour *et al.*, 1997). Il a été demandé à chacun des sujets en position orthostatique sur la plate-forme, les pieds nus au niveau des repères, les bras le long du corps, respirant normalement sans inspiration ni expiration forcée, de rester le plus stable et le plus détendu possible, la tête dans l'axe d'une cible à hauteur des yeux placée 2 mètres devant eux durant la durée des enregistrements.

L'ensemble des sujets a été testé lors de six conditions de difficulté croissante évaluant leur capacité à utiliser efficacement les afférences sensorielles et à supprimer celles qui n'étaient pas appropriées. Pour fausser les informations, les afférences somatosensorielles ont été altérées en plaçant sur la plate-forme un support en mousse d'une épaisseur de 3 mm (ORTHOMIC, Sidas, France). Ce dernier perturbe à la fois les informations en provenance des récepteurs plantaires et les paramètres biomécaniques des réactions de rééquilibration, augmentant ainsi le poids des autres entrées sensorielles (Perrin *et al.*, 1998). Les informations visuelles ont été asservies aux déplacements de la tête des sujets par le port d'un

masque opaque et solidaire des mouvements de la tête. Dans les trois premières conditions (C1-C3), les informations somatosensorielles ne sont pas altérées et les afférences visuelles sont présentes (C1), absentes (C2) ou asservies (C3). Dans les trois dernières conditions (C4-C6), les informations somatosensorielles sont faussées et les afférences visuelles sont respectivement présentes (C4), absentes (C5) ou asservies (C6). Cette méthodologie, qui constitue une version adaptée à une plate-forme ambulatoire du SOT (EquiTest, NeuroCom International, Inc., Clackamas, OR), s'apparente au Clinical Test for Sensory Interaction in Balance (CTSIB) (Shumway-Cook & Horak, 1986 ; Herdman, 1994).



**Fig. 14** – *Posturographie statique, statokinésigramme (Médiacapteurs - QFP Systèmes Nice).*  
 Longueur parcourue (ligne brisée) et surface couverte (ellipse de confiance à 90%) par le centre de pression des pieds.

Afin d'évaluer la capacité du sujet à s'adapter et à ajuster sa performance motrice correctement et rapidement aux contraintes internes et externes, un score global d'équilibre ( $S^{GE}$ ) est calculé en faisant indépendamment la moyenne des surfaces décrites lors des conditions 1 et 2 auxquelles on ajoute les surfaces enregistrées lors des conditions 3, 4, 5, 6. On divise alors cette somme par le nombre total de conditions.

### **III - 2 - Agréments**

Les tests posturographiques ont été effectués dans le laboratoire « Equilibration et Performance Motrice », au Centre Hospitalier Universitaire de Nancy, dans des locaux habilités pour l'expérimentation sur sujets sains, placés sous la direction du Professeur Philippe Perrin. Les protocoles ont suivi les recommandations du Comité Consultatif de Protection des Personnes se prêtant à des Recherches Biomédicales de Lorraine et le consentement éclairé de chaque sujet a été recueilli.

# **IV - PROTOCOLE 1 : IDENTIFICATION DE FACTEURS INDIVIDUELS POSTURAUX A L'ORIGINE DE TROUBLES DE L'EQUILIBRE**

Ce travail a fait l'objet d'une publication parue en 2004 dans **Neuroscience Research** 48:239-247.

## **IV - 1 - Rappels**

Les chutes, qui constituent un véritable problème de santé publique touchant à la fois les personnes âgées mais aussi le monde du travail, réduisent de manière significative la qualité de vie des salariés en causant des blessures physiques, des séquelles psychologiques et en engendrant d'importantes répercussions économiques (Larsson & Bjornstig, 1995 ; Leamon & Murphy, 1995).

Comme cela a été suggéré par des études antérieures chez les personnes âgées, les troubles de l'équilibre, pouvant résulter d'un dysfonctionnement à des niveaux de la régulation posturale, constituent un facteur important de risque de chute (Overstall *et al.*, 1977 ; Tinetti *et al.*, 1988 ; Wallmann, 2001). L'équilibre est une fonction sensorimotrice complexe nécessitant l'intégration d'afférences visuelles, vestibulaires et proprioceptives au niveau des noyaux vestibulaires, conduisant à la mise en œuvre de réponses motrices comme la stabilisation du regard par le biais des réflexes oculaires d'origine visuelle et vestibulaire et la stabilisation de la posture par le biais du réflexe vestibulo-spinal. Lorsque les afférences sensorielles sont réduites ou en conflit, le contrôle postural généralement diminue, mettant en avant l'importance de chacun des systèmes sensoriels (Hayashi *et al.*, 1988 ; Hoshiyama *et al.*, 1993 ; Kuo *et al.*, 1998).

La multitude des facteurs de risque inclus dans les mécanismes de chute et leurs probables effets cumulés complique la prévention de ce type d'accident. Chez les travailleurs, les facteurs extrinsèques concernant l'organisation de l'environnement et du travail sont bien connus ainsi que leur implication dans les mécanismes de chutes (Ledin *et al.*, 1989 ; Gauchard *et al.*, 2001a ; Redfern *et al.*, 2001). La contribution des facteurs intrinsèques dans les mécanismes de chutes a été cependant peu étudiée chez le travailleur et à l'inverse bien définie chez le sujet âgé.

Il a ainsi été démontré, chez la personne âgée, que la prise de médicaments (Blake *et al.*, 1988 ; Yip & Cumming, 1994 ; Spirduso, 1995 ; Ray *et al.*, 2000 ; Schwab *et al.*, 2000 ; Agostini & Tinetti, 2002 ; Miller, 2002 ; Neutel *et al.*, 2002 ; Evans, 2003 ; Huang *et al.*, 2003 ; Lawler *et al.*, 2003 ; Rozenfeld *et al.*, 2003), les maladies chroniques (Tinetti *et al.*, 1988 ; Campbell *et al.*, 1989 ; Lord *et al.*, 2001), les syncopes (Tinetti *et al.*, 1988), l'instabilité posturale (Overstall *et al.*, 1977 ; Okozumi *et al.*, 1996), des troubles de la vision (Okozumi *et al.*, 1996), de la cognition (Tinetti *et al.*, 1986 ; Tinetti *et al.*, 1988), une faiblesse musculaire (Whipple *et al.*, 1987 ; Lord *et al.*, 1993 ; Shumway-Cook *et al.*, 1997), l'arthrose (Tinetti *et al.*, 1986 ; Campbell *et al.*, 1989), des troubles podologiques (Tinetti *et al.*, 1988 ; Menz & Lord, 2001) ou encore des déficits sensorimoteurs (Stelmach & Worringham, 1985 ; Lord *et al.*, 1991 ; Lord *et al.*, 1994a ; Lord *et al.*, 1994b ; Lord *et al.*, 2001) constituent des facteurs intrinsèques connus de risque de chutes. Au niveau de la régulation posturale, la contribution relative des afférences visuelles augmente avec l'âge (Pyykkö *et al.*, 1988). De plus, une diminution de la qualité de l'information proprioceptive (Skinner *et al.*, 1984 ; Assaiante & Amblard, 1995) et de l'utilisation appropriée du capteur vestibulaire dans la résolution de situations de conflit sensoriel (Woollacott *et al.*, 1986 ; Cohen *et al.*, 1996 ; Gauchard *et al.*, 2003b) apparaît avec l'âge. Toutes ces modifications conduisent à une diminution de la qualité du contrôle postural et à une augmentation du

nombre de chutes (Peterka & Black, 1990 ; Lord *et al.*, 1991 ; Colledge *et al.*, 1994 ; Perrin *et al.*, 1997). De plus, la réalisation d'une double-tâche peut devenir un facteur de risque de chute par ses conséquences sur les ajustements posturaux (Lajoie *et al.*, 1993; McIlroy and Maki, 1995 ; Jamet *et al.*, 2004) et sur la résolution des situations de conflits sensoriels. Les interférences cognitives vont en effet être à l'origine de réponses motrices inadaptées et de déséquilibres (Maki & McIlroy, 1996 ; Rankin *et al.*, 2000).

Concernant le travailleur, il a été démontré qu'une fatigue excessive résultant d'une activité soutenue pouvait compromettre une régulation posturale efficace par le système nerveux central (Nussbaum, 2003). En effet, la fatigue augmente le temps de latence des réponses neuromusculaires (Balestra *et al.*, 1992 ; Nicol *et al.*, 2003 ; Hug *et al.*, 2004) affectant ainsi les mécanismes réactifs du contrôle postural pour faire face à une déstabilisation et est responsable d'une dégradation du contrôle postural (Seliga *et al.*, 1991 ; Nardone *et al.*, 1997 ; Nardone *et al.*, 1998 ; Gauchard *et al.*, 2002 ; Caron, 2003 ; Corbeil *et al.*, 2003 ; Ledin *et al.*, 2004). Les sujets présentant un état de fatigue important ont d'ailleurs un risque plus élevé d'accidents causés par une chute (Sparto *et al.*, 1997 ; Johnston *et al.*, 1998 ; Swaen *et al.*, 2003). D'autres facteurs individuels tels que la surcharge pondérale (Froom *et al.*, 1996; Chau *et al.*, 2004), l'état physique (Davis, 1983), le sexe (Loomis *et al.*, 1997; Kemmlert and Lundholm, 1998), l'âge (Agnew and Suruda, 1993 ; Kingma, 1994), fumer, consommer régulièrement de l'alcool, présenter de troubles du sommeil ou encore ne pas pratiquer d'activités physiques et sportives (Chau *et al.*, 2002; Gauchard *et al.*, 2003a) sont autant de facteurs augmentant le risque de pertes d'équilibre et par conséquent d'accidents causés par une chute.

La contribution des facteurs individuels posturaux dans les mécanismes d'accident de type chute n'a reçu que peu d'attention malgré le risque important d'exposition aux glissades et aux chutes. Du fait que l'habileté du sujet à contrôler sa posture et à se restabiliser est

nécessaire dans le processus d'évitement des chutes (Redfern & Bloswick, 1997 ; Grönqvist *et al.*, 2001b), une hypothèse pourrait être que les travailleurs qui chutent, ont d'importantes difficultés dans le maintien et l'ajustement de leur posture face à de nouvelles tâches motrices et à de nouvelles contraintes environnementales auxquelles ils sont continuellement confrontés dans leurs activités professionnelles.

L'identification des facteurs de risque posturaux associés aux chutes est indispensable à la mise en œuvre de mesures préventives. Alors qu'une multitude de profils physiologiques de sujets à risque a été développé au sein de la population âgée (O'Loughing *et al.*, 1993 ; Tinetti *et al.*, 1988 ; Nevitt *et al.*, 1989 ; Campbell *et al.*, 1989 ; Stalenhoef *et al.*, 1997 ; Stalenhoef *et al.*, 1999 ; Shumway-Cook *et al.*, 2000 ; Stalenhoef *et al.*, 2000 ; Pluijm *et al.*, 2001 ; Tromp *et al.*, 2001 ; Boulgarides *et al.*, 2003 ; Lord *et al.*, 2003 ; Stel *et al.*, 2003 ; Lajoie & Gallagher, 2004), il n'existe, à notre connaissance, aucune étude identifiant les facteurs de risque posturaux chez l'homme au travail.

Le but de cette étude est donc de déterminer en quoi certains facteurs posturaux, en terme de stratégies sensorielles et de réponses neuromusculaires, influencent la survenue et la récurrence de chutes et par conséquent peuvent être utilisés dans des approches préventives visant à détecter les travailleurs à risque.

## **IV - 2 - Sujets**

Cette étude « cas-témoins » a été menée au Centre Hospitalier Universitaire de Nancy chez le personnel féminin (infirmières et aides-soignantes) en collaboration avec les médecins du travail. Les « sujets chuteurs » étaient des personnels féminins salariés de cet hôpital depuis au moins trois ans et qui avaient été victimes d'au moins un accident du travail causé par une chute. L'échantillon de ces sujets chuteurs a été divisé en deux groupes :

- un groupe de sujets monochuteurs, MoCh, composé de 43 sujets (âge moyen =  $45,5 \pm 8,1$  ans) victimes d'un seul accident du travail causé par une chute ;

- un groupe de sujets multichuteurs, MuCh, composé de 9 sujets (âge moyen =  $44,9 \pm 7,4$  ans) victimes de deux accidents du travail ou plus, causés par une chute.

Le groupe de sujets témoins, T, était composé de 52 sujets (âge moyen =  $44,6 \pm 6,7$  ans), personnel féminin travaillant aussi depuis au moins trois ans dans cet hôpital mais n'ayant jamais présenté d'accident du travail causé par une chute. Chaque sujet témoin a été sélectionné de manière à être le plus proche d'un sujet chuteur au niveau de l'âge ( $\pm 5$  ans), du grade, du service et des horaires de travail.

Cette étude a été approuvée par le *Comité de Protection des Personnes qui se prêtent aux Recherches Biomédicales de Lorraine* et par la *Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés*. Tous les sujets ont signé le consentement éclairé relatif à cette étude. Aucune différence significative concernant le poids, la taille et l'indice de masse corporelle (IMC) n'est apparue entre le groupe témoin et les groupes chuteurs (Tableau III). Les sujets étaient indemnes de pathologies du système nerveux central et n'ont pas présenté de traumatisme du tronc ou des membres inférieurs pouvant interférer avec la performance posturale.

**Tableau III.** Moyennes (m) et déviations standard (DS) concernant l'âge (années), la taille (cm), le poids (kg) et l'indice de masse corporelle (IMC,  $\text{kg/m}^2$ ) pour les groupes MuCh, MoCh et T. NS = Non significatif.

	Groupes			<i>F test</i>	ANOVA		
	MuCh	MoCh	T		Test de Bonferroni		
	<i>n</i> = 9	<i>n</i> = 43	<i>n</i> = 52		MuCh/T	MoCh/T	MuCh/MoCh
	<i>m</i> (DS)	<i>m</i> (DS)	<i>m</i> (DS)	<i>F</i> ( <i>P</i> )	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>
Age	45,55 (8,16)	44,97 (7,46)	44,63 (6,73)	0,07 (NS)	NS	NS	NS
Taille	165,66 (8,53)	161,07 (7,00)	162,44 (4,98)	2,15 (NS)	NS	NS	NS
Poids	66,22 (9,72)	64,23 (11,07)	62,08 (10,28)	0,86 (NS)	NS	NS	NS
IMC	24,08 (3,06)	24,83 (4,27)	23,64 (3,65)	1,11 (NS)	NS	NS	NS

### **IV - 3 - Procédure**

Tous ces sujets ont été soumis aux deux tests posturographiques statique et dynamique avec oscillations sinusoïdales lentes sur la plate-forme Toennies et au SOT et MCT sur la plate-forme EquiTest, présentés précédemment (§III, pp. 23-38). Il est à noter qu'un second SOT avec tâche cognitive (en l'occurrence, un décompte mental à haute voix de sept en sept) a été réalisé après le MCT.

Lors des épreuves posturographiques statiques, les statokinésigrammes obtenus ont permis de mesurer la longueur totale parcourue par les déplacements du CPP, correspondant à la dépense d'énergie pour réguler le contrôle de l'équilibre, et la surface décrite, correspondant à la précision du contrôle postural, ainsi que les oscillations antéropostérieures et latérales. La quantification du poids de l'afférence visuelle a également été déterminée par le quotient de Romberg.

Lors des épreuves posturographiques dynamiques avec oscillations sinusoïdales lentes du support, différents types de stratégies sensorimotrices ont été déterminés selon le caractère homogène ou non des réponses (Type I, Type II). Des chutes ont été rapportées quand le sujet sollicitait une aide extérieure notamment de l'examineur situé à ses côtés durant toute la durée du test.

Lors du SOT avec ou sans tâche cognitive, les scores d'équilibre pour chaque condition, le score composite global ainsi que les ratios somesthésique, visuel, vestibulaire, préférence visuelle et proprioception faussée ont été calculés. Enfin, lors du MCT, les latences des réponses neuromusculaires face aux perturbations du support et le score composite de latence ont été déterminés.

Deux méthodes d'analyse statistique ont été mises en œuvre, la première sur des indices qualitatifs, la seconde sur des indices discrétisés.

## IV - 4 - Première méthode d'analyse des données

Les statistiques ont été réalisées avec le logiciel Stata 5.0 software (Stata Corporation, College Station, Texas). Les comparaisons entre les trois groupes ont été faites au moyen d'une analyse de variance pour les tests statiques, d'organisation sensorielle et de contrôle moteur. Une valeur du paramètre surface yeux fermés et une valeur du paramètre quotient de Romberg surface ont été exclues de l'analyse parce qu'elles étaient supérieures à la moyenne de plus de 3 écarts-types. Pour chaque valeur significative de  $F$ , une comparaison 2 par 2 a été réalisée au moyen du test de Bonferroni. Pour le test sinusoïdal lent, la comparaison des fréquences a été faite grâce au test exact de Fisher. La significativité statistique a été considérée à  $P$  inférieur à 0,05.

### IV - 4.a - Résultats

Le tableau IV montre les résultats obtenus lors du test statique. La valeur la plus basse pour le paramètre surface a été observée chez les témoins alors que la plus haute a été notée chez les multichuteurs. Les différences statistiquement significatives sont apparues en condition yeux fermés entre les groupes MuCh et T ( $P = 0,009$ ) et les groupes MuCh et MoCh ( $P = 0,01$ ). La même tendance a été observée pour le paramètre oscillations latérales et les différences statistiquement significatives en condition yeux fermés sont apparues entre les groupes MuCh et T ( $P = 0,002$ ) et les groupes MuCh et MoCh ( $P = 0,01$ ). Bien que nos résultats mettent en avant pour les autres paramètres une hiérarchie, des valeurs les plus élevées aux valeurs les plus basses, MuCh, MoCh et T, aucune différence significative pour les paramètres longueur, oscillations antéropostérieures, quotient de Romberg longueur et surface n'est apparue entre les trois groupes.

Le tableau V montre les résultats obtenus lors du test dynamique lent. En condition yeux ouverts, même si les stratégies homogènes de type 1 sont prédominantes dans les trois

groupes, les multichuteurs ont mis en oeuvre moins de stratégies stables et aucun des participants des trois groupes n'a présenté de chute. Des différences significatives concernant ces stratégies ont été observées entre les groupes MuCh et T ( $P = 0,003$ ) et les groupes MoCh et T ( $P = 0,01$ ). Lors du test en condition yeux fermés, la fréquence des stratégies homogènes de type 1 a diminué dans les trois groupes. Cette diminution a été significativement plus importante chez les groupes de sujets chuteurs que chez les témoins. Plusieurs chutes au sein des groupes MuCh et MoCh ont été notées, alors qu'aucune n'est apparue dans le groupe des témoins. Des différences très significatives concernant ces stratégies sont apparues entre les groupes MuCh et T ( $P = 0,0001$ ), les groupes MoCh et T ( $P = 0,005$ ) et les groupes MuCh et MoCh ( $P = 0,0001$ ).

**Tableau IV.** Test statique : Moyennes (m) et déviations standard (DS) concernant les paramètres longueur (Lg), surface (S), oscillations latérales (Lat) et antéropostérieures (AP) en condition yeux ouverts (YO) et yeux fermés (YF) et les quotients de Romberg (QR) pour les groupes MuCh, MoCh et T. NS = Non significatif.

		Groupes			ANOVA			
		MuCh	MoCh	T	<i>F test</i>	Test de Bonferroni		
		<i>n</i> = 9	<i>n</i> = 43	<i>n</i> = 52		MuCh/T	MoCh/T	MuCh/ MoCh
		<i>m</i> (DS)	<i>m</i> (DS)	<i>m</i> (DS)	<i>F</i> ( <i>P</i> )	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>
Lg/s (cm)	YO	0,80 (0,19)	0,74 (0,18)	0,72 (0,19)	0,80 (NS)	NS	NS	NS
	YF	1,30 (0,55)	1,09 (0,32)	1,10 (0,44)	1,07 (NS)	NS	NS	NS
S/s (cm <sup>2</sup> )	YO	0,31 (0,26)	0,28 (0,27)	0,29 (0,19)	0,06 (NS)	NS	NS	NS
	YF	0,97 (1,29)	0,45 (0,41)	0,43 (0,28)	4,75 (0,01)	0,009	NS	0,01
AP/s (cm)	YO	0,12 (0,05)	0,11 (0,06)	0,13 (0,06)	0,48 (NS)	NS	NS	NS
	YF	0,23 (0,10)	0,22 (0,10)	0,25 (0,14)	0,65 (NS)	NS	NS	NS
Lat/s (cm)	YO	0,07 (0,02)	0,07 (0,04)	0,06 (0,03)	1,20 (NS)	NS	NS	NS
	YF	0,12 (0,08)	0,08 (0,05)	0,06 (0,03)	6,41 (0,002)	0,002	NS	0,01
QR Lg		1,63 (0,54)	1,47 (0,38)	1,48 (0,38)	0,68 (NS)	NS	NS	NS
QR S		2,04 (1,29)	1,94 (1,23)	1,67 (0,69)	1,05 (NS)	NS	NS	NS

**Tableau V.** Test dynamique lent : Fréquence moyenne de distribution des trois types de stratégies sensorimotrices observés en condition yeux ouverts (YO) et yeux fermés (YF) pour les groupes MuCh, MoCh et T. NS = Non significatif.

		MuCh	MoCh	T	Test exact de Fisher		
		<i>n</i> = 9	<i>n</i> = 43	<i>n</i> = 52	MuCh/T	MoCh/T	MuCh/MoCh
		% (n)	% (n)	% (n)	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>
YO	Type 1	67 (6)	79 (34)	96 (50)	0,003	0,01	NS
	Type 2	33 (3)	21 (9)	4 (2)			
	Chutes	0 (0)	0 (0)	0 (0)			
YF	Type 1	0 (0)	13 (6)	40 (21)	0,0001	0,005	0,0001
	Type 2	33 (3)	80 (34)	60 (31)			
	Chutes	67 (6)	7 (3)	0 (0)			

Le tableau VI présente les résultats obtenus lors du SOT et du MCT. Au cours du SOT, les valeurs les plus faibles, reflet d'une mauvaise stabilité, ont été notées chez les MuCh et les différences sont apparues significatives lors de la condition 1 entre les groupes MuCh et T ( $P = 0,004$ ), et les groupes MuCh et MoCh ( $P = 0,02$ ), lors de la condition 2 entre les groupes MuCh et T ( $P = 0,006$ ), lors de la condition 5 entre les groupes MuCh et T ( $P = 0,0001$ ), les groupes MoCh et T ( $P = 0,001$ ) et les groupes MuCh et MoCh ( $P = 0,02$ ) et lors de la condition 6 entre les groupes MuCh et T ( $P = 0,0001$ ), les groupes MoCh et T ( $P = 0,003$ ) et les groupes MuCh et MoCh ( $P = 0,007$ ). Plusieurs chutes ont été relevées dans les groupes MuCh (5) et MoCh (9) lors de la condition 5 et dans les groupes MuCh (5) et MoCh (2) lors de la condition 6. Les valeurs les plus faibles concernant le score composite d'équilibre ont été obtenues par les MuCh et des différences sont apparues significatives entre les groupes MuCh et T ( $P = 0,0001$ ), les groupes MoCh et T ( $P = 0,0001$ ), et les groupes MuCh et MoCh ( $P = 0,008$ ). Concernant les divers ratios, les valeurs les plus faibles ont été

obtenues par les MuCh et les différences significatives pour le ratio vestibulaire (RVEST) ont été observées entre les groupes MuCh et T ( $P = 0,0001$ ), les groupes MoCh et T ( $P = 0,001$ ), et les groupes MuCh et MoCh ( $P = 0,04$ ) et pour le ratio proprioception faussée (RAPI) entre les groupes MuCh et T ( $P = 0,0001$ ), les groupes MoCh et T ( $P = 0,001$ ), et les groupes MuCh et MoCh ( $P = 0,02$ ). Une hiérarchie, du moins bon groupe au meilleur, MuCh, MoCh et T peut être proposée au vu des résultats du SOT.

Au cours du MCT, les latences des réponses actives les plus longues lors d'une translation de grande amplitude vers l'arrière sont apparues chez les MuCh et les différences sont apparues significatives entre les groupes MuCh et T ( $P = 0,03$ ), et les groupes MuCh et MoCh ( $P = 0,01$ ). Le score composite de latence (LCS) le plus élevé a été observé chez les MuCh et des différences sont apparues significatives entre les groupes MuCh et T ( $P = 0,04$ ), et les groupes MuCh et MoCh ( $P = 0,006$ ).

#### **IV - 4.b - Discussion**

Dans cette étude, le contrôle postural dynamique des salariés multichuteurs et monochuteurs s'est révélé de faible qualité, particulièrement lors des conditions yeux fermés, mettant ainsi en avant chez ces travailleurs une contribution plus importante de l'afférence visuelle et un déficit dans l'utilisation de la proprioception en comparaison avec les témoins. Les sujets multichuteurs ont également présenté une instabilité posturale statique, un déficit dans l'utilisation du capteur vestibulaire comme système de référence et de grandes difficultés à maintenir une posture adaptée lorsque la proprioception était faussée. De plus, les temps de latence des réponses neuromusculaires des salariés multichuteurs face à une déstabilisation du support sont apparus significativement plus longs. De ce fait, les résultats suivants nous permettent de proposer une hiérarchie du contrôle postural le moins bon au meilleur, multichuteurs, monochuteurs et témoins, suggérant qu'une organisation sensori-motrice spécifique joue un rôle important dans la survenue et la récurrence de chutes.

**Tableau VI.** Test d'organisation sensorielle (SOT) — Moyennes (m) et déviations standard (DS) concernant le score d'équilibre (ES) pour les six conditions, le score composite d'équilibre (CES), le ratio somesthésique (RSOM), visuel (RVIS), vestibulaire (RVEST), le ratio préférence visuelle (RPREF), et le ratio proprioception faussée (RAPI) pour les groupes MuCh, MoCh et T. Test de contrôle moteur (MCT) — Moyennes (m) et déviations standard (DS) concernant la latence de la réponse active (L) lors d'une translation du support de moyenne (M) et grande (L) amplitude vers l'avant (F) et l'arrière (B) et le score composite de latence (LCS) pour les groupes MuCh, MoCh et T. NS = Non significatif.

	Groupes			<i>F</i> test	ANOVA		
	MuCh	MoCh	T		Test de Bonferroni		
	<i>n</i> = 9	<i>n</i> = 43	<i>n</i> = 52		MuCh/T	MoCh/T	MuCh MoCh
<i>SOT</i>	<i>m</i> (DS)	<i>m</i> (DS)	<i>m</i> (DS)	<i>F</i> ( <i>P</i> )	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>
ES 1	93,11 (2,08)	94,86 (1,63)	95,19 (1,76)	5,49 (0,005)	0,004	NS	0,02
ES 2	90,51 (5,16)	92,64 (2,69)	93,46 (1,77)	5,24 (0,006)	0,006	NS	NS
ES 3	88,66 (4,35)	89,98 (6,53)	91,60 (3,71)	1,93 (NS)	NS	NS	NS
ES 4	82,03 (6,28)	84,35 (8,51)	86,83 (4,28)	3,00 (NS)	NS	NS	NS
ES 5	45,74 (19,55)	58,62 (16,72)	69,11 (7,81)	15,3 (0,0001)	0,0001	0,001	0,02
ES 6	50,25 (23,16)	63,78 (12,88)	72,04 (7,50)	15,3 (0,0001)	0,0001	0,003	0,007
CES	70,26 (8,57)	76,98 (7,53)	81,96 (3,33)	18,8 (0,0001)	0,0001	0,0001	0,008
RSOM	97,20 (5,03)	97,66 (2,67)	98,20 (1,77)	0,82 (NS)	NS	NS	NS
RVIS	88,10 (6,47)	88,90 (8,77)	91,23 (4,35)	1,81 (NS)	NS	NS	NS
RVEST	49,17 (21,02)	61,76 (17,60)	72,62 (8,20)	14,17 (0,0001)	0,0001	0,001	0,04
RPREF	103,11 (18,82)	102,37 (10,94)	100,78 (5,46)	0,44 (NS)	NS	NS	NS
RAPI	65,43 (14,12)	74,49 (11,40)	81,37 (5,23)	14,74 (0,0001)	0,0001	0,001	0,02
<i>MCT</i>							
LMF	136,11 (19,81)	129,41 (11,13)	131,92 (12,65)	1,16 (NS)	NS	NS	NS
LLF	130,00 (18,87)	123,48 (13,95)	126,05 (16,64)	0,74 (NS)	NS	NS	NS
LMB	137,77 (17,34)	132,55 (13,38)	135,77 (16,13)	0,74 (NS)	NS	NS	NS
LLB	144,44 (16,48)	129,06 (13,68)	130,86 (14,97)	4,18 (0,01)	0,03	NS	0,01
LCS	140,88 (12,48)	128,62 (8,86)	131,46 (11,31)	5,17 (0,007)	0,04	NS	0,006

La répétition des chutes peut être causée soit par des facteurs intrinsèques, soit par les conséquences des traumatismes relatifs à une chute antérieure. Cette dernière hypothèse ne pourrait être retenue du fait que les sujets atteints de pathologies pouvant affecter négativement le contrôle postural ont été exclus.

Les tests statiques utilisés dans cette étude permettent une évaluation des oscillations du corps et de la dépendance du sujet vis-à-vis de l'afférence visuelle. De nombreuses études ont démontré que l'âge était associé à une plus grande contribution des afférences visuelles (Pyykkö *et al.*, 1988 ; Perrin *et al.*, 1997). Ceci conduit à une réduction de la qualité du

contrôle postural (Lord *et al.*, 1991 ; Perrin *et al.*, 1997) et augmente par conséquent le risque de chutes. Les résultats obtenus en condition yeux fermés dans cette étude indiquent que les sujets multichuteurs ont de grandes difficultés à passer d'une prédominance sensorimotrice basée sur la vision vers la proprioception, suggérant un déficit dans l'usage approprié des afférences somesthésiques dans le contrôle postural et une importante contribution des afférences visuelles chez ces sujets. Les glissades et les trébuchements intervenant subitement, des réponses rapides et appropriées sont nécessaires afin d'éviter la chute. L'information proprioceptive, intégrée à un niveau médullaire, peut générer des réponses motrices rapides de stabilisation alors que l'information visuelle, issue des référentiels environnementaux avec un haut degré d'intégration, génère une réponse certes appropriée mais plus lente. Les stratégies impliquant une contribution visuelle importante apparaissent insuffisantes pour prévenir le risque de chute contrairement à celles impliquant les informations vestibulaires et proprioceptives.

L'utilisation d'une stratégie sensori-motrice spécifique pour réguler l'équilibre dépend du choix des afférences sensorielles (visuelles, vestibulaires et proprioceptives) employées dans la détection des divergences entre la posture planifiée et celle réellement adoptée. Il est admis que les sujets sélectionnent les référentiels sensoriels d'orientation différemment en fonction de leur expérience personnelle (Horak *et al.*, 1994 ; Assaiante & Amblard, 1995) et que les modifications physiologiques liées à l'âge peuvent accentuer ces différences.

La perte de la redondance des afférences sensorielles affecte davantage les salariés chuteurs que les témoins. Lorsque les afférences visuelles ou somatosensorielles sont faussées ou supprimées, les multichuteurs oscillent de manière plus importante que les témoins mais dans leurs limites de stabilité posturale. En fait, une diminution significative du contrôle postural et plusieurs chutes sont intervenues lorsque ces afférences sont faussées en même

temps (test dynamique lent, conditions 5 et 6 du SOT), laissant le capteur vestibulaire comme unique source valable d'informations sensorielles pour la stabilité posturale. En effet, durant ces conditions difficiles, les sujets doivent compenser la perte de la vision et l'absence de la détection proprioceptive par un usage accru du référentiel vestibulaire et/ou corriger leur posture en adoptant une stratégie d'équilibre plus appropriée ce qui implique une réorganisation des différentes composantes du contrôle postural. Plusieurs études sur les chutes chez le sujet âgé ont proposé que les déséquilibres pouvaient s'expliquer par une moindre utilisation du capteur vestibulaire dans la mise en oeuvre des stratégies d'équilibration (Woollacott *et al.*, 1986 ; Cohen *et al.*, 1996). Nos résultats indiquent que les salariés chuteurs sont dépendants du support et des informations visuelles, et qu'ils ne basent pas leur contrôle postural sur le capteur vestibulaire mais adoptent des schémas posturaux qui augmentent le risque de chutes dans des environnements sensoriels spécifiques.

Les afférences vestibulaires jouent un rôle important dans le contrôle des oscillations latérales du corps (Magnusson *et al.*, 1990 ; Kristinsdottir *et al.*, 2000) alors que les afférences proprioceptives contrôlent principalement les oscillations antéropostérieures (Nakagawa *et al.*, 1993). Dans notre étude, les multichuteurs ont démontré un faible contrôle postural dans le plan frontal qui peut s'expliquer par une moindre utilisation du capteur vestibulaire comme référentiel. Dans la continuité, nos résultats sont en accord avec ceux de Maki *et al.*, (1994) indiquant que le contrôle de la stabilité latérale est un bon indice prédictif de risque de chute.

Pour maintenir le centre de gravité au-dessus de la base de support lors de perturbations posturales de nature inattendue, les sujets doivent exécuter convenablement et de manière coordonnée une gamme de mouvements correctifs impliquant les circuits du système automatique de contrôle (Brooks, 1986). Dans notre étude, les multichuteurs ont démontré une faible habilité fonctionnelle à retrouver rapidement leur équilibre suite à des soudaines perturbations externes du support. Ces réponses inappropriées de plus longue latence sont

probablement le résultat d'une moindre utilisation des afférences proprioceptives et vestibulaires comme référentiel (Gauchard *et al.*, 2003), ces dernières étant en effet connues pour activer et moduler les réponses de stabilisation de l'équilibre (Allum & Shepard, 1999).

Le nombre accru de chutes durant les conditions où les afférences visuelles et proprioceptives sont faussées ou absentes peut également être le reflet d'un déficit dans les processus sensorimoteurs bien plus qu'un dysfonctionnement du système vestibulaire périphérique (Wolfson *et al.*, 1992). Afin de maintenir le contrôle postural dans une variété de conditions environnementales, les informations de mouvement issues des systèmes sensoriels doivent être sélectionnées par le système nerveux central (SNC) de manière à ce que les informations fausses ou inappropriées soient ignorées lorsque cela est nécessaire ; le SNC les compare à un modèle interne et génère des commandes motrices correctes aux muscles (Mergner *et al.*, 1997). Par conséquent, il est possible que les processus centraux, qui doivent faire face à des informations sensorielles en conflit, puissent produire des réponses inappropriées basées sur les signaux sensoriels disponibles (Peterka *et al.*, 1990) plaçant ainsi les sujets en déséquilibre.

Dans notre étude, de faibles différences sont apparues entre les trois groupes lors de conditions ne perturbant pas l'équilibre. A l'inverse, l'augmentation de la difficulté des tests, particulièrement l'utilisation de situations de conflit sensoriel s'est accompagnée de différences de régulation posturale beaucoup plus marquées entre les trois groupes. Cette observation doit être prise en compte dans la prévention des accidents de type chute, et les examens visant à détecter d'éventuels sujets à risque devront au minimum placer les individus dans des situations dynamiques, et si possible dans des situations de conflit sensoriel puisqu'elles sont présentes dans le monde du travail et qu'elles peuvent être considérées comme étant à l'origine des accidents du travail.

#### **IV - 4.c - Conclusion**

En conclusion, cette étude a montré que la réorganisation des différentes afférences sensorielles contrôlant l'équilibre, à laquelle les travailleurs sont confrontés sur leur lieu de travail, est moins performante chez les salariés chuteurs, et particulièrement chez les multichuteurs. Cette difficulté à s'adapter et à ajuster le contrôle moteur correctement et rapidement aux contraintes internes et externes changeantes conduit à une instabilité dont la résultante est la plupart du temps la chute. Etant donné que les troubles de l'équilibre sont d'excellents indices prédictifs de chute, la détection précoce d'une organisation sensorielle particulière privilégiant les informations visuelles au détriment des afférences vestibulaires et proprioceptives pourrait limiter le risque d'accident du travail, probablement par le développement d'une approche préventive visant à mieux adapter la tâche au travailleur.

**S.C.D. - U.H.P. NANCY 1**  
**BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES**  
Rue du Jardin Botanique - BP 11  
54601 VILLERS-LES-NANCY Cedex

## IV - 5 - Deuxième méthode d'analyse des données

Pour évaluer le niveau de risque chez les sujets présentant des valeurs « anormales » et ce, pour chaque paramètre, les odds ratios (OR) ainsi que leur 95<sup>ème</sup> percentile et leurs intervalles de confiance (IC) ont été déterminés et comparés à l'aide d'un test exact de Fisher. Les valeurs seuils pour chaque paramètre ont été définies comme représentant le 95<sup>ème</sup> percentile des valeurs du groupe témoin (sujets n'ayant présenté aucune chute). L'ensemble des analyses a été réalisé au moyen des logiciels Stata (Stata, 1997) et Epi Info (Epi Info, 1997). La significativité statistique a été considérée à  $p$  inférieur à 0,05.

### IV - 5.a - Résultats

Le tableau VII montre les 90<sup>èmes</sup> percentiles des valeurs pour chaque paramètre chez les témoins. Le tableau VIII présente quant à lui les odds ratios pour les différents paramètres d'EquiTest. Lorsqu'on compare MoCh à T, les paramètres ayant des odds ratios significatifs sont : ES2 pour le SOT, ES6 et RAPI pour la double-tâche (OR entre 3 et 7), ES5, ES6, CES, RVEST, et RAPI pour le SOT (OR > 7). Il faut noter que certains paramètres ES4, RVIS pour le SOT, ES2, ES4, CES, RSOM, et RVIS pour la double-tâche ont un odd ratio supérieur à 2 mais non significatif du fait du faible nombre de sujets. Concernant MuCh, les paramètres montrant des différences avec T sont ES2, ES5, ES6, CES, RVEST et RAPI pour le SOT, ES4 et ES6 pour la double-tâche (OR > 10), ES4, CES, RVEST et RAPI pour la double-tâche et LLB pour le MCT (OR > 10). Une fois de plus, plusieurs paramètres, ES1, ES3 et RPREF pour le SOT, ES1, ES3, RSOM, et RVIS pour la double-tâche et LMF pour le MCT ont un OR > 2 mais non significatif au vu du faible nombre de sujets.

Tableau VII. Valeurs percentiles du groupe témoin (T).

	5 <sup>ème</sup>	10 <sup>ème</sup>	50 <sup>ème</sup>	90 <sup>ème</sup>	95 <sup>ème</sup>
<b>SOT</b>					
ES 1	91,8	92,7[90,0-94,0]	95,7	97,0	97,1
ES 2	89,7	91,3[89,5-92,0]	93,7	95,7	96,1
ES 3	82,9	86,6[81,7-88,3]	92,7	94,9	96,1
ES 4	77,3	81,4[76,8-83,1]	87,7	92,5	93,1
ES 5	56,6	59,6[52,7-62,4]	69,0	80,3	82,9
ES 6	59,1	61,2[55,5-64,8]	73,5	80,7	83,1
CES	75,5	77,7[75,1-79,1]	82,2	86,2	87,3
RSOM	95,4	95,9[94,7-96,5]	98,6	100,1	101,8
RVIS	83,1	85,7[80,1-87,5]	91,6	96,8	97,6
RVEST	59,2	62,2[55,8-65,4]	72,9	83,9	86,6
RPREF	90,2	92,4[89,7-95,2]	101,1	108,0	109,1
RAPI	70,8	73,4[69,3-77,6]	80,8	88,6	90,3
<b>Double- tâche</b>					
ES 1	84,0	88,5[81,7-90,0]	94,0	96,2	96,8
ES 2	83,3	86,5[81,5-88,6]	92,0	95,7	96,4
ES 3	77,7	81,6[76,3-86,0]	88,5	94,6	95,1
ES 4	65,6	74,3[64,3-77,0]	84,3	91,0	92,8
ES 5	48,9	57,7[44,7-61,2]	70,2	79,6	82,1
ES 6	41,4	54,1[36,2-56,3]	69,3	81,2	83,0
CES	70,3	71,8[70,0-73,9]	78,8	86,4	88,0
RSOM	86,7	94,8[85,8-96,5]	98,9	103,2	107,1
RVIS	76,3	81,1[71,7-84,5]	89,6	97,7	100,5
RVEST	52,8	63,4[46,9-66,7]	76,6	85,5	87,9
RPREF	80,6	82,4[79,5-89,0]	97,7	109,5	112,4
RAPI	67,2	70,9[66,7-75,0]	79,9	88,8	91,3
<b>MCT</b>					
LMF	113,2	115,0	130	150,0[145,0-156,4]	151,7
LLF	100,0	110,0	120	150,0[145,0-155,0]	155,0
LMB	115,0	115,0	135	158,5[150,0-171,0]	170,0
LLB	105,0	110,0	135	150,0[143,3-160,0]	153,5
LCS	111,6	115,3	130	150,4[141,6-151,6]	151,1
<b>Test statique</b>					
Lg YO	0,46	0,53	0,67	0,99[0,85-1,13]	1,08
Lg YF	0,56	0,65	0,99	1,58[1,41-2,02]	1,83
S YO	0,08	0,11	0,23	0,69[0,43-0,73]	0,72
S YF	0,09	0,14	0,41	0,76[0,59-1,18]	0,94
AP YO	0,06	0,07	0,11	0,21[0,16-0,30]	0,28
AP YF	0,07	0,11	0,22	0,45[0,35-0,61]	0,56
Lat YO	0,03	0,04	0,06	0,11[0,09-0,13]	0,12
Lat YF	0,02	0,03	0,06	0,13[0,10-0,15]	0,14
QR Lg	0,78	0,98	1,47	1,87[1,74-2,43]	2,35
QR S	0,67	0,75	1,55	2,63[2,33-3,10]	2,91

En italique : valeurs seuils et intervalles de confiance.

En comparant les deux groupes de chuteurs (MuCh, MoCh), des différences significatives apparaissent pour les paramètres : ES5, CES, RVEST et RAPI pour la double-tâche, LLB pour le MCT. Nous pouvons constater que certains paramètres ES1, ES2, ES3, ES6 et RPREF pour le SOT, ES1, ES4 pour la double-tâche et LLF, LCS pour le MCT ont un OR > 2 mais non significatif.

Le tableau IX présente les odds ratios pour les paramètres de la plate-forme Toennies. Lorsqu'on compare MoCh et T, seul le paramètre Type II YO a un OR significatif alors que les paramètres Lat YO et QR ont un OR > 2 mais non significatif. Concernant MuCh, les paramètres montrant une différence avec T sont type II YO et Lat YF (OR = 12.5), suivi par S YF (OR = 7.5). L'odd ratio du paramètre Chute YF n'a pas pu être calculé par le logiciel Stata mais le test exact de Fisher est très significatif. De plus, les paramètres Lg YO, Lg YF, S YO, QR Lg et QR S ont un OR > 2 mais non significatif. En comparant les deux groupes de chuteurs (MuCh, MoCh), des différences significatives apparaissent pour les paramètres Lat YF, S YF et Chute. Les paramètres Lg YO, Lg YF et S YO ont un OR > 2 mais non significatif.

#### **IV - 5.b - Discussion**

Cette étude a montré qu'un déficit dans la commutation des différents systèmes sensoriels et plus spécifiquement une incapacité à baser sa régulation posturale sur le référentiel vestibulaire est un facteur important dans la survenue et la récurrence des chutes. Des difficultés dans la réalisation de double-tâche dans des environnements sensoriels spécifiques et dans la stabilisation rapide de son équilibre, suite à une perturbation externe inattendue du support vers l'arrière, sont également des facteurs de risque de chutes en milieu professionnel. Enfin, une dépendance élevée au champ visuel, une instabilité posturale

latérale et la mise en œuvre de stratégies sensorimotrices de type réactionnel en condition YO apparaissent aussi comme des facteurs de risque prédisposant à la chute.

La qualité du contrôle postural statique reflète la capacité du sujet à utiliser efficacement les informations somatosensorielles et en condition YF sa dépendance à l'égard du champ visuel. Il est bien connu que les sujets choisissent des références sensorielles d'orientation différemment selon leur expérience personnelle, aboutissant à une dépendance plus ou moins grande vis-à-vis de l'afférence visuelle (Horak *et al.*, 1994 ; Assaiante & Amblard, 1995 ; Lacour *et al.*, 1997). Cette étude a montré que les travailleurs ayant des difficultés pour passer d'une dominance sensorimotrice visuelle à proprioceptive, en relation avec un schéma central d'intégration pour ajuster l'équilibre basé sur le choix naturel des afférences visuelles dans les noyaux vestibulaires, présentent un risque élevé de chute.

Dans des environnements particuliers, au sein desquels la redondance sensorielle est limitée (par exemple, lorsque les entrées somatosensorielles et/ou visuelles sont altérées), les travailleurs doivent extraire et associer des afférences appropriées des différents systèmes sensoriels qui sont toujours potentiellement informatifs. Dans ces situations spécifiques, le système vestibulaire doit généralement agir en tant que référence pour résoudre les situations de conflit sensoriel (ES5, ES6, sinus lent EC) et tout ceci suppose une reconfiguration de l'activité posturale. Ainsi, un déficit dans le recalibrage des différentes afférences contrôlant l'équilibre, auquel les travailleurs sont fréquemment confrontés sur leur lieu de travail, et l'incapacité de baser le contrôle postural sur le référentiel vestibulaire, constituent deux facteurs de risque importants dans la survenue des chutes au travail.

Un autre point important qui ressort de cette étude est la relation entre la réalisation simultanée de tâche cognitive et posturale, qui est une composante essentielle des activités quotidiennes du travailleur, et la survenue et la répétition des chutes. La réalisation de double-tâche est connue pour modifier l'efficacité de la réponse motrice (Maki & McIlroy, 1996 ;

Jamet *et al.*, 2004), et pour augmenter la probabilité de trébucher (Zohar, 1978). Chez les personnes âgées, une habilité réduite pour répondre aux exigences physiques liées à l'environnement quand l'attention est assignée en partie à une deuxième tâche, a été démontrée comme étant un facteur contribuant à des taux élevés de chutes (Chen *et al.*, 1996 ; Shumway-Cook *et al.*, 1997). De la même manière, les travailleurs qui ne peuvent exécuter simultanément des tâches posturales et cognitives dans les environnements sensoriels spécifiques, particulièrement lorsque l'afférence proprioceptive est faussée et ou lors de situations de conflit sensoriel, ont un risque substantiel de tomber. Il convient de noter que le SOT avec tâche cognitive a été réalisé après le SOT simple et malgré un effet d'apprentissage à court terme dans les réponses posturales adaptatives, le celui-ci s'est révélé efficace dans la détection des sujets chuteurs, particulièrement les sujets MuCh, et pourrait ainsi être utilisé dans les interventions ayant pour objectif la détermination de profils à risque.

En raison d'un risque important de glissades et de chutes dans l'environnement professionnel, la capacité du sujet à contrôler correctement sa posture et à stabiliser rapidement son équilibre est nécessaire dans l'évitement des accidents du travail (Redfern & Bloswick, 1997 ; Grönqvist *et al.*, 2001b). Cette étude a démontré qu'une habilité fonctionnelle réduite pour regagner sa stabilité posturale, après une perturbation externe inattendue du support vers l'arrière, est un paramètre à ne pas négliger dans la détection des travailleurs qui présentent un risque important de chutes.

Les oscillations latérales du corps sont principalement contrôlées par les entrées vestibulaires (Magnusson *et al.*, 1990 ; Kristinsdottir *et al.*, 2000) tandis que les entrées proprioceptives contrôlent les oscillations antéro-postérieures (Nakagawa *et al.*, 1993). Chez les personnes âgées, le contrôle de la stabilité latérale est un bon indice prédictif de chute (Maki *et al.*, 1994) et peut être utilisé dans la détection de profils à risque (Stel *et al.*, 2003). Notre étude a montré que le paramètre Lat YF était associé de manière significative au groupe

des sujets multi-chuteurs et apparaît donc comme un indice prédictif de chute facilement mesurable chez les travailleurs aussi. Lors du test dynamique, les sujets doivent compenser la difficulté à utiliser l'information proprioceptive due au mouvement sinusoïdal de la plateforme et à corriger leur posture en adoptant une stratégie plus appropriée, ce qui implique une réorganisation des différentes composantes de la régulation posturale. Cette étude a montré qu'une maîtrise réduite des stratégies posturales communes disponibles dans le répertoire de l'équilibre est significativement associée à la survenue et à la répétition des chutes. Les ajustements posturaux de type réactionnel étant souvent insuffisants pour réguler l'équilibre lors d'une locomotion perturbée, la probabilité de chuter augmente (Gauchard *et al.*, 2003a ; Vouriot *et al.*, 2004). Les stratégies sensorimotrices réactionnelles de type II, tout comme les chutes lors de nos tests, apparaissent comme des paramètres intéressants dans la détection des travailleurs qui sont susceptibles de tomber.

#### **IV - 5.c - Conclusion**

En conclusion, cette étude a démontré que plusieurs paramètres posturaux pourraient être utilisés par les médecins du travail dans l'identification des sujets présentant un risque important de chute. La détection précoce de travailleurs à risque pourrait réduire la survenue et la répétition des accidents du travail causés par les chutes et par là même les conséquences psychologiques, physiques et économiques liées à ces accidents. En augmentant la qualité de la stabilité posturale et en permettant une détection plus rapide des déstabilisations et l'organisation des mécanismes compensatoires (Gauchard *et al.*, 2003b), les activités physiques peuvent diminuer le risque des chutes chez l'homme au travail. Par conséquent, une approche préventive visant à adapter la tâche au salarié à risque et la promotion de la pratique régulière des activités sportives afin d'améliorer des capacités physiques et fonctionnelles de ceux-ci pourrait être développée.

**Tableau VIII.** Risque de chutes pour les paramètres d'EquiTest: % de valeurs "anormales" chez MoCh ou MuCh, odds ratios et 95% IC pour MoCh vs T, MuCh vs T et pour MuCh vs MoCh. NS : Non Significatif. NS<sup>§</sup> : p<0,10. NC: non calculé par le logiciel Stata.

	<i>MoCh versus T</i>			<i>MuCh versus T</i>			<i>MuCh versus MoCh</i>		
	(%) chez MoCh	test exact Fisher	OR, 95% IC	(%) chez MuCh	test exact Fisher	OR, 95% IC	(%) chez MuCh	test exact Fisher	OR, 95% IC
<b>SOT</b>									
ES 1	9	NS	0,96 (0,26-3,57)	33	NS <sup>§</sup>	4,70 (0,99-23,18)	33	NS <sup>§</sup>	4,87 (0,97-25,34)
ES 2	25	p<0,01	4,12 (1,26-13,34)	44	p<0,01	19,60 (1,98-47,75)	44	NS	2,32 (0,56-9,66)
ES 3	16	NS	1,82 (0,56-5,92)	33	NS <sup>§</sup>	4,70 (0,99-23,18)	33	NS	2,57 (0,57-12,01)
ES 4	18	NS	2,14 (0,67-6,80)	22	NS	2,68 (0,51-14,93)	22	NS	1,25 (0-6,51)
ES 5	46	p<0,001	8,17 (2,79-23,68)	55	p<0,01	11,75 (2,52-55,61)	55	NS	1,43 (0,36-5,67)
ES 6	44	p<0,001	7,44 (2,54-21,58)	66	p<0,001	18,80 (3,81-92,80)	66	NS	2,52 (0,59-10,45)
CES	51	p<0,001	12,57 (3,98-39,09)	66	p<0,001	24,00 (4,61-126,1)	66	NS	1,90 (0,45-7,88)
RSOM	18	NS	1,46 (0,50-4,29)	11	NS	0,80 (0-5,92)	11	NS	0,54 (0-3,99)
RVIS	21	NS <sup>§</sup>	2,48 (0,79-7,72)	11	NS	1,17 (0-9,01)	11	NS	0,47 (0-3,41)
RVEST	41	p<0,001	8,64 (2,73-26,93)	55	p<0,001	15,00 (3,05-75,21)	55	NS	1,73 (0,43-6,88)
RPREF	16	NS	1,82 (0,56-5,92)	33	NS <sup>§</sup>	4,70 (0,99-23,18)	33	NS	2,57 (0,57-12,01)
RAPI	46	p<0,001	10,43 (3,31-32,44)	55	p<0,01	15,00 (3,05-75,21)	55	NS	1,43 (0,36-5,67)
<b>Double- tâche</b>									
ES 1	11	NS	1,23 (0,35-4,31)	33	NS <sup>§</sup>	4,70 (0,99-23,18)	33	NS	3,80 (0,79-18,86)
ES 2	18	NS	2,14 (0,67-6,80)	11	NS	1,17 (0-9,01)	11	NS	0,54 (0-3,99)
ES 3	13	NS	1,52 (0,45-5,09)	22	NS	2,68 (0,51-14,93)	22	NS	1,76 (0-9,56)
ES 4	21	NS <sup>§</sup>	2,48 (0,79-7,72)	44	p<0,05	7,52 (1,63-35,53)	44	NS	3,02 (0,72-12,88)
ES 5	18	NS	2,14 (0,67-6,80)	88	p<0,001	75,20 (9,44- ∞)	88	p<0,001	35,00 (4,72- ∞)
ES 6	30	p<0,01	4,07 (1,35-12,10)	44	p<0,05	7,52 (1,63-35,53)	44	NS	1,84 (0,46-7,52)
CES	20	NS	2,02 (0,68-6,01)	77	p<0,001	26,83 (4,92-140,8)	77	p<0,01	13,22 (2,57- ∞)
RSOM	18	NS	2,74 (0,80-9,25)	22	NS	3,42 (0,62-19,84)	22	NS	1,25 (0-6,51)
RVIS	20	NS	2,02 (0,68-6,01)	22	NS	2,19 (0-11,81)	22	NS	1,07 (0-5,54)
RVEST	18	NS	2,14 (0,67-6,80)	77	p<0,001	32,90 (5,82-179,7)	77	p<0,001	15,31 (2,92- ∞)
RPREF	11	NS	1,23 (0,35-4,31)	0	NS	NC	0	NS	NC
RAPI	27	p<0,05	3,63 (1,20-10,89)	66	p<0,001	18,80 (3,81-92,80)	66	p<0,05	5,16 (1,19-22,05)
<b>MCT</b>									
LMF	0	NS	NC	11	NS	3,12 (0-27,60)	11	NS	NC
LLF	2	NS	0,28 (0-2,00)	11	NS	1,50 (0-11,86)	11	NS	5,25 (0- ∞)
LMB	7	NS	0,70 (0,17-2,86)	11	NS	1,17 (0-9,01)	11	NS	1,67 (0-13,80)
LLB	2	NS	0,59 (0-4,74)	33	p<0,01	12,50 (2,02-76,75)	33	p<0,01	21,00 (2,46- ∞)
LCS	2	NS	0,22 (0-1,52)	11	NS	1,17 (0-9,01)	11	NS	5,25 (0- ∞)

**Tableau IX.** Risque de chutes pour les paramètres Toennies: % de valeurs “anormales” chez MoCh ou MuCh, odds ratios et 95% IC pour MoCh vs T, MuCh vs T et pour MuCh vs MoCh. NS : Non Significatif. NS<sup>§</sup> : p<0,10. NC: non calculé par le logiciel Stata.

		<i>MoCh versus T</i>			<i>MuCh versus T</i>			<i>MuCh versus MoCh</i>		
		(%) chez MoCh	test exact Fisher	OR, 95% IC	(%) chez MuCh	test exact Fisher	OR, 95% IC	(%) chez MuCh	test exact Fisher	OR, 95% IC
<i>STATIQUE</i>										
Lg	YO	10	NS	0,96 (0,26-3,57)	2	NS	2,68 (0,51-14,93)	22	NS	2,78 (0,50-6,21)
Lg	YF	11	NS	1,01 (0,30-3,38)	22	NS	2,19 (0-11,81)	22	NS	2,17 (0,40-12,14)
S	YO	10	NS	0,96 (0,26-3,57)	22	NS	2,68 (0,51-14,93)	22	NS	2,78 (0,50-16,26)
S	YF	13	NS	1,52 (0,45-5,09)	44	p<0,05	7,52 (1,63-35,53)	44	p<0,05	4,93 (1,10-22,56)
AP	YO	5	NS	0,58 (0-2,90)	0	NS	NC	0	NS	NC
AP	YF	7	NS	0,90 (0,21-3,83)	0	NS	NC	0	NS	NC
Lat	YO	16	NS <sup>§</sup>	3,17 (0,82-12,03)	0	NS	NC	0	NS	NC
Lat	YF	7	NS	1,87 (0,35- ∞)	33	p<0,01	12,50 (2,02-76,75)	33	p<0,05	6,67 (1,23-36,97)
QR	Lg	13	NS	1,24 (0,38-3,98)	22	NS	2,19 (0-11,81)	22	NS	1,76 (0-9,56)
QR	S	21	NS	2,48 (0,79-7,72)	33	NS <sup>§</sup>	4,70 (0,99-23,18)	33	NS	1,88 (0,43-8,49)
<i>DYNAMIQUE</i>										
Type II	YO	20	p<0,01	6,61 (1,49- ∞)	33	p<0,01	12,50 (2,02-76,75)	33	NS	1,88 (0,43-8,49)
Chute	YF	7	NS <sup>§</sup>	NC	66	p<0,001	NC	66	p<0,001	26,67 (4,68-154,1)

## V - PROTOCOLE 2 : EFFETS D'UNE EXPOSITION PROFESSIONNELLE AUX SOLVANTS SUR LE CONTROLE POSTURAL ET LA VIGILANCE

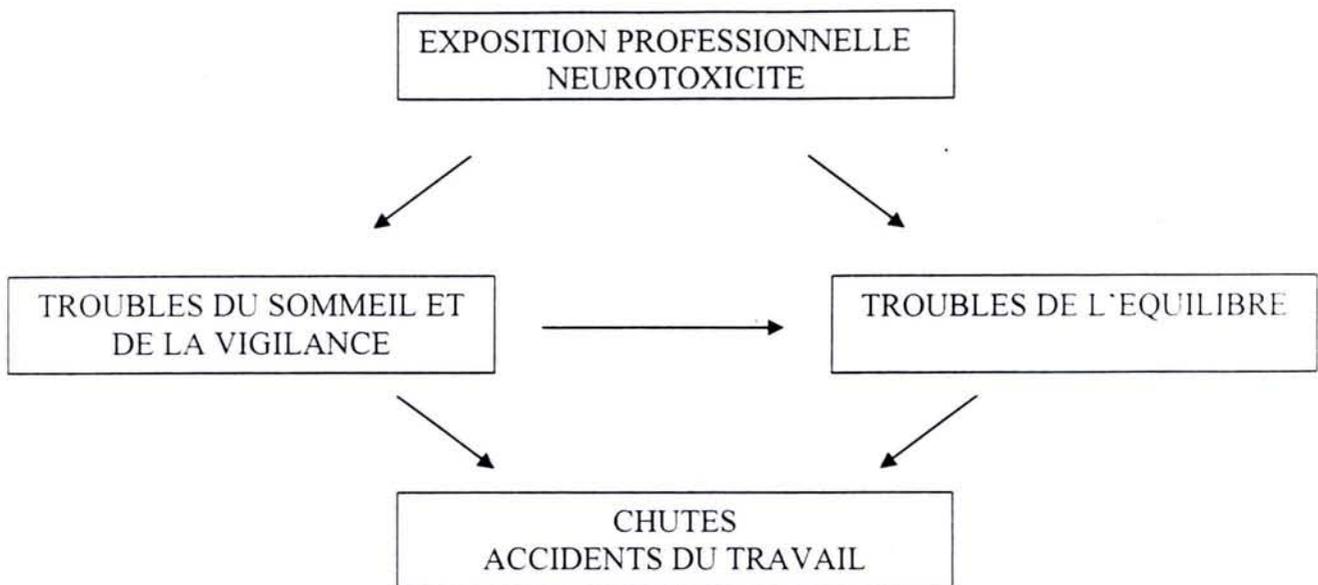
Ce travail a fait l'objet d'une publication acceptée en 2005 dans **International Archives of Occupational and Environmental Health** (sous presse).

### V - 1 - Rappels

Des millions de travailleurs subissent une exposition aux solvants durant leur vie active. Près de 10 millions de travailleurs en Europe et autant aux Etats-Unis sont concernés par cette exposition. En France, l'enquête SUMER 1994 a recensé 2,4 millions de salariés exposés aux solvants dans le cadre de leur travail (Demange *et al.*, 2001). La neurotoxicité des solvants est à l'origine d'un syndrome dont la désignation a évolué de syndrome psycho-organique (POS) vers la notion d'encéphalopathie toxique chronique (CTE) (Ledin *et al.*, 1989 ; Ödkvist *et al.*, 1992), comportant des troubles de la mémoire, de la vigilance et de l'équilibre. Les solvants organiques habituellement utilisés sont le trichloroéthylène, le perchloroéthylène, le méthyl-éthyl cétone, le 1,1,1-trichloroéthane, le n-héxane, le toluène, le xylène et des solvants mixtes tels que le white spirit (Xiao & Levin, 2000) dans les domaines principalement de l'imprimerie, des peintures, des laques, des colles, des dégraissants et des détachants. Les solvants organiques sont généralement des composés volatils qui pénètrent dans l'organisme essentiellement par voie respiratoire et dans une moindre mesure par voie cutanée. Leur caractère lipophile favorise leur absorption puis leur concentration dans le tissu cérébral et est à l'origine d'effets sur le système nerveux périphérique et central.

Les solvants, par leur rôle dépressur du système nerveux central, peuvent vraisemblablement induire des troubles spécifiques du contrôle postural et de l'équilibration (Ledin *et al.*, 1989 ; Ledin *et al.*, 1991 ; Moller *et al.*, 1990), ainsi que des troubles du

sommeil qui aboutissent à des pertes de vigilance diurnes, ces perturbations pouvant être des facteurs de risque favorisant les accidents du travail (Fig. 15).



**Fig. 15** – Possibles liens de causalité entre l'exposition professionnelle aux solvants et la survenue d'accidents du travail.

De nombreux travaux sur la neurotoxicité ont permis d'établir une typologie clinique qui permet notamment de différencier deux effets des solvants, ceux immédiatement ressentis lors/ou au cours d'une journée de travail correspondant à une « intoxication aiguë », et ceux persistant même après une plus ou moins longue soustraction au risque, correspondant à une « intoxication chronique ». Les effets aigus des solvants sont dus à une exposition à une dose suffisamment élevée, variable suivant le type de solvant organique, et sont caractérisés par le fait que les symptômes sont transitoires et qu'ils disparaissent rapidement après l'arrêt de l'exposition (Xiao & Levin, 2000). Les effets chroniques sont dus à une exposition répétée aux solvants et sont caractérisés par le fait que les symptômes apparaissent après une longue période d'exposition et ses effets se poursuivent même lorsque l'exposition cesse (Olson & Sabroe, 1980 ; Mikkelson, 1980 ; Xiao & Levin, 2000). Par exemple, en ce qui concerne le

benzène, les effets chroniques, suite à une exposition répétée, sont bien étudiés alors que peu d'études se sont intéressées à l'exposition aiguë (Barbera *et al.*, 1998).

Des auteurs se sont intéressés au caractère aigu de l'exposition aux solvants suspecté lors d'intoxications accidentelles (professionnelles ou domestiques) ou addictives. Les manifestations cliniques d'une intoxication professionnelle aiguë aux solvants organiques débutent par des vertiges, des troubles de l'équilibre et de la coordination, des céphalées, des nausées, une somnolence et des troubles du sommeil dans la nuit qui suit l'exposition. Sur le modèle animal, il apparaît que le réflexe optocinétique et la génération de saccades, au niveau du gain, sont perturbés par une exposition aiguë aux solvants, notamment au toluène, au styrène, au trichloroéthylène (TCE) ou au trichloroéthane (Niklasson *et al.*, 1993). Une exposition aiguë au toluène et au styrène induit des vertiges et des perturbations des voies vestibulo-oculaires (Andersen *et al.*, 1983 ; Hyden *et al.*, 1983 ; Yin *et al.*, 1987 ; Lee *et al.*, 1988 ; Geuskens *et al.*, 1992 ; Laine *et al.*, 1993 ; Feldman, 1999). Au niveau vestibulaire, il apparaît qu'une exposition aiguë au toluène, au styrène ou au TCE induit une augmentation de la durée du nystagmus post-rotatoire et des troubles de l'audition (Niklasson *et al.*, 1993 ; Morata *et al.*, 1995). Une altération de la voie cérébello-vestibulaire est une des conséquences de l'exposition aiguë aux solvants (Niklasson *et al.*, 1993) ainsi que des pertes de connaissance, des troubles cognitifs et du fonctionnement psychomoteur (Chesher *et al.*, 1976 ; Mills & Bisgrove, 1983 ; Reberts & Hall, 1994). Une exposition aiguë aux solvants chez les peintres a montré une altération de l'apprentissage et de la mémoire, mais les effets se sont dissipés après l'arrêt de l'exposition (Morrow *et al.*, 1997). Ces effets s'aggravent avec l'augmentation de l'exposition, pouvant évoluer vers un état narcotique puis comateux jusqu'au décès (Gerr & Letz, 1992). Une intoxication aiguë fatale a montré que le benzène était localisé dans de nombreux organes, notamment dans le foie et le cœur, mais également dans le cerveau (Barbera *et al.*, 1998). Suite à une absorption à niveau plus élevé (c'est-à-dire

une brève exposition à des concentrations très élevées ou à une exposition plus longue à des doses plus faibles), une perte de coordination peut se produire ainsi qu'un sentiment subjectif d'ébriété et des troubles de l'équilibre, le risque d'accident augmentant de plus en plus avec l'aggravation des symptômes (Axelson *et al.*, 1976). Ces actions aiguës n'impliquent pas que le styrène produit des atteintes réversibles ou non du système nerveux central ; il faut donc évaluer l'exposition à long terme aux solvants pour tirer des conclusions sur les effets centraux permanents générés (Reberts & Hall, 1994). Dans ce cas, on peut engendrer un biais lié à la plus grande probabilité d'exposition à des solvants ayant des points d'impact neurotoxiques différents de ceux du solvant en question (Reberts & Hall, 1994). La plupart des travaux sur les conséquences de l'exposition à des solvants porte sur les effets neuropsychiques ou sur les encéphalopathies irréversibles liées à l'exposition à long terme. Les études évaluant les effets sur le sommeil sont souvent limitées à la description de cas isolés. Une étude mesurant les baisses nocturnes de la SaO<sub>2</sub> chez des ouvriers exposés à des solvants montre que les perturbations ventilatoires du sommeil semblent plus liées au niveau d'exposition quotidien qu'à la durée de l'exposition chronique (Laire *et al.*, 1997).

Le caractère chronique de l'exposition aux solvants a été également bien étudié. Il a été démontré qu'une exposition chronique aux solvants induisait des troubles cognitifs par une diminution de la mémoire notamment de travail, une instabilité posturale avec des déficits vestibulaires, visuels et somesthésiques (Arlien-Soborg *et al.*, 1981 ; Wenngren & Ödkvist, 1988 ; Ledin *et al.*, 1991 ; Savov & Boeva, 1991 ; Baker, 1994 ; Kelafant *et al.*, 1994 ; Calabrese *et al.*, 1996 ; Smith *et al.*, 1997 ; White & Proctor, 1997 ; Dick *et al.*, 2000 ; Xiao & Levin, 2000 ; Aylott & Prasher, 2002 ; Sulkowski *et al.*, 2002 ; Fiedler *et al.*, 2003). Une exposition chronique aux solvants induit des troubles du système nerveux central (Ekberg *et al.*, 1986 ; Anger, 1990 ; Kyvik & Moen, 1990 ; Moller *et al.*, 1990 ; Murata *et al.*, 1991a ; Murata *et al.*, 1991b ; Matikainen *et al.*, 1993 ; Stetkarova *et al.*, 1993 ; Baker, 1994 ; White

& Proctor, 1997 ; Daniell *et al.*, 1999 ; van Wendel de Joode *et al.*, 2001) engendrant une instabilité posturale statique et dynamique (Sasa *et al.*, 1978 ; Savolainen *et al.*, 1980 ; Savolainen & Riihimaki, 1981 ; Ledin *et al.*, 1989 ; Ledin *et al.*, 1991 ; Sulkowski *et al.*, 1992 ; Kuo *et al.*, 1996 ; Niklasson *et al.*, 1997 ; Pospiech *et al.*, 1998 ; Kilburn, 2002) en affectant les fonctions vestibulocérébelleuse et spinocérébelleuse (Yokoyama *et al.*, 1997 ; Yokoyama *et al.*, 2002) aussi bien que les neurones dopaminergiques entraînant une perte des réflexes posturaux (Kuriwaka *et al.*, 2002). Si l'expérimentation animale a montré qu'une intoxication aux solvants influençait l'arc réflexe vestibulo-oculomoteur en bloquant l'inhibition exercée sur ce réflexe par le cervelet (Tham *et al.*, 1979 ; Ödkvist *et al.*, 1979 ; Ödkvist *et al.*, 1980 ; Haglid *et al.*, 1981 ; Tham *et al.*, 1984), l'exposition chez l'homme aux solvants ne génère pas de nystagmus positionnel mais augmente la vitesse des saccades et affecte les voies permettant la suppression du réflexe vestibulo-oculaire (Biscaldi *et al.*, 1981 ; Ödkvist *et al.*, 1982 ; Ödkvist *et al.*, 1987 ; Hyden *et al.*, 1983 ; Ödkvist *et al.*, 1983 ; Larsby *et al.*, 1986 ; Ledin *et al.*, 1989 ; Moller *et al.*, 1990 ; Pollastrini *et al.*, 1994). Du fait de ces mêmes manifestations chez des sujets porteurs de tumeurs cérébelleuses, le cervelet semble être l'organe du système nerveux central le plus sensible aux solvants (Ödkvist *et al.*, 1983). Une exposition à long terme aux solvants conduit à une atrophie corticale (Juntenen *et al.*, 1980 ; Rosenberg *et al.*, 1988 ; Feldman & McKee, 1993 ; Ridgway *et al.*, 2003). Au niveau auditif, il apparaît que le carbone disulfide (CS<sub>2</sub>) entraîne une diminution de l'audition chez des ouvriers exposés. Un biais pourrait être que, dans les entreprises utilisant le CS<sub>2</sub>, l'environnement est très bruyant, un traumatisme sonore pouvant donc être associé à l'otoxicité des solvants. L'intoxication chronique au CS<sub>2</sub> entraîne des troubles auditifs et vestibulaires à un niveau central alors que le bruit entraîne des traumatismes au niveau de la cochlée (Kowalska *et al.*, 2000). Une exposition chronique à des solvants de peinture entraîne des désordres au niveau du vestibule, du cervelet et du tronc cérébral (Antti-Poika *et al.*,

1989). De manière générale, l'exposition chronique à des solvants organiques entraîne des troubles centraux, du vestibule et une perte auditive extra-cochléaire (Bazydlo-Golinska, 1993). L'apparition de troubles respiratoires lors du sommeil chez des sujets exposés pourrait représenter un signe avant-coureur d'encéphalopathie et pourrait alors signifier que l'exposition à des solvants volatils doit être évitée (Monstad *et al.*, 1992). Une exposition chronique aux solvants conduit à des lésions cérébelleuses irréversibles, associés à des troubles intellectuels, à des baisses de performance ainsi qu'à des troubles de l'humeur (Baker *et al.*, 1985 ; Hanninen, 1986 ; Morrow *et al.*, 1990 ; Kishi *et al.*, 1993 ; Kelafant *et al.*, 1994 ; White *et al.*, 1995 ; Sinczuck-Walczak *et al.*, 1995 ; Ellingsen *et al.*, 1997 ; Mikkelsen *et al.*, 1997 ; Mitran *et al.*, 1997 ; Dick *et al.*, 2000 ; Spurgeon, 2001 ; Nording Nilson *et al.*, 2002). Le système nerveux périphérique est également très sensible à la neurotoxicité des solvants, pouvant conduire à une neuropathie périphérique (Bravaccio *et al.*, 1981 ; Chang *et al.*, 1994), notamment au niveau des membres inférieurs (Ruijten *et al.*, 1994). Une dégénérescence des axones et des fibres axonales au niveau spinal, cérébelleux et au niveau de l'hypothalamus, induite par une exposition aux solvants, a été mise en évidence (Graham *et al.*, 1995) ainsi qu'un ralentissement de la conduction nerveuse (Harkonen *et al.*, 1978).

L'intoxication dépend du niveau et de la durée de l'exposition, du lieu de travail, des caractéristiques physicochimiques spécifiques de chaque solvant, des tâches réalisées et de l'utilisation ou non d'équipement de protection (Xiao & Levin, 2000). Les cinématiques des métabolismes et d'excrétion des solvants sont extrêmement variables selon les composés et dépendent des très grandes variations inter-individuelles (polymorphisme génétique dans l'expression enzymatique). Les métabolites peuvent être dosés dans le sang, dans l'urine ou dans l'air expiré et constituent des indices d'absorption (Baker *et al.*, 1985).

De plus, l'exposition aux solvants est connue pour accroître le risque d'accidents du travail, particulièrement ceux relatifs aux glissades, aux trébuchements et aux chutes (Hunting

*et al.*, 1991). Ces types d'accidents peuvent être en grande partie dus à un déficit de certaines structures cérébrales intervenant dans les fonctions de régulation de la vigilance et de l'équilibre (Vouriot *et al.*, 2004).

Les hydrocarbures aromatiques sont communément utilisés dans les secteurs industriels, et leurs effets sur la santé ont été bien étudiés (Ritchie *et al.*, 2003). Il est admis que l'exposition à long terme aux hydrocarbures aromatiques est associée à des perturbations à différents niveaux du système nerveux central (Murata *et al.*, 1991 ; White & Proctor, 1997; Ridgway *et al.*, 2003). Les plaintes les plus fréquemment exprimées par les travailleurs exposés, et ce, même en l'absence de lésions organiques du système nerveux central ou périphérique, sont des maux de tête, des vertiges, des troubles de la mémoire et du sommeil, une irritabilité émotionnelle accrue et des troubles de l'humeur (Indulski *et al.*, 1996).

Il est admis, dans la plupart des cas, que l'exposition aux solvants diminue la vigilance (Dick *et al.*, 1984; Altmann *et al.*, 1995 ; Indulski *et al.*, 1996), bien que ces résultats restent controversés (Stollery, 1996). Pour autant, l'exposition aux solvants affecte la qualité du sommeil (Kiesswetter *et al.*, 1997) et peut être à l'origine du syndrome d'apnées obstructives du sommeil (Laire *et al.*, 1997 ; Ulfberg *et al.*, 1997). Ce dernier est caractérisé par des interruptions répétées de la respiration lors du sommeil ayant pour conséquence une nuit perturbée s'accompagnant de nombreux réveils (Stradling & Davies, 2004). La fragmentation du sommeil a des conséquences négatives dont des déficits de la vigilance, de l'attention, de la concentration, de la mémoire à court ou long terme et des fonctions exécutives et motrices (Sateia, 2003).

L'exposition à long terme et à faible dose aux solvants est connue pour affecter le contrôle postural et la stabilisation du regard (Aylott & Prasher, 2002). Les travailleurs exposés aux hydrocarbures aromatiques présentent des dysfonctionnements vestibulaires (Baker, 1994) et une instabilité posturale (Ledin *et al.*, 1989 ; Kuo *et al.*, 1996 ; Smith *et al.*,

1997 ; Yokoyama *et al.*, 1997). De plus, les expérimentations animales ont démontré que les hydrocarbures aromatiques affectaient les niveaux d'intégration de la régulation posturale en inhibant la transmission synaptique des neurones des noyaux vestibulaires (Magnusson *et al.*, 1998).

Les différents déficits liés à l'exposition aux solvants sont bien documentés mais ils sont généralement analysés séparément. Nous faisons l'hypothèse que l'analyse de la combinaison des différents troubles, concernant principalement la régulation de la vigilance et de la posture, pourrait permettre de détecter et prévenir les effets précliniques délétères d'une exposition aux solvants, et ce, même à faible dose. De plus, les effets d'une exposition à ces substances neurotoxiques pourraient être mis en évidence de manière synergique et donc, plus facilement détectables dans des situations spécifiques de conflit sensoriel. Le but de cette étude était donc d'étudier les effets d'une exposition professionnelle aux hydrocarbures aromatiques sur le contrôle postural, notamment dans les situations de conflit sensoriel, et sur l'état de vigilance et la qualité du sommeil.

## **V - 2 - Sujets**

Cette étude a été menée au sein d'une entreprise de sérigraphie sur des salariés volontaires. Le groupe des sujets exposés comportait 17 hommes et 5 femmes (âge médian (M) 34,5 ans ; premier quartile (Q1) 23,8 ; troisième quartile (Q3) 42,0). Afin d'estimer l'exposition atmosphérique des salariés aux solvants, des prélèvements individuels ont été réalisés à huit sites différents de l'entreprise, à l'aide d'une pompe portative (Gilian LFS 113 DC, Panametrics, La Garenne Colombes, France) équipée d'un tube de charbon actif selon la norme NIOSH, portée par les salariés pendant au moins trois heures. Ces prélèvements ont été effectués pendant la période d'investigation au moins deux fois sur les huit postes (sur deux salariés ou deux fois sur le même salarié) et durant une activité normale de l'entreprise. Les

concentrations des solvants les plus fréquemment utilisés, hydrocarbures benzéniques (C9-C12) et acétate de 1-méthoxy-2-propyle, ont été mesurées par chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme. Il faut souligner que la neurotoxicité de l'acétate de 1-méthoxy-2-propyle est considérée comme faible (INRS, 1992). D'autres agents chimiques, tels que cyclohexanone, acétate d'isopropoxyéthyle, 1,2-diacétoxypropane et N-vinylpyrrolidone, ont été détectés dans les échantillons mais n'ont pas été analysés du fait de leur très faible concentration. Du fait que nous ne disposions pas d'un prélèvement atmosphérique pour chaque salarié, leur exposition a été considérée comme étant identique à la médiane de la concentration mesurée sur le salarié occupant le même poste de travail.

**Tableau X.** Caractéristiques des populations étudiées. NS : non significatif.

	Exposés (n = 22) M (Q <sub>1</sub> ; Q <sub>3</sub> )	Témoins (n = 21) M (Q <sub>1</sub> ; Q <sub>3</sub> )	U Mann & Whitney Significativité
Age (y)	34,5 (23,8; 42,0)	38,0 (31,0; 34,0)	NS
Taille (cm)	176,3 (170,0; 180,0)	175,3 (174,0; 180,0)	NS
Poids (kg)	70,2 (60,5; 76,5)	73,7 (61,0; 85,0)	NS
IMC (kg/m <sup>2</sup> )	22,5 (21,1; 24,1)	23,8 (20,8; 26,0)	NS
Consommation d'alcool (%)	22*	19*	NS
Tabac (nb cigarettes/jour)	9,5 (6,0; 18,8)	6,0 (0; 10,0)	NS

\* : consommation d'alcool ; exposés (0,32 ± 0,72 verres par jour), témoins (0,43 ± 1,12 verres par jour)

Le groupe de sujets témoins était composé de 14 hommes et 7 femmes, salariés de la même entreprise (Age: M 38,0 ans, Q1: 31,0, Q3: 34,0). Aucun de ces sujets n'avait été soumis à une exposition aux solvants et n'appartenait au personnel administratif ou à la direction. Aussi, leur niveau d'instruction ainsi que leur temps passé en situation debout au cours de leur journée de travail ont été considérés comme semblables aux sujets exposés.

Tous les sujets étaient indemnes de pathologies du système nerveux central et aucun d'entre eux n'avait eu durant les six derniers mois de lésions musculaires, articulaires ou osseuses pouvant interférer sur le contrôle postural. De plus, aucun sujet des deux groupes ne faisait l'objet d'une quelconque prescription médicale. Cette étude a suivi les recommandations du *Comité Consultatif de Protection des Personnes qui se Prêtent aux Recherches Biomédicales de Lorraine* (CCPPRB) et a reçu l'agrément du Comité d'Hygiène et de Sécurité des Conditions de Travail de l'entreprise (CHS-CT). Tous les sujets ont signé un formulaire de consentement éclairé relatif à cette étude.

### **V - 3 - Procédure**

Un questionnaire sur leur état de vigilance et leur qualité de sommeil a été rempli par tous les sujets. L'échelle de vigilance d'Epworth (ESS) est un outil simple permettant d'évaluer le niveau général de somnolence diurne chez l'adulte (Johns, 1991). Il s'agit d'un court questionnaire comportant 8 items demandant au sujet de noter, sur une échelle allant de 0 à 3, les chances qu'il avait, au cours des six derniers mois, de s'assoupir dans les huit situations proposées (0 = aucune; 1 = faible chance; 2 = chance moyenne; 3 = forte chance de s'assoupir). Ainsi, il est demandé au sujet de caractériser de manière rétrospective son comportement face à diverses situations pouvant conduire à un état de somnolence. Le score d'Epworth est la somme des valeurs obtenues à chaque item et varie de 0 à 24. Un score supérieur à 10 est considéré comme pathologique et reflète une somnolence diurne marquée.

L'indice de qualité de sommeil de Pittsburgh (PSQI) est un questionnaire auto-administré mesurant la qualité subjective du sommeil au cours du dernier mois (Buysse *et al.*, 1989). Les 21 items du PSQI fournissent un score global représentant la somme de sept scores : qualité du sommeil, temps d'endormissement, durée du sommeil, efficacité habituelle du sommeil, troubles du sommeil, prise de somnifères et somnolence diurne.

Tous ces sujets ont également été soumis à des tests posturographiques statiques sur la plate-forme (QFP Systèmes, Nice, France) présentés précédemment (§III, pp. 39-40). Pour chacun des paramètres longueur et surface, un score d'équilibre a été déterminé lors des six conditions (C1-C6) ainsi qu'un score global d'équilibre ( $S^{GE}$ ). Ces tests ont été réalisés à la même heure (environ 8h du matin) pour tous les sujets, soit avant la prise de poste permettant ainsi d'éviter l'évaluation des effets d'une exposition aiguë aux solvants.

#### **V - 4 - Statistiques**

Les statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Statview (Abacus Concepts Inc., Berkeley, CA). Un test non-paramétrique U de Mann-Whitney a été utilisé pour l'ensemble des paramètres au regard du faible nombre de sujets. Des corrélations entre, d'une part le niveau d'exposition et la durée d'exposition, et d'autre part le score ESS, PSQI et les données posturographiques, ont été calculées à l'aide du test de Spearman, seulement chez les salariés exposés. La significativité statistique a été considérée à  $P$  inférieur à 0,05 et une tendance statistique pour  $P$  inférieur à 0,10.

#### **V - 5 - Résultats**

La médiane des concentrations atmosphériques en solvants étaient de  $80,1 \text{ mg/m}^3$  [( $Q_1$ ) = 39,1 ( $Q_3$ ) = 108,2)] pour les hydrocarbures benzéniques et de  $20,4 \text{ mg/m}^3$  [( $Q_1$ ) = 15,5. ( $Q_3$ ) = 29,8)] pour l'acétate de 1-methoxy-2-propyl. Il est important de noter que ces concentrations moyennes étaient en-dessous des limites d'exposition professionnelle ( $150 \text{ mg/m}^3$  pour les hydrocarbures benzéniques et  $275 \text{ mg/m}^3$  pendant 8 heures et  $500 \text{ mg/m}^3$  lors d'une exposition aiguë pour l'acétate de 1-methoxy-2-propyl) (Bulletin Officiel du Ministère des Affaires Sociales et de la Solidarité Nationale, juillet 1982).

Le tableau X fournit les caractéristiques des populations étudiées. Aucune différence significative concernant l'âge (années), la taille (cm), le poids (Kg), l'indice de masse

corporelle ( $\text{Kg/m}^2$ ) ou la consommation d'alcool (nombre de verres/jour) et de tabac n'a été observée entre le groupe des salariés exposés et celui des témoins.

Le tableau XI montre les résultats obtenus lors des tests de vigilance et de qualité de sommeil. Il révèle un score ESS significativement plus élevé chez les exposés que chez les témoins. Il faut noter que dix sujets (8 chez les exposés et 2 chez les témoins) présentaient un score ESS > 10. A l'inverse, aucune différence statistiquement significative n'a été observée entre les deux groupes concernant le score PSQI.

Le tableau XI fournit également les résultats concernant les tests posturographiques. Des valeurs plus élevées pour le paramètre surface ont été enregistrées chez les salariés exposés lors des six conditions, mais des différences statistiquement significatives entre les deux groupes ne sont apparues que lors de C1, C2, C6 et pour  $S^{\text{GE}}$ , les valeurs  $C3^{\text{ES}}$  et  $C5^{\text{ES}}$  tendant quant à elles vers la significativité statistique. A l'inverse, aucune différence significative concernant le paramètre longueur ne fut observée entre les deux groupes, excepté pour  $C2^{\text{ES}}$  alors que  $C5^{\text{ES}}$  tendait vers la significativité.

Le tableau XII montre les coefficients de corrélation entre, d'une part le niveau d'exposition aux hydrocarbures benzéniques et la durée d'exposition, et d'autre part les scores ESS, PSQI,  $C1^{\text{ES}}$  à  $C6^{\text{ES}}$  and  $S^{\text{GE}}$  pour les salariés exposés. Des corrélations significativement positives ( $P < 0,05$ ) sont apparues entre le niveau d'exposition et  $C2^{\text{ES}}$ ,  $C3^{\text{ES}}$ ,  $C5^{\text{ES}}$ ,  $C6^{\text{ES}}$  et  $S^{\text{GE}}$  pour le paramètre surface et une tendance statistique ( $P < 0,10$ ) pour ESS. Des corrélations significativement positives ( $P < 0,05$ ) sont également apparues entre la durée d'exposition et  $C2^{\text{ES}}$ ,  $C5^{\text{ES}}$  pour le paramètre surface et une tendance statistique ( $P < 0,10$ ) pour  $C6^{\text{ES}}$ ,  $S^{\text{GE}}$  pour le paramètre surface et  $C5^{\text{ES}}$  pour le paramètre longueur.

**Tableau XI.** Echelle de vigilance d'Epworth (ESS), indice de qualité de sommeil de Pittsburgh (PSQI) et tests posturographiques: Mediane (M) avec le premier (Q<sub>1</sub>) et troisième (Q<sub>3</sub>) quartiles de l'ESS, du PSQI et des scores d'équilibre pour les paramètres surface (/s, cm<sup>2</sup>) et longueur (/s, cm) lors des six conditions (C1<sup>ES</sup> to C6<sup>ES</sup>) ainsi que des score globaux d'équilibre (S<sup>GE</sup>) chez les exposés et chez les témoins. NS = Non significatif.

		Exposés (n = 22) M (Q <sub>1</sub> ; Q <sub>3</sub> )	Témoins (n = 21) M (Q <sub>1</sub> ; Q <sub>3</sub> )	U Mann & Whitney Significativité
ESS		9,0 (5,0; 12,0)	5,5 (4,0; 8,0)	z = -1,99 P = 0,04
PSQI		5,0 (4,0; 6,0)	5,0 (3,0; 6,0)	z = -0,11 NS
Scores d'équilibre (paramètre surface)	C1 <sup>ES</sup>	126,2 (102,7; 184,1)	106,5 (91,6; 141,1)	z = -1,98 P = 0,04
	C2 <sup>ES</sup>	280,1 (202,1; 323,4)	182,2 (159,5; 267,0)	z = -2,21 P = 0,02
	C3 <sup>ES</sup>	220,4 (137,1; 263,2)	155,7 (129,5; 195,3)	z = -1,79 P = 0,07
	C4 <sup>ES</sup>	119,5 (106,0; 161,3)	117,9 (94,4; 141,5)	z = -0,75 NS
	C5 <sup>ES</sup>	242,8 (202,1; 284,6)	197,9 (160,9; 279,5)	z = -1,79 P = 0,07
	C6 <sup>ES</sup>	202,2 (170,1; 251,8)	168,8 (137,9; 197,9)	z = -1,97 P = 0,04
	S <sup>GE</sup>	199,3 (44,50; 65,00)	154,0 (133,8; 200,4)	z = -2,08 P = 0,03
Scores d'équilibre (paramètre longueur)	C1 <sup>ES</sup>	89,6 (57,4; 124,8)	67,1 (51,1; 84,7)	z = -1,43 NS
	C2 <sup>ES</sup>	227,0 (184,9; 260,0)	152,8 (127,4; 200,6)	z = -2,84 P = 0,004
	C3 <sup>ES</sup>	186,6 (95,1; 281,8)	136,1 (92,9; 168,1)	z = -1,14 NS
	C4 <sup>ES</sup>	53,4 (46,6; 80,3)	66,2 (37,5; 106,4)	z = -0,55 NS
	C5 <sup>ES</sup>	157,9 (138,6; 257,1)	140,3 (119,2; 245,9)	z = -1,74 P = 0,08
	C6 <sup>ES</sup>	163,7 (137,6; 255,6)	154,7 (140,5; 179,8)	z = -0,82 NS
	S <sup>GE</sup>	150,0 (115,4; 209,1)	124,7 (102,8; 160,4)	z = -1,65 NS

**Tableau XII.** Corrélations entre le niveau et la durée d'exposition aux hydrocarbures benzéniques et ESS, PSQI et les scores d'équilibre représenté par la surface (/s, cm<sup>2</sup>) et la longueur (/s, cm) pour les six conditions (C1<sup>ES</sup> à C6<sup>ES</sup>) et le score global d'équilibre (S<sup>GE</sup>) chez les salariés exposés. NS = Non significatif.

Spearman		Niveau d'exposition	Durée d'exposition
ESS		$z = 1,88$ $P = 0,06$	$z = 0,67$ $P = NS$
PSQI		$z = 0,60$ $P = NS$	$z = -0,11$ $P = NS$
Scores d'équilibre (paramètre surface)	C1 <sup>ES</sup>	$z = 1,22$ $P = NS$	$z = 1,05$ $P = NS$
	C2 <sup>ES</sup>	$z = 2,65$ $P = 0,008$	$z = 1,96$ $P = 0,05$
	C3 <sup>ES</sup>	$z = 2,71$ $P = 0,006$	$z = 1,41$ $P = NS$
	C4 <sup>ES</sup>	$z = 1,64$ $P = NS$	$z = 1,37$ $P = NS$
	C5 <sup>ES</sup>	$z = 2,36$ $P = 0,01$	$z = 2,14$ $P = 0,03$
	C6 <sup>ES</sup>	$z = 2,05$ $P = 0,03$	$z = 1,77$ $P = 0,07$
	S <sup>GE</sup>	$z = 2,27$ $P = 0,02$	$z = 1,82$ $P = 0,06$
Scores d'équilibre (paramètre longueur)	C1 <sup>ES</sup>	$z = 0,26$ $P = NS$	$z = -0,03$ $P = NS$
	C2 <sup>ES</sup>	$z = 0,23$ $P = NS$	$z = 0,90$ $P = NS$
	C3 <sup>ES</sup>	$z = 0,77$ $P = NS$	$z = 0,48$ $P = NS$
	C4 <sup>ES</sup>	$z = -0,16$ $P = NS$	$z = 0,84$ $P = NS$
	C5 <sup>ES</sup>	$z = 0,61$ $P = NS$	$z = 1,69$ $P = 0,08$
	C6 <sup>ES</sup>	$z = 0,63$ $P = NS$	$z = 0,71$ $P = NS$
	S <sup>GE</sup>	$z = 0,73$ $P = NS$	$z = 0,96$ $P = NS$

## V - 6 - Discussion

Cette étude a montré que les travailleurs exposés principalement à des hydrocarbures aromatiques, et ce même à faible dose, rapportaient un état de vigilance réduit sans pour autant une baisse de la qualité de leur sommeil. De plus, les travailleurs exposés ont présenté un contrôle postural de plus faible qualité et une habileté réduite pour ajuster efficacement leur performance posturale dans des situations de conflit sensoriel. Il est impossible d'affirmer que les salariés témoins n'ont jamais été exposés, ne serait-ce qu'à faible dose, aux solvants. Cependant, si tel avait été le cas, cela diminuerait le contraste des niveaux d'exposition entre les deux groupes étudiés et par conséquent renforcerait les différences observées dans cette étude.

Le système de régulation de la vigilance implique des structures cérébrales (formation réticulée, thalamus et hypothalamus) et des neurotransmetteurs régulant son activité, qui sont sensibles à une exposition aux solvants (Hegerl *et al.*, 1996 ; Alkan *et al.*, 2004). Notre étude a démontré qu'une exposition à long terme aux hydrocarbures aromatiques était corrélée avec un score ESS élevé. Aussi, nous faisons l'hypothèse que l'exposition à ces substances chimiques a un effet déprimeur sur la fonctionnalité des structures et la neurotransmission régulant la vigilance qui peut avoir pour conséquence une augmentation du risque d'accident du travail. En effet, la vigilance joue un rôle important dans l'évitement des obstacles et l'anticipation de déstabilisations. En outre, les travailleurs présentant d'importantes somnolences diurnes ont un plus grand risque d'avoir un accident du travail (Melamed & Oksenberg, 2002).

Il a été démontré qu'une exposition aux solvants était responsable d'une qualité de sommeil réduite, la plupart du temps en relation avec une somnolence diurne importante (Kiesswetter *et al.*, 1997). Dans notre étude, les scores PSQI ne différaient pas statistiquement

entre le groupe des salariés exposés et celui des témoins. Du fait que les travailleurs exposés ne sont sans doute pas conscients de leur mauvaise qualité de sommeil, les scores PSQI étaient similaires dans les deux groupes. L'exposition à long terme aux hydrocarbures aromatiques semblerait conduire à des perturbations des mécanismes centraux régulant le sommeil, telles que les apnées obstructives du sommeil (Laire *et al.*, 1997; Ulfberg *et al.*, 1997), dont les travailleurs exposés n'ont pas toujours conscience mais qui affectent leur qualité de vie.

Cette étude a également révélé que les travailleurs exposés avaient le plus mauvais contrôle postural dans chacune des conditions auxquelles ils ont été confrontés. Les résultats, lors des tests statiques, sont en accord avec ceux d'autres études qui ont montré des valeurs plus grandes pour le paramètre surface chez des sujets exposés, et ce que ce soit en condition yeux ouverts ou yeux fermés, mettant ainsi en évidence qu'une exposition à long terme aux solvants affectait la précision de la posture orthostatique (Ledin *et al.*, 1989 ; Kuo *et al.*, 1996 ; Smith *et al.*, 1997 ; Yokoyama *et al.*, 1997). A l'inverse, les valeurs pour le paramètre longueur, excepté pour C2 et C5, étaient similaires dans les deux groupes. En fait, la perte de la précision du contrôle postural (caractérisé par le paramètre surface) n'a globalement pas été compensée par un accroissement de la consommation d'énergie (paramètre longueur). Les effets des hydrocarbures aromatiques sur la régulation posturale sont ainsi semblables à ceux des benzodiazépines et reflètent des troubles des mécanismes centraux (Ledin *et al.*, 1993). L'exposition professionnelle aux solvants semblerait donc s'accompagner de perturbations des fonctions cérébrales responsables de l'activité des muscles posturaux telles que la formation réticulée ou le cervelet, conduisant à une instabilité posturale.

Dans des environnements spécifiques dans lesquels la redondance sensorielle est limitée (informations somatosensorielles et/ou visuelles altérées), les travailleurs doivent extraire et associer les afférences des différents systèmes sensoriels encore potentiellement

informationnels, ce qui implique une réorganisation des différentes composantes du contrôle postural. Dans cette étude, le contrôle postural des travailleurs exposés est apparu inadapté au contexte environnemental. Les hydrocarbures aromatiques semblent donc affecter les niveaux d'intégration et d'organisation de la régulation posturale lors de situations de conflit sensoriel. Ceci peut s'expliquer par l'effet dépresseur de ces substances sur le SNC (White & Proctor, 1997) et plus particulièrement sur les structures corticales et sous-corticales (Ameno *et al.*, 1992; Magnusson *et al.*, 1998). L'exposition professionnelle à des solvants, en affectant plus précisément la sensibilité et la fonctionnalité des circuits centraux vestibulaires (Niklasson *et al.*, 1997; Aylott & Prasher, 2002), pourrait conduire à une habilité réduite à gérer les situations de conflit sensoriel et ainsi à une instabilité posturale.

En conclusion, cette étude a rapporté qu'une exposition à long terme aux solvants, principalement aux hydrocarbures aromatiques, pourrait être suspectée d'entraîner une réduction de la vigilance et de la qualité du contrôle postural, particulièrement dans des environnements sensoriels spécifiques, du fait de déficits au niveau des mécanismes centraux. En affectant l'équilibre et l'attention, l'exposition à ces substances chimiques favorise des comportements à risque sur les lieux de travail. Par conséquent, les stratégies préventives visant à réduire la pollution environnementale aux hydrocarbures aromatiques doivent être poursuivies aussi bien que l'utilisation d'équipements de protection adaptés. Certains tests posturographiques, permettant de mettre en évidence des effets précliniques très fins d'une intoxication centrale, pourraient être recommandés dans les batteries de test visant à une évaluation de la neurotoxicité de ces agents en milieu professionnel ou non.

## VI – DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'ensemble de ces travaux avait pour objectif d'une part d'identifier les facteurs individuels posturaux, et extrinsèques, au travers d'une exposition professionnelle aux hydrocarbures benzéniques, à l'origine de troubles de l'équilibre chez l'homme au travail.

Le maintien d'un contrôle postural efficace et adapté aux contraintes internes et externes est indispensable, non seulement pour se déplacer dans son environnement de travail, mais aussi pour réaliser diverses tâches telles que réaliser des gestes précis ou encore porter des charges. Durant une journée de travail, les travailleurs doivent constamment maintenir leur équilibre à partir des interactions visuelles et physiques extraites de l'environnement. Lors de la marche, une interface dynamique est nécessaire entre les systèmes sensoriels (visuel, vestibulaire et proprioceptif) qui contrôlent la posture et les mécanismes de friction entre la chaussure et le sol (Chang *et al.*, 2001). Une réponse rapide et adaptée du sujet face à cet influx d'informations apparaît comme nécessaire dans les mécanismes d'évitement de la chute.

Les mécanismes proactifs du contrôle postural, principalement modulés par les informations visuelles, incluent l'activation d'ajustements posturaux précédant la survenue de forces déstabilisantes et agissent dans le but de minimiser les perturbations de l'équilibre. Les mécanismes réactifs du contrôle postural, déclenchés quant à eux par les informations somatosensorielles et vestibulaires, incluent l'activation d'ajustements posturaux faisant suite à une perturbation externe et visant à récupérer l'équilibre (Patla, 1993). Les trébuchements, les glissades et les chutes interviennent lorsque l'un ou plusieurs de ces mécanismes proactifs et réactifs sont surpassés au cours des interactions travailleur-environnement (Patla, 1997 ; Woollacott & Tang, 1997).

Malgré le fait que la posture érigée soit par nature instable, l'homme dispose cependant d'un répertoire de réponses biomécaniques capables de le protéger d'éventuelles chutes. Ces réponses, soit volontaires par la mise en jeu de processus conscients, soit automatiques par l'intermédiaire de réponses réflexes, peuvent intervenir en amont, pendant ou après la perte d'équilibre (Patla, 1993 ; Woollacott & Tang, 1997). La détection rapide de situations hasardeuses pouvant conduire à une perte d'équilibre (Tang *et al.*, 1999) et la réduction du coefficient de friction lors de l'anticipation de celles-ci (Cham & Redfern, 2002) constituent des mécanismes de contrôle proactifs influant sur les moments articulaires et sur l'angle d'attaque du pied sur sol glissant. La plupart des glissades et des chutes interviennent de manière inattendue et déclenchent des réponses protectrices faisant intervenir aussi bien les extrémités supérieures qu'inférieures (balancement des bras et/ou agrippement), des mouvements des hanches et des chevilles (Horak & Nashner, 1986 ; Horak, 1992), des pas compensatoires (Maki & McIlroy, 1997), ainsi que des mouvements du tronc. Malgré les corrections effectives apportées par les mouvements des hanches et des chevilles sur l'équilibre statique (Gielo-Perczak *et al.*, 1999) ou dynamique lors de la marche (Woollacott *et al.*, 1999), celles-ci restent souvent insuffisantes dans la protection des chutes. En effet, la stratégie du pas semble être l'unique réponse aux larges perturbations de l'équilibre (Maki & McIlroy, 1997).

Les informations visuelles extraites de l'environnement sont utilisées en mode « feedback » afin de contrôler les oscillations corporelles durant une posture statique ou lors de la marche, et en mode « feed-forward » lors du contrôle de la locomotion et dans l'évitement d'obstacles (Patla, 1997).

Notre travail a permis de démontrer qu'une organisation sensori-motrice spécifique, dans laquelle les informations visuelles sont prioritairement utilisées au détriment des informations proprioceptives et vestibulaires, joue un rôle important dans la survenue et la

récidive de chutes. L'information proprioceptive, intégrée à un niveau médullaire, peut générer des réponses motrices rapides de restabilisation alors que l'information visuelle, issue des référentiels environnementaux avec un haut degré d'intégration, génère une réponse plus appropriée mais plus lente. Les stratégies impliquant une contribution visuelle importante apparaissent donc moins adaptées du fait d'une part d'un processus d'intégration plus élevé et par conséquent plus long en comparaison avec les informations proprioceptives et d'autre part de fait de sa nature fluctuante. En effet, de nombreux facteurs de l'environnement visuel, tels que la luminosité, la taille et la structure des repères ou encore la distance séparant l'œil de ces repères affecte le contrôle postural (Paulus *et al.*, 1984). De même, une mauvaise acuité visuelle du travailleur peut altérer sa perception de l'environnement et modifier ainsi son organisation posturale (Paulus *et al.*, 1984). Il a été démontré que des scènes visuelles en mouvement altéreraient la stabilité posturale (Lee & Lishman, 1975 ; Berthoz *et al.*, 1979; Stoffregen, 1985) et plus particulièrement lorsque les informations somatosensorielles sont faussées (Peterka & Benolken, 1995). Enfin, une mauvaise perception des distances est l'une des causes responsables de la survenue des accidents par chute (Clarck *et al.*, 1996).

Les facteurs intrinsèques dégradant le contrôle postural et à l'origine des chutes avait été jusqu'alors bien étudiés chez les sujets âgés (Tinetti & Speechley, 1989 ; Black *et al.*, 1993) et peu chez les travailleurs. Il a été démontré que le fait de consommer de l'alcool (Kubo *et al.*, 1989 ; Ledin & Odkvist, 1991 ; Goebel *et al.*, 1995 ; Tianwu *et al.*, 1995 ; Nieschalk *et al.*, 1999 ; Wober *et al.*, 1999 ; Ahmad *et al.*, 2002), de fumer (Iki *et al.*, 1994 ; Pereira *et al.*, 2001), de prendre des médicaments (Alleyne *et al.*, 1991 ; Robinson *et al.*, 1995 ; Lipscomb *et al.*, 2000), ou encore de présenter une surcharge pondérale (Fromm *et al.*, 1996 ; Corbeil *et al.*, 2001) constituent autant de facteurs pouvant affecter la stabilité posturale et par conséquent augmenter le risque d'accidents du travail causés par une chute

(Gauchard *et al.*, 2003 ; Chau *et al.*, 2004). Alors qu'une multitude de profils posturaux de sujets à risque ont été développés au sein de la population âgée (O'Loughing *et al.*, 1993 ; Tinetti *et al.*, 1988 ; Nevitt *et al.*, 1989 ; Campbell *et al.*, 1989 ; Stalenhoef *et al.*, 1997 ; Stalenhoef *et al.*, 1999 ; Shumway-Cook *et al.*, 2000 ; Stalenhoef *et al.*, 2000 ; Pluijm *et al.*, 2001 ; Tromp *et al.*, 2001 ; Boulgarides *et al.*, 2003 ; Lord *et al.*, 2003 ; Stel *et al.*, 2003 ; Lajoie & Gallagher, 2004), il n'existait pas, à notre connaissance, d'étude identifiant les facteurs de risque posturaux chez l'homme au travail. Ainsi, un schéma central d'intégration basé prioritairement sur les afférences visuelles est un facteur important dans la survenue et la récurrence d'accident du travail causé par une chute. Une habilité réduite à s'appuyer sur le système vestibulaire va être à l'origine de temps de latence des réponses neuromusculaires plus longues et d'une instabilité posturale lors de situations de conflit sensoriel. De plus, les ajustements posturaux de type réactionnel apparaissent insuffisants pour réguler l'équilibre lors d'une locomotion perturbée. Enfin, la réalisation d'une double-tâche apparaît ainsi comme un facteur de risque de chute important par ses conséquences sur les ajustements posturaux (Lajoie *et al.*, 1993; McIlroy and Maki, 1995 ; Jamet *et al.*, 2004) et sur la résolution des situations de conflits sensoriels. Les interférences cognitives vont en effet être à l'origine de réponses motrices inadaptées et de déséquilibres. Notre travail fournit ainsi un profil postural de personnel féminin à risque qui pourrait être utilisé par les Services de Santé au Travail dans le cadre de plans d'action visant à prévenir les accidents causés par les chutes.

Comme cela a été suggéré chez les sujets âgés, la protection contre les chutes doit être potentialisée par l'étude des facteurs de risque et l'identification des salariées à risque par les personnels médicaux, suivi par la mise en œuvre d'interventions ciblées sur les zones fonctionnelles déficitaires chez ces sujets. Concernant ce dernier point et étant donné que la très grande majorité des sujets monochuteurs et multichuteurs de notre étude ont révélé ne pas pratiquer d'activités physiques et sportives, le commencement d'une activité physique

adaptée à leur âge et à leurs capacités et/ou la participation aux « ateliers équilibre » qui se développent dans la plupart des régions françaises pourraient apparaître comme un excellent moyen de limiter les effets de certains facteurs responsables des chutes.

La pratique régulière d'activités physiques est en effet connue pour améliorer le contrôle postural statique et dynamique (Hugel *et al.*, 1999 ; Perrot *et al.*, 1998 ; Perrin *et al.*, 1998 ; Perrin *et al.*, 2002) en réduisant la dépendance à l'égard du champ visuel (Robertson *et al.*, 1994 ; Golomer *et al.*, 1997 ; Hain *et al.*, 1999 ; Vuillerme *et al.*, 2001a), en développant un système proprioceptif plus sensible (Danion *et al.*, 2000) et en favorisant une meilleure position articulaire de la cheville associée à une augmentation du tonus musculaire (Aydin *et al.*, 2002). De plus, la pratique pendant de longues années d'une activité physique et sportive s'accompagne d'une plus grande efficacité dans la capacité de réorganisation des différentes afférences sensorielles, dans la mise en œuvre d'un contrôle postural adapté (Aalto *et al.*, 1990 ; Robertson *et al.*, 1994 ; Kioumourtzoglou *et al.*, 1997 ; Vuillerme *et al.*, 2001b) et d'une perception plus fine de la position du corps, probablement dû au développement d'un modèle interne finalisé et précis (Bringoux *et al.*, 2000). L'entraînement sportif pourrait permettre en outre le passage d'une dominance sensorimotrice visuelle à une dominance sensorimotrice proprioceptive (Mesure *et al.*, 1997 ; Golomer *et al.*, 1999). Il a été également démontré que la pratique d'activités physiques, particulièrement celles à dominante proprioceptive, contrecarrait les effets de l'âge sur l'équilibre, même si celle-ci était commencée tardivement (Perrin *et al.*, 1999), en agissant sur la sensibilité et la fonctionnalité des capteurs sensoriels de l'équilibre (Gauchard *et al.*, 2003b ; Gauchard *et al.*, 2004) et en influençant positivement les thérapies réhabilitatrices (Szturm *et al.*, 1994). De nombreuses études à visée prospective ont déjà évalué l'efficacité des programmes d'activités physiques, selon leur contenu, leur intensité, leur durée et leur fréquence sur la qualité du contrôle

postural (Henderson *et al.*, 1998 ; Gregg *et al.*, 2000 ; Carter *et al.*, 2001 ; Lan *et al.*, 2002 ; Rydwick *et al.*, 2004).

La promotion de la pratique d'activités physiques, que ce soit à titre personnel ou dans le cadre d'un programme spécifique accompagné, pourrait ainsi s'inscrire dans les approches préventives visant à réduire les accidents du travail causés par des chutes et plus globalement à améliorer la qualité de vie des travailleurs. En effet, il a déjà été démontré que l'absence de pratique sportive était corrélée aux accidents du travail (Chau *et al.*, 2002 ; Chau *et al.*, 2004) et plus particulièrement à ceux causés par des chutes (Gauchard *et al.*, 2003a). A l'inverse, les travailleurs pratiquant régulièrement une activité physique et sportive présentent moins d'accidents, moins d'absences dues à la maladie par rapport aux travailleurs sédentaires et la durée de leurs absences est plus courte (Simon-Rigaud, 1995).

Perspectives : Il serait intéressant d'envisager des études prospectives longitudinales qui nous permettraient de suivre les sujets à risque sur de longues périodes et ainsi d'affiner les profils posturaux associés aux chutes développés au cours de notre étude. L'intégration des salariés à risque dans des programmes d'activités physiques et sportives pourrait également faire l'objet d'un suivi avec des possibilités d'ajustement et/ou de renforcement de ceux-ci.

Notre deuxième protocole s'intéressait à un autre maillon de la chaîne causale : les relations entre expositions professionnelles (facteurs extrinsèques) et les troubles de l'équilibre et de la vigilance. Elle s'inscrivait dans une démarche visant à explorer les relations entre l'exposition de salariés à certains agents physico-chimiques présents dans l'environnement professionnel et ses effets précoces fonctionnels ou cliniques, avant le développement de pathologies plus graves (neuropathie périphérique, tumeurs...). Notre étude a montré qu'une exposition professionnelle aux hydrocarbures benzéniques s'accompagnait de troubles de l'équilibre et d'un état de vigilance réduit. La vigilance joue un

rôle primordial dans l'évitement d'obstacles ou encore dans l'anticipation de déstabilisations. De son côté, la fonction d'équilibration assure en permanence le maintien d'une posture adaptée aux conditions environnementales changeantes. Aussi, en affectant ces deux grandes fonctions du système nerveux central, l'exposition professionnelle aux solvants pourrait augmenter le risque d'accidents du travail et notamment ceux causés par des chutes. Cette approche a permis une meilleure connaissance des structures mises en jeu au niveau du système nerveux central et périphérique (oreille interne, proprioception, vision, intégration au niveau des noyaux vestibulaires du tronc cérébral et de structures sous-corticales, cervelet) et pourrait contribuer à la prévention des accidents du travail causés par les chutes. La mise en évidence de tels effets précoces contribue à une meilleure compréhension de la nature des menaces environnementales en entreprise et permet par conséquent le développement de stratégies préventives adaptées. La mise en œuvre de notre étude, visant à évaluer les risques d'origine environnementale en milieu professionnel, a eu également un intérêt pratique puisqu'elle a permis le contrôle de la salubrité des atmosphères de travail de l'entreprise et conforte ainsi la politique mise en place préalablement au sein de celle-ci, c'est-à-dire une utilisation toujours plus restreinte des solvants. Une réflexion plus large sur les moyens de protection et leur éventuel renforcement pourrait également s'engager entre le Service de Santé au Travail et les salariés et dirigeants de l'entreprise.

D'autre part, la méthodologie mise en œuvre au cours de cette étude apparaît comme une technique simple, reproductible et non invasive dans la détection des dysfonctionnements causés par une exposition professionnelle aux hydrocarbures benzéniques. Le développement d'outils d'investigation performants ambulatoires en entreprise, à partir d'indicateurs prédictifs, permettra la mise en évidence d'atteintes précoces chez les travailleurs, non seulement par les solvants, mais également par d'autres facteurs environnementaux, tels que les métaux (mercure, plomb...) ou certains pesticides.

*Perspectives* : Une seconde étude épidémiologique de type « exposés-non exposés » devrait démarrer très prochainement en partenariat avec le CHU de Nancy et pourrait nous permettre de poursuivre la mise en évidence d'atteintes précoces du système nerveux central à l'aide cette fois-ci d'outils d'investigation encore plus performants à travers l'évaluation de l'organisation sensorielle et du contrôle moteur de sujets exposés sur plate-forme de posturographie (EquiTest, NeuroCom, Oregon, USA), de leur qualité de stabilisation du regard par vidéonystagmographie, de leur niveau de vigilance par enregistrements actimétriques et de la qualité de leur sommeil par enregistrements polygraphiques.

## VII – CONCLUSION GÉNÉRALE

La connaissance conjointe des facteurs intrinsèques et extrinsèques à l'origine de troubles de l'équilibre est indispensable à la prévention du risque d'accidents du travail causés par les chutes. Celle-ci pourrait en effet permettre la mise en place de stratégies visant à mieux adapter la tâche et l'environnement du travailleur et ainsi de réduire les répercussions humaines et financières associées à ce type d'accident. En terme de Santé Publique, la prise en compte du vieillissement croissant de la population des salariés et de leurs éventuels troubles de l'équilibre passent tout d'abord par l'identification et par la compréhension des facteurs intrinsèques et / ou extrinsèques à l'origine de ceux-ci, puis par la détection des travailleurs à risque et enfin par leur accompagnement. L'étude des liens entre l'exposition aux solvants et les effets chroniques sur la santé des travailleurs s'inscrit dans une réflexion plus large qui tend à évaluer le rôle de l'environnement en tant que facteur de santé et s'inscrit directement dans la lignée du Plan National Santé Environnement (PNSE 2004-2008) qui vise principalement à répondre aux interrogations des Français sur les conséquences sanitaires à court et moyen terme de l'exposition à certaines pollutions de leur environnement et du Plan Santé au Travail (2005-2009) qui a pour objectif d'améliorer durablement la prévention des risques professionnels. L'approfondissement des connaissances sur le rôle de l'environnement sur la santé constitue donc un enjeu scientifique majeur. La prévention des risques en milieu de travail repose, en effet, essentiellement sur la connaissance des dangers des produits et des expositions auxquels les travailleurs sont susceptibles d'être soumis.

## VIII – BIBLIOGRAPHIE

**Agnew J, Saruda AJ.** Age and fatal work-related falls. *Human factors*, 1993;35:731-736.

**Agostini JV, Tinetti ME.** Drugs and falls: rethinking the approach to medication risk in older adults. *J. Am. Geriatr. Soc.*, 2002;50:1744-1745.

**Ahmad S, Rohrbaugh JW, Anokhin AP, Sirevaag EJ, Goebel JA.** Effects of lifetime ethanol consumption on postural control: a computerized dynamic posturography study. *J. Vestib. Res.*, 2002;12:53-64.

**Alexander NB, Shepard N, Gu MJ, Schultz A.** Postural control in young and elderly adults when stance is perturbed: kinematics. *J. Gerontol.*, 1992;37:M79-M87.

**Alleyne BC, Stuart P, Copes R.** Alcohol and other drug use in occupational fatalities. *J. Occup. Med.*, 1991;33:496-500.

**Allum JHJ, Shepard NT.** An overview of the clinical use of dynamic posturography in the differential diagnosis of balance disorders. *J. Vestib. Res.*, 1999;9:223-252.

**Andersen I, Lundqvist GR, Molhave L, Pedersen OF, Proctor DF, Vaeth M, Wyon DP.** Human response to controlled levels of toluene in six-hour exposures. *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health*, 1983;9:405-418.

**Andersson R, Lagerlöf E.** Accident data in the new Swedish information system on occupational injuries. *Ergonomics*, 1983;26:33-42.

**Andres RO, O'Connor D, Eng T.** A practical synthesis of biomechanical results to prevent slips and falls in the workplace. In : S Kumar (Eds.). *Advances in Industrial Ergonomics and Safety IV* (London: Taylor et Francis), 1992, pp. 1001-1006.

**Anger WK.** Worksite behavioural research: results, sensitive methods, test batteries and the transition from laboratory data to human health. *Neurotoxicology*, 1990;11:629-720.

**Antti-Poika M, Ojala M, Matikainen E, Vaheri E, Juntenen J.** Occupational exposure to solvents and cerebellar, brainstem and vestibular functions. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1989;61:397-401.

**Arbetsjukdomar och Arbetsolyckor.** *Occupational Diseases and Occupational Accidents 1994*, (Solna: National Board of Occupational Safety and Health), 1996.

**Arlien-Soborg P, Zilstorff K, Grandjean B, Milling Pedersen L.** Vestibular dysfunction in occupational chronic solvent intoxication. *Clin. Otolaryngol.*, 1981;6:285-290.

**Arndt V, Rothenbacher D, Daniel U, Zschenderlein B, Schuberth S, Brenner H.** All-cause and cause specific mortality in a cohort of 20 000 construction workers; results from a 10 year follow up. *Occup. Environ. Med.*, 2004;61:419-25.

**Assaiante C, Amblard B.** An ontogenic model for the sensorimotor organization of balance control in humans. *Human Movement Science*, 1995;14:13-43.

**Axelsson O, Hane M, Hogstedt C.** A case referent study on neuropsychiatric disorders among workers exposed to solvents. *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health*, 1976;2:14-20.

**Aydin T, Yildiz Y, Yildiz C, Atesalp S, Kalyon TA.** Proprioception of the ankle: a comparison between female teenaged gymnasts and controls. *Foot Ankle Int.*, 2002;23:123-129.

**Aylott S, Prasher D.** Solvents impaired balance in man. *Noise Health*, 2002;4:63-71.

**Baker EL Jr, Smith TJ, Landrigan PJ.** The neurotoxicity of industrial solvents: a review of the literature. *American Journal of Industrial Medicine*, 1985;8:207-217.

**Baker EL.** A review of recent research on health effects of human occupational exposure to organic solvents. *Journal of Occupational Medicine*, 1994;36:1079-1092.

**Balestra C, Duchateau J, Hainaut K.** Effects of fatigue on the stretch reflex in a human muscle. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 1992;85:46-52.

**Ballance PE, Morgan J, Senior D.** Operational experience with a portable friction testing device in university buildings. *Ergonomics*, 1985;28:1043-1054.

**Baloh RW, Jacobson K, Honrubia V.** Idiopathic bilateral vestibulopathy. *Neurology*, 1989;39:272-275.

**Baloh RW, Jacobson K, Winder T.** Drop attacks with Menière's syndrome. *Annals of Neurology*, 1990;28:284-387.

**Barbera N, Bulla G, Romano G.** A fatal case of benzene poisoning. *Journal of Forensic Sciences*, 1998;43:1250-1251.

**Bassey EJ.** Falls by elderly people at home: prevalence and associated factors. *Age Ageing*, 1988;17:365-372.

**Bates B, Ostrenig Lr, Sawhill JA, James SL.** An assessment of subject variability, subject-shoe interaction and the evaluation of running shoes using ground reaction force data. *Journal of Biomechanics*, 1983;16:181-191.

**Bazydło-Golinska G.** The effect of organic solvents on the inner ear. *Medycyna Pracy*, 1993;44:69-78.

**Benamghar L, Chau N, Saunier-Aptel E, Mergel B, Mur JM.** Les accidents chez les élèves des lycées professionnels et technologiques en Lorraine. *Revue d'Epidémiologie et de Santé Publique*, 1998;46:5-13.

**Bentley TA, Haslam RA.** Slip, trip and fall accidents occurring during the delivery of mail. *Ergonomics*, 1998;41:1859-1872.

- Berthoz A, Lacour M, Soechting JF, Vidal PP.** The role of vision in the control of posture during linear motion. In : O Pompeiano, J Allum (Eds.), *Progress in brain research.: Reflex Control of Posture and Movement* (New York: Elsevier), 1979, pp. 197-209.
- Berthoz A, Droulez J, Vidal PP, Yoshida K.** Neural correlates of horizontal VOR cancellation during rapid eye movements in the cat. *J. Physiol. (London)*, 1989;419:717-751.
- Biscaldi GP, Mingardi M, Pollini G, Moglia A, Bossi MC.** Acute toluene poisoning. Electrophysiological and vestibular investigations. *Toxicol. Eur. Res.*, 1981;3:271-273.
- Black FO, Wall C, Nashner LM.** Effects of visual and support-surface orientation references upon postural control in vestibular deficient subjects. *Acta Otolaryngol. (Stockholm)*, 1983;95:199-210.
- Black FO, Paloski WH, Doxey-Gasway DD, Reschke MF.** Vestibular plasticity following orbital spaceflight: recovery from postflight postural instability. *Acta Otolaryngol. (Stockholm)*, 1995;Suppl(520):450-454.
- Black SE, Maki BE, Fernie GR.** Aging, imbalance, and falls. In : JA Sharpe and HO Barber (Eds.), *The Vestibulo-ocular Reflex and Vertigo* (New York: Raven Press), pp. 317-355.
- Blake AJ, Morgan K, Bendall MJ, Dallosso H, Ebrahim SB, Arie TH, Fentem PH, Boulgarides LK, McGinty SM, Willett JA, Barnes CW.** Use of clinical and impairment based tests to predict falls by community-dwelling older adults. *Physical Therapy*, 2003;83:328-339.
- Borel L, Harlay F, Magnan J, Chays A, Lacour M.** Deficits and recovery of head and trunk orientation and stabilization after unilateral vestibular loss. *Brain*, 2002;125:880-94.
- Brandt T, Dieterich M.** Vestibular falls. *J. Vestib. Res.*, 1993;3:3-14.
- Brandt T, Steddin S.** Current view of the mechanism of benign paroxysmal positioning vertigo : cupulolithiasis or canalolithiasis? *J. Vestib. Res.*, 1993;3:373-382.
- Bravaccio F, Ammendola A, Barruffo L, Carlomagno S.** H-reflex behavior in glue (n-hexane) neuropathy. *Clin. Toxicol.*, 1981;18:1369-1375.
- Bronstein AM, Hood JD, Gresty MA, Panagi C.** Visual control of balance in cerebellar and Parkinsonian syndromes. *Brain*, 1990;113:767-770.
- Brooke-Wavell k, Prevelic GM, Bakridan C, Ginsburg J.** Effects of physical activity and menopausal hormone replacement therapy on postural stability in postmenopausal women : a cross-sectional study. *Maturitas*, 2001;37:167-172.
- Brooks V.** The neural basis of motor control. New York: Oxford University Press, 1986.
- Büchele W, Brandt T.** Vestibulo-spinal ataxia in benign paroxysmal positional vertigo. *Agressologie*, 1979;20:221-222.
- Buck PC, Coleman VP.** Slipping, tripping and falling accidents at work: a national picture. *Ergonomics*, 1985;28:949-958.

**Buchner DM, Cress ME, de Lateur BJ, Esselman PC, Margherita AJ, Price R, Wagner EH.** A comparison of the effects of three types of endurance training on balance and other risks factors in older adults. *Ageing (Milano)*, 1997;9:112-119.

**Bulletin Officiel du Ministère des Affaires Sociales et de la Solidarité Nationale. Circulaire du 19 juillet 1982.** Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France - Cahiers de Notes Documentaires - note n°2098-174-99.

**Burton AW, Davis W.** Assessing balance in adapted physical education: fundamental concepts and applications. *Adapt. Phys. Act. Quart.*, 1992;9:14-46.

**Caisse Nationale D'Assurance Maladie Des Travailleurs Salariés (CNAMTS).** *Statistiques nationales d'accidents du travail, 1988 à 1994*, (Paris: CNAMTS), 1996.

**Caisse Nationale D'Assurance Maladie Des Travailleurs Salariés (CNAMTS).** *Statistiques financières et technologiques des accidents du travail (Années 1995-1996-1997)*, (Paris : CNAMTS), 1999.

**Calabrese G, Martini A, Sessa G, Cellini M, Bartolucci GB, Marcuzzo G, De Rosa E.** Otoneurological study in workers exposed to styrene in the fibreglass industry. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1996;68:219-223.

**Campagna D, Mergler D, Picot A, Sahuquillo J, Plevin C, Brun A, Leclerc-Marzin MP, Lamotte G, Huel G.** Monitoring neurotoxic effects among laboratory personnel working with organic solvents. *Revue d'Epidémiologie et de Santé Publique*, 1995;43:519-532.

**Campbell AJ, Borrie MJ, Spears GF.** Risk factors for falls in a community-based prospective study of people 70 years and older. *J. Gerontol.*, 1989;44:112-117.

**Carangan M, Tham KY, Seow E.** Work-related injury sustained by foreign workers in Singapore. *Ann. Acad. Med. Singapore*, 2004;33:209-213.

**Caron O.** Effects of local fatigue of the lower limbs on postural control and postural stability in standing posture. *Neurosci. Lett.*, 2003;340:83-86.

**Carter ND, Kannus P, Khan KM.** Exercise in the prevention of falls in older people: a systematic literature review examining the rationale and the evidence. *Sports Med.*, 2001;31:427-438.

**Cham R, Redfern M.S.** Changes in gait biomechanics when anticipating slippery floors. *Gait Posture*, 2002;15:159-171.

**Chang CM, Yu CW, Fong KY, Leung SY, Tsin TW, Yu YL, Cheung TF, Chan SY.** N-hexane neuropathy in offset printers. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry.*, 1994;56:538-542.

**Chau N, Petry D, Gavillot C, Guillaume S, Beaucaillou C, Bougkard E, Gruber E, Monhoven N, Andre JM.** Implications professionnelles et lésions sévères du membre supérieur. *Archives des Maladies Professionnelles et de Médecine du Travail*, 1995;56:12-22.

**Chau N, Mur JM, Benamghar L, Siegfried C, Dangelzer JL, Francais M, Jacquin R, Sourdot A.** Relationships between some individuals characteristics and occupational accidents in the construction industry: a case-control study on 880 victims of accidents occurred during a two-year period. *J. Occup. Health*, 2002;44:131-139.

**Chau N, Mur JM, Touron C, Benamghar L, Dehaene D.** Correlates of occupational injuries for various jobs in railway workers: a case-control study. *J. Occup. Health*, 2004;46:272-80.

**Chau N, Gauchard GC, Siegfried C, Benamghar L, Dangelzer JL, Français M, Jacquin R, Sourdot A, Perrin Ph, Mur JM.** Relationships of job, age, and life conditions with the causes and severity of occupational injuries in construction workers. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 2004;77 :60-66.

**Chesher GB, Franks HM, Hensley VR, Hensley WJ, Jackson DM, Starmer GA, Teo RK.** The interaction of ethanol and delta9-tetrahydrocannabinol in man: effects on perceptual, cognitive and motor functions. *Med. J. Aust.*, 1976;2:159-163.

**Chia SE, Goh J, Lee G, Foo SC, Gan SL, Bose K, Jeyaratnam J.** Use of a computerized postural sway measurement system for assessing workers exposed to manganese. *Clin. Exp. Pharmacol. Physiol.*, 1993;20:549-553.

**Chia SE, Chua LH, Ng TP, Foo SC, Jeyaratnam J.** Postural stability of workers exposed to lead. *Occup. Environ. Med.*, 1994;51:768-771.

**Chia SE, Gan SL, Chua LH, Foo SC, Jeyaratnam J.** Postural stability among manganese exposed workers. *Neurotoxicology*, 1995;16:519-526.

**Clarck M, Jackson P, Cohen HH.** Why you don't see can hurt you: understanding the role of depth perception in slip, trip and fall incidents. *Ergonomics in Design*, 1996;4:16-21.

**CNAMTS (Caisse Nationale de l'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés).** Statistiques financières et technologiques des accidents du travail (années 1997, 1998, 1999). CNAMTS, Paris, 2001.

**Colledge NR, Cantley P, Peaston I, Brash H, Lewis S, Wilson JA.** Ageing and balance: the measurement of spontaneous sway by posturography. *Gerontology*, 1994;40:273-278.

**Cohen H, Heaton LG, Congdon SL, Jenkins HA.** Changes in Sensory Organization Test scores with age. *Age Ageing*, 1996;25:39-44.

**Corbeil P, Simoneau M, Rancourt D, Tremblay A, Teasdale N.** Increased risk for falling associated with obesity: mathematical modeling of postural control. *IEEE Trans. Neural. Syst. Rehabil. Eng.*, 2001;9:126-36.

**Corbeil P, Blouin JS, Begin F, Nougier V, Teasdale N.** Perturbation of the postural control system induced by muscular fatigue. *Gait Posture*, 2003;18:92-100.

**Crémieux J, Perrin Ph, Mesure S.** Posture, équilibre et activités physiques et sportives. In : H Lamendin, D courteix (Eds.), Abrégé en biologie et pratique sportive. Massion, Paris, 1995, pp. 98-113.

**Daniell WE, Claypoole KH, Checkoway H, Smith-Weller T, Dager SR, Townes BD, Rosenstock L.** Neuropsychological function in retired workers with previous long-term occupational exposure to solvents. *Occupational and Environmental Medicine*, 1999;56:93-105.

**Danion F, Boyadjian A, Marin L.** Control of locomotion in expert gymnasts in the absence of vision. *J. Sports Sci.*, 2000;18:809-814.

**Davis PR.** Human factors contributing to slips, trips and falls. *Ergonomics*, 1983;26:51-59.

**Demange V, Chouanière D, Loquet G, Perrin P, Johnson AC, Planeau V, Baudin V, Toamain JP, Morata T.** Comment explorer l'otoxicité des solvants dans le cadre d'études épidémiologiques en milieu professionnel. *Les Notes Scientifiques et Techniques de l'INRS*, 2001, janvier, 34p.

**Destée A.** Troubles de l'équilibre. Orientation diagnostique. *La Revue du Praticien (Paris)*, 1994;44:1127-1130.

**Dichgans J, Brandt T.** Visual-vestibular interaction ; Effects on self-motion perception and postural control. In : R Helb, H Leibowitz, H Teuber (Eds.), *Handbook of Sensory Physiology*, 1978;5:755-804.

**Dick F, Semple S, Chen R, Seaton A.** Neurological deficits in solvent-exposed painters: a syndrome including impaired colour vision, cognitive defects, tremor and loss of vibration sensation. *Q.J.M.*, 2000;93:655-611.

**Diener HC, Dichgans J.** On the role of vestibular and somatosensory information for dynamic postural control in humans. In : O Pompeiano, J Allum (Eds.), *Progress in Brain Research*. Elsevier Science, Amsterdam, 1988, 76, pp. 253-262.

**Diener HC, Dichgans J, Bacher M, Gompf B.** Quantification of postural sway in normals and patients with cerebellar disease. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, 1984;24:134-142.

**Dieterich M, Brandt T, Fries W.** Otolith function in man : results from a case of otolith Tullio phenomenon. *Brain*, 1989;112:1377-1392.

**Dietz V, Trippel M, Ibrahim IK, Berger W.** Human stance on a sinusoidally translating platform: balance control by feedforward and feedback mechanisms. *Exp. Brain Res.*, 1993;93:352-362.

**Do MC, Bussel B, Brenière Y.** Influence of plantar cutaneous afferents on early compensatory reactions to forward fall. *Exp. Brain Res.*, 1990;79:319-324.

**Dubois JP, Levame JH.** Anatomie descriptive du pied humain. Maloine, Paris, 1966.

**Ekberg K, Barregard L, Hagberg S.** Chronic and acute effects of solvents on central nervous system functions in floor layers. *Br. J. Ind. Med.*, 1986;43:101-106.

**Ekblad S, Bergendahl A, Enler P, Ledin T, Mollen C, Hammar M.** Disturbances in postural balance are common in postmenopausal women with vasomotor symptoms. *Climacteric*, 2000;3:192-198.

**El-Kahky AM, Kingma K, Dolmans M, de Jong I.** Balance control near the limit of stability in various sensory conditions in healthy subjects and patients suffering from vertigo or balance disorders: impact of sensory input on balance control. *Acta Otolaryngol. (Stockholm)*, 2000;120:508-516.

**Ellingsen DG, Lorentzen P, Langard S.** A neuro psychological study of patients exposed to organic solvents. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 1997;3:177-183.

**Enjalbert M, Rabishong P, Micallef JP, Peruchon E, Viel E, Eledjam JJ, Pélissier J.** Sensibilité plantaire et équilibration. In: J Pélissier, V Brun, M Enjalbert. Posture, équilibration et médecine de rééducation. Masson, Paris, 1993, pp. 9-23.

**Evans JG.** Drugs and falls in later life. *Lancet*, 2003;361:448.

**Feldman RG, McKee A.** Case records of Massachusetts General Hospitals: Weekly clinicopathological exercises. *NEJM*, 1993;329:1560-1567.

**Feldman RG.** In: *Occupational and environmental neurotoxicology* (Philadelphia: Lipincott-Raven), 1999.

**Fiedler N, Weisel C, Lynch R, Kelly-McNeil K, Wedeen R, Jones K, Udasin I, Ohman-Strickland P, Gochfeld M.** Cognitive effects of chronic exposure to lead and solvents. *Am. J. Ind. Med.*, 2003;44:413-23.

**Fothergill J, O'Driscoll, Hashemi K.** The role of environmental factors in causing injury through falls in public places. *Ergonomics*, 1995;38:220-223.

**Friedman.** NeuroCom International, Inc. *EquiTest system operator's manual*, Clackamas, Oregon, 1988.

**Froom P, Melamed S, Kristal-Boneh E, Gofer D, Ribak J.** Industrial accidents are related to relative body weight: the Israeli CORDIS study. *Occup. Environ. Med.*, 1996;53:832-835.

**Gauchard GC, Chau N, Mur JM, Perrin Ph.** Falls and working individuals: role of extrinsic and intrinsic factors. *Ergonomics*, 2001a;44:1330-1339.

**Gauchard GC, Jeandel C, Perrin Ph.** Physical and sporting activities improve vestibular afferent usage and balance in the elderly human subjects. *Gerontology*, 2001b;47:263-270.

**Gauchard GC, Gangloff P, Vouriot A, Mallié JP, Perrin Ph.** Effects of exercise-induced fatigue with and without hydration on static postural control in adult human subjects. *Int. J. Neurosci.*, 2002;112:1191-1206.

**Gauchard GC, Chau N, Tournon C, Benamghar L, Dehaene D, Perrin Ph, Mur JM.** Individual characteristics in occupational accidents due to imbalance: a case-control study of the employees of a railway company. *Occup. Environ. Med.*, 2003a;60:330-335.

**Gauchard GC, Gangloff P, Jeandel C, Perrin Ph.** Physical activity improves gaze and posture control in the elderly. *Neurosci. Res.*, 2003b;45:409-417.

**Gauchard GC, Vancon G, Gentine A, Jeandel C, Perrin PP.** Physical activity after retirement enhances vestibulo-ocular reflex in elderly humans. *Neurosci. Lett.*, 2004;360:17-20.

**Gerr F, Letz R. Solvents.** In: W Rom (Eds.), *Environmental and occupational medicine* (Boston: Little and Brown), 1992, pp. 843-859.

**Geuskens RB, Van der Klaauw MM, Van der Tuin J, Van Hemmen JJ.** Exposure to styrene and health complaints in the Dutch glass-reinforced plastics industry. *Ann. Occup. Hyg.*, 1992;36:47-57.

**Gielo-Perczak K, Winter DA, Patla AE.** Analysis of the combined effects of stiffness and damping of body system on the strategy of the control during quiet standing. *Proceedings of the XVIIth Congress of the International Society of Biomechanics*, Calgary, Canada, 8-13 August 1999.

**Goebel JA, Dunham DN, Rohrbaugh JW, Fischel D, Stewart PA.** Dose-related effects of alcohol on dynamic posturography and oculomotor measures. *Acta Otolaryngol. Suppl.*, 1995;520:212-215.

**Golomer E, Dupui P, Monod H.** The effects of maturation of self-induced dynamic body sway frequencies of girls performing acrobatics or classical dance. *Eur. J. App. Physiol. Occup. Physiol.*, 1997;76:140-144.

**Golomer E, Crémieux J, Dupui P, Isableu B, Ohlmann T.** Visual contribution to self-induced body sway frequencies and visual perception of male professional dancers. *Neurosci. Lett.*, 1998;167:189-192.

**Graham DG, Amarath V, Valentine WM, Pyle SJ, Anthony DC.** Pathogenic studies of hexane and carbon disulfide neurotoxicity. *Critical Reviews of Toxicology*, 1995;25:91-112.

**Gregg EW, Pereira MA, Caspersen CJ.** Physical activity, falls, and fractures among older adults: a review of the epidemiologic evidence. *J. Am. Geriatr. Soc.*, 2000;48:883-93.

**Gronqvist R.** An apparatus and a method for determining the slip resistance of shoes and floors by simulation of human foot motion. *Ergonomics*, 1989;32:979-995.

**Gronqvist R, Roine J.** Serious occupational accidents caused by slipping. In: R Nielsen, K Jorgensen (Eds.). *Advances in Industrial Ergonomics and Safety IV* (London: Taylor and Francis), 1993, pp. 515-519.

**Grönqvist R, Abeysekera J, Gard G, Hsiang SM, Leamon TB, Newman DJ, Gielo-Perczak K, Lockhart TE, Pai CY.** Human-centred approaches in slipperiness measurement. *Ergonomics*, 2001a;44:1167-1199.

**Grönqvist R, Chang WR, Courtney TK, Leamon TB, Redfern MS, Strandberg L.** Measurement of slipperiness: fundamental concepts and definitions. *Ergonomics*, 2001b;44:1102-1117.

**Guidetti G, Palano D, Molinari G, Galetti R, Monzani D.** Il ruolo della stabilometria computerizzata nella quantificazione oggettiva delle correlazioni tra disordini cranio-mandibolari e turbe dell'equilibrio. *Otolaryngol.*, 1993;43:181-189.

**Guyot JP.** Rappel d'anatomie et de physiologie du système vestibulaire. *Rev. Med. Suisse Romande*, 1993;113:665-669.

**Haglid KG, Briving C, Hansson HA, Rosengren L, Kjellstrand P, Stabron D, Swedrin U Wronski A.** Trichloroethylene: Long lasting changes in the brain after rehabilitation. *Neurotoxicology*, 1981;2:659-673.

**Hanninen J.** Neurobehavioral assessment of long-term solvent effects on man. In: Riihimaki V, Ulfvarson U (Eds.), *Safety and Health Aspects of Organic Solvents* (New York: Liss AR) 1986:225-236.

**Hanson JP, Redfern MS, Mazumbar M.** Predicting slips and falls considering required and available friction. *Ergonomics*, 1999;42:1619-1633.

**Harkonen H, Lindstrom K, Seppalainen AM, Asp S, Hernberg S.** Exposure-response relationship between styrene exposure and central nervous functions. *Scandinavian Journal of Work Environment and Health*, 1978;4:53-59.

**Hayashi R, Miyake A, Watanabe S.** The functional role of sensory inputs from the foot: stabilizing human standing posture during voluntary and vibration-induced body sway. *Neurosci. Res.*, 1988;5:203-213.

**Health and Safety Executive (HSE).** Watch your Step. *Prevention of Slipping, Tripping and Falling Accidents at Work*. (London: HMSO), 1985.

**Henderson NK, White CP, Eisman JA.** The roles of exercise and fall risk reduction in the prevention of osteoporosis. *Endocrinol. Metab. Clin. North. Am.*, 1998;27:369-387.

**Herdman SJ.** Traumatic brain injury, In : SJ Herdman (Eds.), *Vestibular Rehabilitation*. (Philadelphia: Davis Company), 1994, pp. 352.

**Hoang K, Stevenson MG, Nhieu J, Bunternghit Y.** *Dynamic Friction at Heel Strike between a Range of Protective Footwear and Non-slip Floor Surfaces, Report CSS/1/87* (Kensington, Australia: Center for Safety Science), 1987.

**Horak FB.** Postural instability in Parkinson's disease: motor coordination and sensory organization. *Neurol. Rep.*, 1988;12:54-55.

**Horak FB.** Effects of neurological disorders on postural movement strategies in the elderly. In : B Vellas, M Toupet, JL Rubenstein, Albarade, Y Christen (Eds.), *Falls, Balance and Gait Disorders in the Elderly* (Paris: Elsevier), 1992, pp. 137-151.

**Horak FB, Nashner LM.** Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configurations. *Journal of Neurophysiology*, 1986;55:1369-1381.

**Horak FB, Shumway-Cook A, Crowe T, Black FO.** Vestibular function and motor proficiency of children with impaired hearing, or with learning disability and motor impairment. *Dev. Med. Child Neurol.*, 1988;30:64-79.

**Horak FB, Shupert CL, Alar M.** Components of postural dyscontrol in the elderly: a review. *Neurobiol. Ageing*, 1989;10:727-739.

**Horak FB, Nashner LM, Diener HC.** Postural strategies associated with somatosensory and vestibular loss. *Exp. Brain Res.*, 1990;82:167-177.

**Horak FB, Shupert CL, Dietz V, Horstmann G.** Vestibular and somatosensory contributions to responses to head and body displacements in stance. *Exp. Brain Res.*, 1994;100:93-106.

**Hoshiyama M, Watanabe S, Kaneoke Y, Koike Y, Takahashi A.** Effect of optokinetic stimulation on human balance recovery in unexpected forward fall. *Neurosci. Res.*, 1993;18:121-127.

**Hu MH, Woollacott MH.** Multi-sensory training of standing balance in older adults: II. Kinetic and electromyographic postural responses. *J. Gerontol.*, 1994;49:M69-M71.

**Huang HC, Gau ML, Lin WC, George K.** Assessing risk of falling in older adults. *Public Health Nurs.*, 2003;20:399-411.

**Hug F, Faucher M, Marqueste T, Guillot Ch, Kipson N, Jammes Y.** Electromyographic signs of neuromuscular fatigue are concomitant with further increase in ventilation during static handgrip. *Clin. Physiol. Funct. Imaging.*, 2004;24:25-32.

**Hugel F, Cadopi M, Kohler F, Perrin Ph.** Postural control of ballet dancers: a specific use of visual input for artistic purposes. *Int. J. Sports Med.*, 1999;20:86-92.

**Hsiao H, Simeonov P.** Preventing falls from roofs: a critical review. *Ergonomics*, 2001;44:537-561.

**Hyden D, Larsby B, Andersson H, Ödkvist LM, Liedgren SR, Tham R.** Impairment of visuo-vestibular interaction in humans exposed to toluene. *ORL Journal Otorhinolaryngology Relat. Spec.*, 1983;45:262-269.

**Iki M, Ishizaki H, Aalto H, Starck J, Pykko I.** Smoking habits and postural stability. *Am. J. Otolaryngol.*, 1994;15:124-128.

**INRS,** 1-methoxy-2-propanol et acetate de 1-methoxy-2-propyle, fiche toxicologique 221, 1992.

**Isableu B, Olhmann T, Crémieux J, Amblard B.** Selection of spatial frame of reference and postural control variability. *Exp. Brain Res.*, 1997;114:584-589.

**Jacobson BH, Chen HC, Cashel C, Guerrero L.** The effect of Tai Chi Chuan training on balance, kinaesthetic sense, and strength. *Percept. Mot. Skills*, 1997;84:27-33.

**Jamet M, Deviterne D, Gauchard GC, Vançon G, Perrin Ph.** Higher visual dependency increases balance control perturbation during cognitive task fulfilment in elderly people. *Neurosci. Lett.*, 2004;359:61-64.

**Johnsson LG, Hawkins JE.** Sensory and neural degeneration with aging, as seen in microdissections of the inner ear. *Annals of Otology, Rhynology and Laryngology*, 1972;81:179-193.

**Johnston RB, Howard ME, Cawley PW, Losse GM.** Effect of lower extremity muscular fatigue on motor control performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1998;30:1703-1707.

**Juntunen J, Hupli V, Hernberg S, Luisto M.** Neurological picture of organic poisoning in industry: a retrospective clinical study of 37 patients. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1980;46:219-231.

**Kalhe W, Leonhardt H, Platzer W.** Anatomie : appareil locomoteur. Flammarion Médecine-Sciences (Eds.) Paris, 1995, pp. 434.

**Kelafant GA, Berg RA, Schleenbaker R.** Toxic encephalopathy due to 1,1,1-trichloroethane exposure. *American Journal of Industrial Medicine*, 1994;25:439-446.

**Kemmlert K, Lundholm L.** Slips, trips and falls in different work groups with reference to age. *Safety Science*, 1998;28:59-75.

**Kerr B, Condon M, MC Donald LA.** Cognitive spatial processing and the regulation of posture. *J. Exp. Psych.*, 1985;11:617-622.

**Keshner EA, Allum JHJ, Pfaltz CR.** Postural coactivation and adaptation in the sway stabilizing responses of normals and patients with bilateral vestibular deficit. *Exp. Brain Res.*, 1987;69:77-92.

**Kilburn KH.** Neurobehavioral and respiratory findings in jet engine repair workers: A comparison of exposed and unexposed volunteers. *Environ. Res.*, 1999;80:244-252.

**Kilburn KH.** In neurotoxicity associated with environmental trichloroethylene (TCE)?. *Archives of Environmental Health*, 2002;57:113-120.

**Kioumourtzoglou E, Derri VE, Mertzaniidou O, Tzetzis G.** Experience with perceptual and motor skills in rhythmic gymnastics. *Percept. Mot. Skills*, 1997;84:1363-1372.

**Kioumourtzoglou E, Kourtessis T, Michalopoulou M, Derri VE.** Differences in several perceptual abilities between experts and novices in basketball, volleyball and water polo. *Percept. Mot. Skills*, 1998;86:899-912.

**Kingma J.** Causes of occupational injuries. *Percept. Mot. Skills*, 1994;79:1025-1026.

**Kishi R, Harabuchi I, Katakura Y, Ikeda T, Miyake H.** Neurobehavioral effects of chronic occupational exposure to organic solvents among Japanese industrial painters. *Environ. Res.*, 1993;62:303-313.

**Kleiber M, Horstmann GA, Dietz V.** Body sway stabilization in human posture. *Acta Otolaryngol. (Stockholm)*, 1995;110:168-174.

**Konttinen N, Lyytinen H, Viitasalo J.** Rifle-balancing in precision shooting: behavioral aspects and psychological implication. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 1998;8:78-83.

**Kowalska S, Sulkowski W, Sinczuk-Walczak H.** Assessment of the hearing system in workers chronically exposed to carbon disulfide and noise. *Medycyna Pracy*, 2000;51:123-138.

**Kristinsdottir EK, Jarnlo GB, Magnusson M.** Asymmetric vestibular function in the elderly might be a significant contributor to hip fractures. *Scand. J. Rehabil. Med.*, 2000;32:56-60.

**Kubo T, Sakata Y, Matsunaga T, Koshimune A, Sakai S, Ameno K, Ijiri I.** Analysis of body sway pattern after alcohol ingestion in human subjects. *Acta Otolaryngol. Suppl.*, 1989;468:247-52.

**Kuo AD, Speers RA, Peterka RJ, Horak FB.** Effect of altered sensory conditions on multivariate descriptors of human postural sway. *Exp. Brain Res.*, 1988;122:185-195.

**Kuo W, Bhattacharya A, Succop P, Linz D.** Postural stability assessment in sewer workers. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 1996;38:27-34.

**Kuriwaka R, Mitsui T, Fujiwara S, Nishida Y, Matsumoto T.** Loss of postural reflexes in long-term occupational solvent exposure. *Eur. Neurol.*, 2002;47:85-87.

**Kyvik KR, Moen B.** Nervous system impairment caused by solvents. *Tidsskr. Nor. Laegeforen.*, 1990;110:1342-1345.

**Lacour M, Barthelemy J, Borel L, Magnan J, Xerri C, Chays A, Ouaknine M.** Sensory strategies in human postural control before and after unilateral vestibular neurotomy. *Exp. Brain Res.*, 1997;115:300-310.

**Laflamme L.** Age-related accident ratios in assembly work: a study of female assembly workers in the automobile industry. *Safety Science*, 1996;23:27-37.

**Laflamme L, Menckel L.** Ageing and occupational accidents. A review of the literature of the last three decades. *Safety Science*, 1995;21:145-161.

**Laine A, Savolainen K, Furumoto H.** Magnetic resonance imaging in chronic toluene abuse and volitional hyperkinesias. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1993;65:179-188.

**Laire G, Viaene MK, Veulemans H, Masschelein R, Nemery B.** Nocturnal oxygen desaturation, as assessed by home oximetry, in long-term solvent-exposed workers. *American Journal of Industrial Medicine*, 1997;32:656-664.

**Lajoie Y, Teasdale N, Bard C, Fleury M.** Attentional demands for static and dynamic equilibrium. *Exp. Brain Res.*, 1993;97:139-144.

**Lajoie Y, Gallagher SP.** Predicting falls within the elderly community : comparison of postural sway, reaction time, the Berg balance scale and the Activities-specific Balance confidence (ABC) scale for comparing fallers and non-fallers. *Arch. Gerontol. Geriatr.*, 2004;38:11-26.

**Lan C, Lai JS, Chen SY.** Tai Chi Chuan: an ancient wisdom on exercise and health promotion. *Sports Med.*, 2002;32:217-224.

**Larsby B, Tham R, Eriksson B, Hyden D, Ödkvist LM, Liedgren C, Bunnfors I.** Effects of trichloroethylene on the human vestibulo-ocular system. *Acta Otolaryngol. (Stockholm)*, 1986;101:193-199.

**Larsson TJ, Bjornstig U.** Persistent medical problems and permanent impairment five years after occupational injury. *Scand. J. Soc. Med.*, 1995;23:121-128.

**Laurent M.** Visual cues and processes involved in goal-directed locomotion. In : AE Patla (Eds.). *Adaptability of Human Gait* (Amsterdam: Elsevier), 1991, pp. 99-123.

**Lawlor DA, Patel R, Ebrahim S.** Association between falls in elderly women and chronic diseases and drug use: cross sectional study. *BMJ*, 2003;27:712-717.

**Leamon TB, Murphy PL.** Occupational slips and falls: more than a trivial problem. *Ergonomics*, 1995;38:487-498.

**Leclercq S.** La prévention des chutes de plain-pied. Bilan. Perspectives. in *Les notes scientifiques et techniques de l'INRS*, (Paris : INRS), July 1997.

**Leclercq S.** Prevention of the same level falls : a more global appreciation of this type of accident. *Journal of Safety Research*, 1999a;30:103-112.

**Leclercq S.** The prevention of slipping accidents : a review and discussion of work related to the methodology of measuring slip resistance. *Safety Science*, 1999b;31:95-125.

**Leclercq S, Tisserand M, Saulnier H.** Tribological concepts involved in slipping accidents analysis. *Ergonomics*, 1995a;38:197-208.

**Leclercq S, Tisserand M, Saulnier H.** Assessment of slipping resistance of footwear and floor surfaces. Influence of manufacture and utilization of the products. *Ergonomics*, 1995b;38:209-219.

**Ledin T, Ödkvist LM, Möller C.** Posturography findings in workers exposed to industrial solvents. *Acta Otolaryngol. (Stockh)*, 1989;107:357-361.

**Ledin T, Kronhed AC, Moller C, Odkvist LM, Olsson B.** Effects of balance training in elderly evaluated by clinical tests and dynamic posturography. *J. Vestib. Res.*, 1990;91:129-138.

**Ledin T, Odkvist LM.** Effect of alcohol measured by dynamic posturography. *Acta Otolaryngol. Suppl.*, 1991;481:576-581.

**Ledin T, Ödkvist LM.** Abstinent chronic alcoholics investigated by dynamic posturography, ocular smooth pursuit and visual suppression. *Acta Otolaryngol. (Stockholm)*, 1991;111:646-655.

**Ledin T, Jansson E, Moller C, Ödkvist LM.** Chronic toxic encephalopathy investigated using dynamic posturography. *American Journal of Otolaryngology*, 1991;12:96-100.

**Ledin T, Fransson PA, Magnusson M.** Effects of postural disturbances with fatigued triceps surae muscles or with 20% additional body weight. *Gait Posture*, 2004;19:184-93

**Lee DN, Lishman JR.** Visual proprioceptive control of stance. *J. Hum. Mov. Stud.*, 1975;1:87-95.

**Lee B, Lee SH, Lee KM.** Dose dependent increase in subjective symptom prevalence among toluene-exposed workers. *Ind. Health.*, 1988;26:11-23.

**Legent F, Perlemuter L, Vandenbrouk C.** Oreille, cahier d'anatomie ORL – Tome 1. Masson, Paris, 1979, pp. 71-92.

**Lephart SM, Giraldo JL, Borsa PA, Fu FH.** Knee joint proprioception: a comparison between female intercollegiate gymnasts and controls. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.*, 1996;4:121-124.

**Lestienne F, Berthoz A, Mascot JC, Koitcheva V.** Effets posturaux induits par une scène visuelle en mouvement linéaire. *Agressologie*, 1976;17:37-46.

**Lindmark B, Lagerstrom C, Naessen T, Larsen HC, Persson I.** Performance in functional balance tests during menopausal hormone replacement : a double-blind placebo-controlled study. *Physiother. Res. Int.*, 1999;4:43-54.

**Lipscomb HJ, Dement JM, Rodriguez-Acosta R.** Deaths from external causes of injury among construction workers in North Carolina, 1988-1994. *Appl. Occup. Environ. Hyg.* 2000;15:569-80.

**Lipscomb HJ, Dement JM, Behlman R.** Direct costs and patterns of injuries among residential carpenters, 1995-2000. *J. Occup. Environ. Med.*, 2003;45:875-80.

**Lord SR, Clark RD, Webster IW.** Physiological factors associated with falls in an elderly population *J. Am. Geriatr. Soc.*, 1991;39:1194-200.

**Lord SR, Clark RD, Webster IW.** Postural stability and associated physiological factors in a population of aged persons. *J. Gerontol.*, 1991;46:M69-M76.

**Lord SR, Ward JA, Williams P, Anstey KJ.** An epidemiological study of falls in older community-dwelling women: the Randwick falls and fractures study. *Australian Journal of Public Health*, 1993;17:240-245.

**Lord SR, Ward JA, Williams P, Anstey K.** Physiological factors associated with falls in older community-dwelling women. *J. Am. Geriatr. Soc.*, 1994;42:1110-1117.

**Lord SR, Castell S.** Effect of exercise on balance, strength and reaction time in older people. *Austr. Physiother.*, 1994;40:83-88.

**Lord SR, Sambrook PN, Gilbert C, et al.** Postural stability, falls and fractures in the elderly: results from the Dubbo Osteoporosis Epidemiology Study. *Med. J. Aust.*, 1994;160:684-685, 688-691.

**Lord SR, Dayhew J.** Visual risk factors for falls in older people *J. Am. Geriatr. Soc.*, 2001;49:676-677.

**Lord SR, Menz HB, Tiedemann A.** A physiological profile approach to falls risk assessment and prevention. *Physical Therapy*, 2003;83:237-251.

**Lucchini R, Apostoli P, Perrone C, Placidi D, Albin E, Migliorati P, Mergler D, Sassine MP, Palmi S, Alessio L.** Long-term exposure to "low levels" of manganese oxides and neurofunctional changes in ferroalloy workers. *Neurotoxicology*, 1999;20:287-97.

**Lynn SG, Sinaki M, Westerlind KC.** Balance characteristics of person with osteoporosis. *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 1997;78(3):273-277.

**Magnusson M, Enbom H, Johansson R, Pyykkö I.** The importance of somatosensory information from the feet in postural control in man. In : T Brandt, W Paulus, M Dieterich, S Krafezik, A Sraube (Eds). *Disorders of posture and gait*, Stuttgart, Georg Thieme Verlag, 1990, pp. 190-193.

**Magnusson M, Enbom H, Johansson R, Wiklund J.** Significance of pressor input from the human feet in lateral postural control. The effect of hypothermia on galvanically induced body-sway. *Acta Otolaryngol. (Stockh)*, 1990;110:321-327.

**Maki BE, Holliday PJ, Topper AK.** Fear of falling and postural performance in the elderly. *Journal of Gerontology*, 1991;46:M123-M131.

**Maki BE, Holliday PJ, Topper AK.** A prospective study of postural balance and risk of falling in an ambulatory and independent elderly population. *J. Gerontol.*, 1994;49:M72-M84.

**Maki BE, McIlroy WE.** Influence of arousal and attention on the control of postural sway. *J. Vestib. Res.*, 1996;6:53-59.

**Maki BE, McIlroy WE.** The role of limb movements in maintaining upright stance; the "change-in-support" strategy. *Physical Therapy*, 1997;77:488-507.

**Manning DP.** Deaths and injuries caused by slipping, tripping and falling. *Ergonomics*, 1983;26:3-9.

**Margeat H.** Les risques de la vie quotidienne. *Revue Française de Dommage Corporel*, 1982;8:23-35.

**Marletta W.** Trip, slip and fall prevention, In : DJ Hansen (Eds.), *The Work Environment, vol 1: Occupational Health Fundamentals* (Chealsea, MN: Lewis), 1991.

**Massion J, Viallet F.** Posture, coordination, mouvement. *Rev. Neurol.*, 1990;146:536-542.

**Massion J.** Movement, Posture and equilibrium : interaction and coordination. *Progress. In Neurobiol.*, 1992;38:35-56.

**Matikainen E, Forsman-Gronholm L, Pfaffli P, Juntunen J.** Nervous sytem effects of occupational exposure to styrene: a clinical and neurophysiological study. *Environ. Res.*, 1993;61:84-92.

**Mauritz KH, Dichgans J, Hufschmidt A.** Quantitative analysis of stance in late cortical cerebellar atrophy of the anterior lobe and other forms of cerebellar ataxia. *Brain.* 1979;102:461-482.

**McCurdy SA, Farrar JA, Beaumont JJ, Samuels SJ, Green RS, Scott LC, Schenker MB.** Nonfatal occupational injury among California farm operators. *J. Agric. Saf. Health.* 2004;10:103-19.

**McIlroy WE, Maki BE.** Adaptative changes to compensatory stepping responses. *Gait Posture*, 1995;3:43-50.

**Menz RB, Lord SR.** The contribution of foot problems to mobility impairment and falls in community-dwelling older people. *J. Am. Geriatr. Soc.*, 2001;49:1651-1656.

**Mergner T, Huber W, Becker W.** Vestibular-neck interaction and transformation of sensory coordinates. *J. Vestib. Res.*, 1997;7:347-367.

**Mesure S, Crémieux J.** Contrôle de l'équilibre postural et effet de l'entraînement sportif. *Cinesiologie*, 1992;31:228-234.

**Mesure S, Bonnet M, Crémieux J.** L'entraînement sportif peut-il influencer le contrôle postural statique ? *Sci. Mot.*, 1994;21:39-47.

**Mesure S, Crémieux J, Amblard B.** Les effets de l'entraînement sur les stratégies d'ancrage de la tête. In : PM Gagey, B Weber (Eds) : *Posturologie, Régulation et dérèglements de la station debout*. Masson, Paris, 1995a, pp. 33-47.

**Mesure S, Crémieux J, Amblard B.** Effect of training on head-hip co-ordinated movements during unperturbed stance. *Neuroreport*, 1997;8:3507-3512.

**Mikkelsen S.** A cohort study of disability pension and death among painters with special regard to disabling presenile dementia as an occupational disease. *Scandinavian Journal of Social Medicine*, 1980;16:44-49.

**Mikkelsen S.** Epidemiological update on solvent neurotoxicity. *Environ. Res.*, 1997;73:101-112.

**Miller CA.** The connection between drugs and falls in elders. *Geriatr. Nurs.*, 2002;23:109-110.

**Mills KC, Bisgrove EZ.** Body sway divided attention performance under the influence of alcohol: dose-response differences between males and females. *Alcohol Clin. Exp. Res.*, 1983;7:393-397.

**Mirka A, Black FO.** Clinical applications of dynamic posturography for evaluating sensory integration of vestibular dysfunction. *Neurologic Clinics*, 1990;8:351-359.

**Mitran E, Callender T, Orha B, Dragnea P, Botezatu G.** Neurotoxicity associated with occupational exposure to acetone, methyl ethyl ketone and cyclohexanone. *Environ. Res.*, 1997;73:181-188.

**Moller C, Ödkvist LM, Larsby B, Tham R, Ledin T, Bergholtz L.** Otoneurological findings in workers exposed to styrene. *Scandinavian Journal of Work Environment and Health*, 1990;16:189-194.

**Monstad P, Mellgren SI, Sulg IA.** The clinical significance of sleep apnoea in workers exposed to organic solvents: implications for the diagnosis of organic solvent encephalopathy. *Journal of Neurology*, 1992;239:195-198.

**Morata TC, Nylen P, Johnson AC, Dunn DE.** Auditory and vestibular functions after single or combined exposure to toluene : a review. *Archives of Toxicology*, 1995;69:431-443.

**Morrow LA, Ryan CM, Hodgson MJ, Robin N.** Alterations in cognitive and psychological functioning after organic solvent exposure. *Journal of Occupational Medicine*, 1990;32:444-450.

**Morrow LA, Steinhauer SR, Condray R, Hadgson M.** Neuropsychological performance of journeymen painters under acute solvent exposure and exposure-free conditions. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 1997;3:269-275.

**Murata K, Araki S, Yokoyama K.** Assessment of the peripheral, central, and autonomic nervous system function in styrene workers. *Am. J. Ind. Med.*, 1991a;20:775-784.

**Murata K, Araki S, Yokoyama K, Maeda K.** Autonomic and peripheral system dysfunction in workers exposed to mixed organic solvents. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1991b;63:335-340.

**Myers JE, Thompson ML, Ramushu S, Young T, Jeebhay MF, London L, Esswein E, Renton K, Spies A, Boule A, Naik I, Iregren A, Rees DJ.** The nervous system effects of occupational exposure on workers in a South African manganese smelter. *Neurotoxicology*, 2003;24:885-894.

**Myung R, Smith JL, Leamon TB.** Subjective assessment of floor slipperiness. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1993;11:313-319.

**Nakagawa H, Ohashi N, Watanabe Y, Mizukoshi K.** The contribution of proprioception to posture control in normal subjects. *Acta Otolaryngol. (Stockh)*, 1993;504 (suppl.):112-116.

- Nardone A, Tarantola J, Giordano A, Schieppati M.** Fatigue effects on body balance. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1997;105:309-320.
- Nardone A, Tarantola J, Galante M, Schieppati M.** Time course of stabilometric changes after a strenuous treadmill exercise. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 1998;79:920-924.
- Nashner LM.** Adapting reflexes controlling the human posture. *Exp. Brain Res.*, 1976;26:59-72.
- Nashner LM.** Strategies for organization of human posture. In : M Igarashi, FO Black (Eds) : Vestibular and visual control on posture and locomotor equilibrium. Karger, Basel, 1985, pp. 1-8.
- Nashner LM.** Dynamic posturography in the diagnosis and management of dizziness and balance disorders. *Neurol. Clin.*, 1990;8:331-349.
- Nashner LM, Berthoz A.** Visual contribution to rapid motor responses during postural control. *Brain Research*, 1978;150:403-407.
- Nashner LM, Black FO, Wall C.** Adaptation to altered support surface and visual conditions during stance: patients with vestibular deficits. *Journal of Neurosciences*, 1982;2:536-544.
- Nashner LM, McCollum G.** The organization of human postural movements: a formal basis and experimental synthesis. *Behav. Brain Sci.*, 1985;8:135-172.
- Nashner LM, Shupert CL, Horak FB, Black FO.** Organization of posture controls: an analysis of sensory and mechanical constraints. *Prog. Brain Res.*, 1989;205:327-330.
- Nashner LM, Peters JF.** Dynamic posturography in the diagnosis and management of dizziness and balance disorders. *Neurological Clinics*, 1990;8:331-349.
- Neutel CI, Perry S, Maxwell C.** Medication use and risk of falls. *Pharmacoepidemiol. Drug Saf.*, 2002;11:97-104.
- Nevitt MC, Cummings SR, Kidd S, Black D.** Risk factors for recurrent nonsyncopal falls. A prospective study. *JAMA*, 1989;261:2663-2668.
- Nicol C, Kuitunen S, Kyrolainen H, Avela J, Komi PV.** Effects of long- and short-term fatiguing stretch-shortening cycle exercises on reflex EMG and force of the tendon-muscle complex. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 2003;90:470-479.
- Nieschalk M, Ortmann C, West A, Schmal F, Stoll W, Fechner G.** Effects of alcohol on body-sway patterns in human subjects. *Int. J. Legal. Med.*, 1999;112:253-260.
- Niklasson M, Tham R, Larsby B, Eriksson B.** Effects of toluene, styrene, trichloroethylene, and trichloroethane on the vestibulo and opto-oculo motor system in rats. *Neurotoxicology and Teratology*, 1993;15:327-334.

**Niklasson M, Moller C, Ödkvist LM, Ekberg K, Flodin U, Dige N, Skoldestig A.** Are deficits in the equilibrium system relevant to the clinical investigation of solvent-induced neurotoxicity? *Scand. J. Work Environ. Health*, 1997;23:206-213.

**Nishide VM, Benatti MC, Alexandre NM.** The occurrence of work accidents at an intensive care unit. *Rev. Lat. Am. Enfermagem.*, 2004;12:204-11.

**Nordling Nilson L, Sällsten G, Hagberg S, Bäckman L, Barregard L.** Influence of solvent exposure and aging on cognitive functioning: an 18 year follow up of formerly exposed floor layers and their controls. *Occup. Environ. Med.*, 2002;59:49-57.

**Norre ME.** Posture in otoneurology. *Acta Otorhinolaryngol. Belg.*, 1990;44:55-64.

**Nussbaum MA.** Postural stability is compromised by fatiguing overhead work. *AIHA J.* 2003;64:56-61.

**Ödkvist LM, Larsby B, Tham R, Aschan G.** On the mechanism of vestibular disturbances caused by industrial solvents. *Adv. Otolaryngol.*, 1979;25:167-172.

**Ödkvist LM, Larsby B, Fredrickson MF, Liedgren SR, Tham R.** Vestibular and oculomotor disturbances caused by industrial solvents. *Journal of Otolaryngology*, 1980;9:53-59.

**Ödkvist LM, Larsby B, Tham R, Ahlfedt H, Andersson B, Eriksson B, Liedgren SR.** Vestibulo-oculomotor disturbances in humans exposed to styrene. *Acta Otolaryngol. (Stockholm)*, 1982;94:487-493.

**Ödkvist LM, Larsby B, Tham R, Hyden D.** Vestibulo-oculomotor disturbances caused by industrial solvents. *Otolaryngology Head and Neck Surgery*, 1983;91:537-539.

**Ödkvist LM, Arlinger SD, Edling C, Larsby B, Bergholtz LM.** Audiological and vestibulo-oculomotor findings in workers exposed to solvents and jet fuel. *Scandinavian Audiology*, 1987;16:75-81.

**Ödkvist LM, Moller C, Thuomas KA.** Otoneurologic disturbances caused by solvent pollution. *Otolaryngology Head and Neck Surgery*, 1992;106:687-692.

**Okubo J, Watanabe I, Baron JB.** Study of influences of the plantar mechanoreceptor on body sways. *Agressologie*, 1980;21:61-69.

**Okuzumi H, Tanaka A, Nakamura T.** Age-related changes in the magnitude of postural sway in healthy women. *J. Hum. Mov. Stud.*, 1996;31:249-261.

**O'Loughlin JL, Robitaille Y, Boivin JF, Suissa S.** Incidence of and risk factors for falls and injurious falls among the community-dwelling elderly. *Am. J. Epidemiol.*, 1993;137:342-54.

**Olsen J, Sabroe S.** A case-reference study of neuropsychiatric disorders among workers exposed to solvents in Danish wood and furniture industry. *Scandinavian Journal of Social Medicine Supplementum*, 1980;16:44-49.

**O'Sullivan J, Wakai A, O'Sullivan R, Luke C, Cusack S.** Ladder fall injuries: patterns and cost of morbidity. *Injury*, 2004;35:429-431.

**Over R.** Possible visual factors in falls by old people. *Gerontologist*, 1996;6:212-214.

**Overstall PW, Exton-Smith AN, Imms FJ, Johnson AL.** Falls in the elderly related to postural imbalance. *British Medicine Journal*, 1977;1:261-264.

**Overstall PW, Johnson AL.** Instability and falls in the elderly. *Age and Ageing*, 1978;7:92-96.

**Patla AE.** Age-related changes in visually guided locomotion over different terrains: major issues. In : GEH Stelmach, *Sensorimotor Impairment in the Elderly* (Dordrecht: Kluwer), 1993, pp. 231-252.

**Patla AE.** Slips, trips and falls: implications for rehabilitation and ergonomics. In : S Kumar (Eds.) : *Perspectives in Rehabilitation Ergonomics* (London: Taylor & Francis), 1997, pp. 196-209.

**Paulus WM, Straube A, Brandt Th.** Visual stabilization of posture: physiological stimulus characteristics and clinical aspects. *Brain*, 1984;107:1143-1163.

**Pélissier J, Brun V, Enjalbert M.** Posture, équilibration : quelques repères pour le rééducateur. In : J Pélissier, V Brun, M Enjalbert (Eds.) : *Posture, équilibration et médecine de rééducation*. Masson, Paris, 1993, 26, pp. 1-9.

**Pereira CB, Strupp M, Holzleitner T, Brandt T.** Smoking and balance: correlation of nicotine-induced nystagmus and postural body sway. *Neuroreport*, 2001;12:1223-1226.

**Perrin C, Conraux C, Collard C, Freyss G, Sauvage JP.** L'équilibre en pesanteur et en impesanteur. Arnette, Paris, 1987, pp. 413.

**Perrin Ph, Jeandel C, Perrin C, Courant Ph.** Contribution de la posturographie statique et dynamique à l'étude du vieillissement physiologique de l'équilibration. *Rev. Otoneuroophthalmol.*, 1993;19-20:95-99.

**Perrin Ph, Lestienne F.** Mécanismes de l'équilibration humaine. Exploration fonctionnelle, application au sport et à la rééducation (Paris : Masson), 1994.

**Perrin Ph, Jeandel C, Perrin CA, Bene MC.** Influence of visual control, conduction et central intergration on static and dynamic balance in healthy older adults. *Gerontology*, 1997a;43:223-231.

**Perrin Ph, Béné MC, Perrin C, Durupt D.** Ankle trauma significantly impairs postural control : a study in basketball players and in controls. *Int. J. Sports Med.*, 1997b;18:387-392.

**Perrin Ph, Schneider D, Deviterne D, Perrot C, Constantinescu L.** Training improves the adaptation to changing visual conditions in maintaining posture control in a test of sinusoidal oscillation of the support. *Neurosci. Lett.*, 1998;245:155-158.

**Perrin Ph, Perrot C, Deviterne D, Denis G, Schneider D.** Intérêt de la crâniocorpographie dans l'évaluation des afférences somatosensorielles. *Revue STAPS*, 1998;46-47:53-64.

**Perrin Ph, Gauchard GC, Perrot C, Jeandel C.** Effects of physical and sporting activities on balance control of elderly people. *Br. J. Sports Med.*, 1999;33:121-126.

**Perrin Ph, Deviterne D, Hugel F, Perrot C.** Judo, better than dance, develops sensorimotor adaptabilities involved in balance control. *Gait Posture*, 2002;15:187-94.

**Perrot C, Deviterne D, Perrin Ph.** Influence of training on postural and motor control in a combative sport. *J. Hum. Mov. Studies*, 1998;35:119-136.

**Peterka RJ, Black FO.** Age-related changes in human posture control: sensory organization tests. *J. Vestib. Res.*, 1990;1:73-85.

**Peterka RJ, Benolken MS.** Role of somatosensory and vestibular cues in attenuating visually induced human postural sway. *Exp. Brain Res.*, 1995;105:101-110.

**Pluijm SM, Smit JH, Tromp AM, Stel VS, Deeg DJH, Bouter LM, Lips P.** Identifying community-dwelling elderly at high risk for recurrent falling: results of a three year prospective study. Thesis. VU Amsterdam; 2001.

**Pollastrini L, Abramo A, Cristalli G, Baretti F, Greco A.** Early signs of occupational ototoxicity caused by inhalation of benzene derivative industrial solvents. *Acta Otolaryngology Italian*, 1994;14:503-512.

**Pospiech L, Przerwa-Tetmajer E, Gawron W.** The evaluation of the organ in workers occupationally exposed to organic solvents and tinctorial dusts. *Med. Pr.*, 1998;49:363-369.

**Proctor L, Perlman H, Lindsay J, Matz G.** Acute vestibular paralysis in herpes zoster oticus. *Annals of Otolaryngology, Rhinology and Laryngology*, 1979;88:303-310.

**Pyykkö I, Aalto H, Hytonen M, Starck J, Jäntti P, Ramsay H.** Effect of age on postural control. In : Amblard, B., Berthoz, A., Clarac, F. (Eds.), Posture and gait: development, adaptation and modulation. Proceedings of the 9th International Symposium on Postural and Gait Research, Marseille, France, International Congress Series 812. Amsterdam, New York, Oxford: Excerpta Medica, 1988, pp. 95-104.

**Pyykkö I, Jantti P, Aalto H.** Postural control in elderly subjects. *Age and Ageing*, 1990;19:215-221.

**Rankin JK, Woollacott MH, Shumway-Cook A, Brown LA.** Cognitive influence on postural stability: a neuromuscular analysis in young and older adults. *Journal of Gerontology*, 2000;55A:M112-M119.

**Ratzon N, Fromm P, Leikin E, Kristal-Boneh E, Ribak J.** Effect of exposure to lead on postural control in workers. *Occup. Environ. Med.*, 2000;57:201-203.

**Ray WA, Thapa PB, Gideon P.** Benzodiazepines and the risk of falls in nursing home residents. *J. Am. Geriatr. Soc.*, 2000;48:682-685.

**Reberts CS, Hall TA.** The neuroepidemiology of styrene: a critical review of representative literature. *Critical Reviews in Toxicology*, 1994;24:S57-S106.

**Redfern MS, Bloswick D.** Slips, trips and falls. In : Nordin, M., Andersson, G., Pope, M. (Eds.), *Musculoskeletal Disorders in the Workplace* (Location: Masby-Year Inc.), 1997, pp. 152-166.

**Redfern MS, Cham R, Gielo-Perczak K, Grönqvist R, Hirvonen M, Lanshammar H, Marpett M, Yi-Chung Pai C, Powers C.** Biomechanics of slips. *Ergonomics*, 2001;44:1138-1166.

**Richter E.** Quantitative study of human Scarpa's ganglion and vestibular sensory epithelia. *Acta Otolaryngologica*, 1980;90:199-208.

**Ridgway P, Nixon TE, Leach JP.** Occupational exposure to organic solvents and long-term nervous system damage detectable by brain imaging, neurophysiology or histopathology. *Food Chem. Toxicol.*, 2003;41:153-187.

**Rigal R.** Motricité humaine : fondements et applications pédagogiques – Tome I. Vigot, Québec, 1985, pp. 231-254.

**Robertson S, Collins J, Elliot D, Starkes J.** The influence of skill and intermittent vision on dynamic balance. *J. Mot. Behav.*, 1994;26:333-339.

**Robinson C, Stern F, Halperin W, Venable H, Petersen M, Frazier T, Burnett C, Lulich N, Salg J, Sestito J, et al.** Assessment of mortality in the construction industry in the United States, 1984-1986. *Am. J. Ind. Med.*, 1995;28:49-70.

**Roll JP, Roll R.** La proprioception extra-oculaire comme élément de référence postural et de lecture spatiale des données rétinienne. *Agressologie*, 1987;28:905-912.

**Root N.** Injuries at work are fewer among older employees. *Bureau of Labor Statistics, Monthly Labor Review*, (Washington, CD: OSHA), March, 1981.

**Roques CF, Lafont C, Marque P, Chatain M, Le Vour'ch P.** Pseudo-vertiges vestibulaires et pathologie de la colonne cervicale. In : Ph Dupont (Eds.) : *Les troubles de l'équilibre*. Frison-Roche, Paris, 1992, pp. 73-80.

**Rosenberg NL, Kleinschmidt-Demasters BK, Davis KA, Dreibach JN, Hormes JT, Filley CM.** Toluene abuse causes diffuse central nervous system white matter changes. *Annals of Neurology*, 1988;23:611-614.

**Rosenhall U, Rubin W.** Degenerative patterns in the aging human vestibular neuroepithelia. *Acta Otolaryngologica*, 1975;79:67-81.

**Rouanne JR, Vellas B, Clanet M.** Les effets du vieillissement sur la marche et l'équilibre. *Rev. Otoneuroophthalmol.*, 1993;19-20:68-72.

**Rozenfeld S, Camacho LA, Veras P.** Medication as a risk factor for falls in older women in Brazil. *Rev. Panam. Salud. Publica.*, 2003;13:369-375.

**Ruijten MWMM, Hooisma J, Brons JT, Habets CEP, Emmen HH, Muijser H.** Neurobehavioral effects of long-term exposure to xylène and mixed organic solvents in shipyard painters. *Neurotoxicology*, 1994;15:613-620.

**Rydwik E, Frandin K, Akner G.** Effects of physical training on physical performance in institutionalised elderly patients (70+) with multiple diagnoses. *Age Ageing*, 2004;33:13-23.

**Sasa M, Igarashi S, Miyazaki T, Miyazaki K, Nakano S, Matsuoka I.** Equilibrium disorders with diffuse brain atrophy in long-term toluene sniffing. *Archives of Otorhinolaryngology*, 1978;221:163-169.

**Savolainen K, Riihimaki V, Vaheri E, Linnoila M.** Effects of xylene and alcohol on vestibular and visual functions in man. *Scandinavian Journal of Work Environment and Health*, 1980;6:94-103.

**Savolainen K, Riihimaki V.** Xylene and alcohol involvement of the human equilibrium system. *Acta Pharmacology and Toxicology*, 1981;49:447-451.

**Savov A, Boeva L.** Occupational damage to the hearing-vestibular sensory system in exposure to organic solvents. *Probl. Khig.*, 1991;16:142-148.

**Scholtz E, Diener HC, Dichgans J, Langhor HD, Schied W, Schupmann A.** Incidence of peripheral neuropathy and cerebellar ataxia in chronic alcoholics. *J. Neurol.* 1986;233:212-217.

**Schuknecht HF, Kitamura H.** Vestibular neuritis. *Annals of Otolaryngology*, 1980;90(suppl 78):1-19.

**Schwab M, Roder F, Aleker T, Ammon S, Thon KP, Eichelbaum M, Klotz U.** Psychotropic drug use, falls and hip fracture in the elderly. *Aging (Milano)*, 2000;12:234-239.

**Seliga R, Bhattacharya A, Succop P, Wickstrom R, Smith D, Willeke.** Effect of work load and respirator wear on postural stability, heart rate, and perceived exertion. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1991;52:417-422.

**Shepard NT, Talian SA, Smith-Weelock M, Raj A.** Vestibular and balance rehabilitation therapy. *Am. Otol. Rhino. Laryngol.*, 1993;102:198-205.

**Sherrington CS.** The integrative action of the nervous system. *Constable*, London, 1906.

**Shumway-Cook A, Horak FB.** Assessing the influence of sensory interaction on balance: Suggestion from the field. *Physical Therapy*, 1986;66:1548-1550.

**Shumway-Cook A, Gruber W, Baldwin M, Liao S.** The effect of multidimensional exercises on balance, mobility and fall risk in community-dwelling older adults. *Physical Therapy*, 1997;77:46-57.

**Shumway-Cook A, Brauer S, Woollacott M.** Predicting the probability for falls in community-dwelling older adults using the Timed Up & Go test. *Physical Therapy*, 2000;80:896-903.

**Sidebotham P.** Balance through the ages of man. *J. Laryngol. Otol.*, 1988;102:203-208.

**Sinaki M, Lynn SG.** Reducing the risk of falls through proprioceptive dynamic posture training in osteoporotic women with kyphotic posturing: a randomized pilot study. *Am. J. Phys. Med. Rehabil.*, 2002;81:241-246.

**Sinczuk-Walczak H, Wesolowski W, Wilczynska U.** Neurologic and neurophysiologic evaluation of workers occupationally exposed to mixed organic solvents. Preliminary study. *Med. Pr.*, 1995;46:451-458.

**Skinner HB, Barrack RL, Cook SD.** Age-related decline in proprioception. *Clinical and Orthopaedic Related Research*, 1984;184:208-211.

**Smith JJ, Porth CJ.** Posture and the circulation: the age effect. *Exp. Gerontol.*, 1991;26:141-162.

**Smith LB, Bhattacharya A, Lemasters G, Succop P, Puhala E, Medvedovic M, Joyce J.** Effect of chronic low-level exposure to jet fuel on postural balance of US Air Force personnel. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 1997;39:623-632.

**Sparto PJ, Parnianpour M, Reinsel TE, Simon S.** The effect of fatigue on multijoint kinematics, coordination, and postural stability during a repetitive lifting test. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 1997;25:3-12.

**Spiriduso WW.** Balance, posture and locomotion. In: WW Spiriduso (Eds.). *Physical Dimensions of Aging. Human Kinetics*, IL, USA, 1995, pp. 155-183.

**Spooner J, Sakala S, Baloh R.** Effect of aging on eye tracking. *Archives of Neurology*, 1980;37:575-576.

**Spurgeon A.** The validity and interpretation of neurobehavioral data obtained in studies to investigate the neurotoxic effects of occupational exposure to mixtures of organic solvents. *HSE Contract Research Report*, 2001;355.

**Stalenhoef PA, Crebolder H, Knottnerus JA, Vanderhorst FGEM.** Incidence, risk factors and consequences of falls among elderly subjects living in the community. A criteria based analysis. *Eur. J. Public Health*, 1997;7:328-34.

**Stalenhoef PA, Diederiks JPM, Knottnerus JA, Kester A, Crebolder HFJM.** Predictors of falls in community-dwelling elderly: a prospective cohort study. Thesis. Maastricht, The Netherlands; 1999.

**Stalenhoef PA, Diederiks JPM, Knottnerus JA, de Witte LP, Crebolder HFJM.** The construction of a patient record-based risk model for recurrent falls among elderly people living in a community. *Family practice*, 2000;17:490-496.

**Stekarova I, Urban P, Prochazka B, Lukas E.** Somatosensory evoked potentials in workers exposed to toluene and styrene. *Br. J. Ind. Med.*, 1993;50:520-527.

- Stel VS, Smit JH, Pluijm SM, Lips P.** Balance and mobility performance as treatable risk factors for recurrent falling in older persons. *J. Clin. Epidemiol.*, 2003;56:659-668.
- Stelmach GE, Worringham CJ.** Sensorimotor deficits related to postural stability. *Clin. Geriatr. Med.*, 1985;3:679-694.
- Stoffregen TA.** Flow structure versus retinal location in the optical control of stance. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and Performance*, 1985;11:554-565.
- Strandberg L.** Ergonomics applied to slipping accidents, *In* : Kvalseth TO (Eds.), *Ergonomics of Workstation Design* (London: Butterworths), 1983, pp. 201-228.
- Strandberg L.** On accident analysis and slip-resistance measurement. *Ergonomics*, 1983;26:11-32.
- Strandberg L, Lanshammar H.** The dynamics of slipping accidents. *Journal of Occupational Accidents*, 1981;3:153-162.
- Sulkowski WJ, Kowalska S, Sobczak Z, Jozwiak Z.** The statokinesiometry in evaluation of the balance system in persons with chronic carbon disulfide intoxication. *Pol. J. Occup. Med. Environ. Health*, 1992;5:265-276.
- Sulkowski WJ, Kowalska S, Matyja W, Guzek W, Wesolowski W, Szymczak W, Kostrzewski P.** Effects of occupational exposure to a mixture of solvents on the inner ear: a field study. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 2002;15:247-256.
- Swaen GMH, van Amelsvoort LGPM, Bültmann U, Kant IJ.** Fatigue as a risk factor for being injured in an occupational accident: results from the Maastricht Cohort Study. *Occupational and Environmental Medicine*, 2003;60:88-92.
- Swensen EE, Purswell JL, Schlegel RE, Stanevich RL.** Coefficient of friction and subjective assessment of slippery work surfaces. *Human Factors*, 1992;34:67-77.
- Szturm T, Ireland DJ, Lessing-Turner M.** Comparison of different exercise programs in the rehabilitation of patients with chronic peripheral vestibular dysfunction. *J. Vestib. Res.*, 1994;4:461-479.
- Tagushi K.** Spectral analysis of the movement of the centre of gravity in vertiginous and ataxic patients. *Agressologie*, 1978;19B:69-70.
- Tang PF, Woollacott MH, Chong RKY.** Control of reactive balance adjustments in perturbed human walking: roles of proximal and distal posture muscle activity. *Exp. Brain Res.*, 1998;119:141-152.
- Tham R, Larsby B, Ödkvist LM, Norlander B, Hyden D, Aschan G, Bertler A.** The influence of trichloroethylene and related drugs on the vestibular system. *Acta Pharmacology and Toxicology*, 1979;44:336-342.

- Tham R, Bunnfors I, Eriksson B, Larsby B, Lindgren S, Ödkvist LM.** Vestibulo-ocular disturbances in rats exposed to organic solvents. *Acta Pharmacology and Toxicology*, 1984;54:58-63.
- Tianwu H, Watanabe Y, Asai M, Shimizu K, Takada S, Mizukoshi K.** Effects of alcohol ingestion on vestibular function in postural control. *Acta Otolaryngol. Suppl.*, 1995;519:127-131.
- Tinetti ME, Williams TF, Mayewski R.** Falls risk index for elderly patients based on number of chronic disabilities. *Am. J. Med.*, 1986;80:429-434.
- Tinetti ME, Speechley M, Ginter SF.** Risk factors for falls among elderly persons living in the community. *N. Eng. J. Med.*, 1988;319:1701-1707.
- Tinetti ME, Speechley M.** Prevention of falls among the elderly. *N. Eng. J. Med.*, 1989;320:1055-1059.
- Torvik A, Lindboe CF, Rodge S.** Brain lesions in alcoholics. A neuropathological study with clinical correlations. *Journal of the Neurological Sciences*, 1982;56:233-248.
- Travis RC.** An experimental analysis of dynamic and static equilibrium. *J. Exp. Physiol.*, 1945;35:216-234.
- Triebig G, Barocka A, Erbguth F, Holl R, Lang C, Lehrl S, Rachlin T, Weidenhammer W, Wettle D.** Neurotoxicity of solvent mixtures in spray painters. Neurologic, psychiatric, psychological and neuroradiologic findings. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1992;64:361-372.
- Triebig G, Hallermann J.** Survey of solvent related chronic encephalopathy as an occupational disease in European countries. *Occupational and Environmental Medicine*, 2000;58:575-581.
- Tromp AM, Pluijm SM, Smit JH, Deeg DJH, Bouter LM, Lips P.** Fall-risk screening test: a prospective study on predictors for falls in community-dwelling elderly. *J. Clin. Epidemiol.*, 2001;54:837-44.
- Van Parys JAP, Njiokiktjien ChJ.** Romberg's sign expressed in a quotient. *Agressologie*, 1976;17:95-100.
- Van Wendel de Joode B, Wesseling C, Kromhout H, Monge P, Garcia M, Mergler D.** Chronic nervous system effects of long-term occupational exposure to DDT. *Lancet*, 2001;357:1014-1016.
- Viallet F, Massion J, Massarino R, Khalil R.** Coordination between posture and movement in a bimanual load lifting task; putative role of a medial frontal region including the supplementary motor area. *Exp. Brain Res.*, 1992;88:674-684.
- Vitte E.** Vertiges : clinique et explorations. In : Ph Dupont (Eds.) : Les troubles de l'équilibre. Frison-Roche, Paris, 1992, pp. 27-43.

- Vitte E, Lazennec JY, Pharaboz C, Freyss G.** EquiTest et pathologie du rachis cervical. *Rev. Med. Orthop.*, 1991;25:3-7.
- Voorhees RL.** The role of dynamic posturography in neurotologic diagnosis. *Laryngoscope*. 1989;99:995-1001.
- Voorhees RL.** Dynamic posturography findings in central nervous system disorders. *Otolaryngol. Head Neck Surg.*, 1990;103:96-101.
- Vouriot A, Gauchard GC, Chau N, Nadif R, Mur JM, Perrin PP.** Chronic exposure to anesthetic gases affects balance control in operating room personnel. *Neurotoxicology*, 2005 (sous presse).
- Vuillerme N, Danion F, Marin L, Boyadjian A, Prieur JM, Weise I, Nougier V.** The effect of expertise in gymnastics on postural control. *Neurosci. Lett.*, 2001a ;303:83-86.
- Vuillerme N, Teasdale N, Nougier V.** The effect of expertise in gymnastics on proprioceptive sensory integration in human subjects. *Neurosci. Lett.*, 2001b;311:73-76.
- Waller JA.** Falls among the elderly: human and environmental factors. *Accidents, Analysis and Prevention*, 1978;10:21-33.
- Wallmann HW.** Comparison of elderly nonfallers and fallers on performance measures of functional reach, sensory organization, and limits of stability. *J. Gerontol.*, 2001;56:M580-M583.
- Webster B, Giunti G, Young A, Pransky G, Nesathurai S.** Work-related tetraplegia: cause of injury and annual medical costs. *Spinal Cord*, 2004;42:240-7.
- Whipple RH, Wolfson LI, Amerman PM.** The relationship of knee and ankle weakness to falls in nursing home residents: an isokinetic study. *J. Am. Geriatr. Soc.*, 1984;35:13-20.
- Wenngren BI, Ödkvist LM.** Vestibulo-oculomotor disturbances caused by occupational hazards. *Acta Otolaryngology (Stockholm)*, 1988;455:7-10.
- White RF, Proctor SP, Echeverria D, Schweikert J, Feldman RG.** Neurobehavioral effects of acute and chronic mixed solvent exposure in the screen printing industry. *American Journal of Industrial Medicine*, 1995;28:221-231.
- White RF, Proctor SP.** Solvents and neurotoxicity. *Lancet*, 1997;349:1239-1243.
- Winner SJ, Morgan CA, Grimley-Evans J.** Perimenopausal risk of falling and incidence of distal forearm fracture. *British Medicine Journal*, 1989;298:1486-1488.
- Wober C, Wober-Bingol C, Karwautz A, Nimmerrichter A, Deecke L, Lesch OM.** Postural control and lifetime alcohol consumption in alcohol-dependent patients. *Acta Neurol. Scand.*, 1999;99:48-53.
- Wolfson LI, Whipple R, Derby CA, Amerman P, Kleinberg A.** Stressing the postural response: a quantitative method for testing balance. *J. Am. Geriatr. Soc.*, 1986;34:845-850.

- Wolfson L, Whipple RH, Derby CA, Amerman P, Tobin JN, Nashner LM.** The effects of age, disease and gender on the balance of healthy elderly. *In* : B Vellas, M Toupet, L Rubenstein, JL Albarède, Y Christen (Eds.) : Falls, balance and gait disorders in the elderly. Elsevier Science, Amsterdam, London, Paris, New York, Tokyo, 1992, pp. 129-135.
- Wolfson L, Whipple R, Derby CA, Amerman P, Murphy T, Tobin JN, Nashner LM.** A dynamic posturography study of balance in healthy elderly. *Neurology*, 1992;42:2069-2075.
- Wolfson L, Whipple RH, Derby CA, Judge J, King M, Amerman P, Schmidt J, Smyers D.** Balance and strength training in older adults: intervention gains and Tai Chi maintenance. *J. Am. Geriatr. Soc.*, 1996;44:498-506.
- Wooley SM, Czaja SJ, Drury CG.** An assessment of falls in the elderly men and women. *Journal of Gerontology*, 1997;52:M80-M87.
- Woollacott MH, Tang PF.** Balance control during walking in the older adults: research and its implication. *Physical Therapy*, 1997;77:646-660.
- Woollacott MH, Shumway-Cook A, Nashner LM.** Aging and posture control: changes in sensory organization and muscular coordination. *Int. J. Aging Hum. Dev.*, 1986;22:329-345.
- Woollacott MH, Tang PF, Lin SI.** Dynamic balance control in older adults: does limited response capacity lead to falls? *In* : GN Gantchev, S Mori, J Massion (Eds.) : Motor Control: Today and Tomorrow (Sofia, Bulgaria: Academic Publishing House "Prof. Drinov M), 1999, pp. 293-305.
- Xiao JQ, Levin SM.** The diagnosis and management of solvent-related disorders. *American Journal of Industrial Medicine*, 2000;37:44-61.
- Yin S, Li G, Hu.** Symptoms and signs of workers exposed to benzene, toluene or the combination. *Ind. Health*, 1987;25:113-130.
- Yip YB, Cumming RG.** The association between medications and falls in Australian nursing-home residents. *Med. J. Aust.*, 1994;160:14-18.
- Yokoyama K, Araki S, Murata K, Nishikitani M, Nakaaki K, Yokota J, Ito A, Sakata E.** Postural sway frequency analysis in workers exposed to n-hexane, xylene and toluene: assessment of subclinical cerebellar dysfunction. *Environ. Res.*, 1997;74:110-115.
- Yokoyama K, Araki S, Nishikitani M, Sato H.** Computerized posturography with sway frequency analysis: application in occupational and environmental health. *Ind. Health*, 2002;40:14-22.
- Zelena J, Soukup T.** The in-series and in-parallel components in rat hindlimb tendon organs. *Neurosciences*, 1983;9:899-910.

# ANNEXES

Annexe 1 : <i>Neuroscience Research</i> 2004;48:239-247	p 122
Annexe 2 : Lettre d'acceptation dans <i>International Archives of Occupational and Environmental Health</i>	p 132
Annexe 3 : <i>Neurotoxicology</i> 2005;48:239-247	p 134
Annexe 4 : <i>Neuroscience Letters</i> 2002;23:96-100	p 136
Annexe 5 : <i>International Journal of Neuroscience</i> 2002;112:1191-206	p 138
Annexe 6 : <i>Communications à des congrès scientifiques</i>	p 140

Annexe 1:

*Neuroscience Research*  
2004;48:239-247

## Sensorial organisation favouring higher visual contribution is a risk factor of falls in an occupational setting

Alexandre Vouriot<sup>a,b</sup>, Gérome C. Gauchard<sup>a,b</sup>, Nearkasen Chau<sup>a</sup>, Lahoucine Benamghar<sup>a</sup>,  
Marie-Line Lepori<sup>c</sup>, Jean-Marie Mur<sup>a,d</sup>, Philippe P. Perrin<sup>a,b,e,\*</sup>

<sup>a</sup> Faculté de Médecine, National Institute for Health and Medical Research (INSERM), U 420, Vandoeuvre-lès-Nancy, France

<sup>b</sup> Equilibration et Performance Motrice, UFR STAPS, Université Henri Poincaré-Nancy 1, 30 rue du Jardin Botanique, 54 600 Villers-lès-Nancy, France

<sup>c</sup> Service de Médecine du Travail, Centre Hospitalier Universitaire de Nancy, Vandoeuvre-lès-Nancy, France

<sup>d</sup> National Institute for Research and Safety (INRS), Vandoeuvre-lès-Nancy, France

<sup>e</sup> Laboratoire d'Exploration Fonctionnelle, Service ORL, Centre Hospitalier Universitaire de Nancy, Vandoeuvre-lès-Nancy, France

Received 15 July 2003; accepted 4 November 2003

### Abstract

The contribution of intrinsic balance control factors to fall mechanisms has received little investigation in studies on occupational accidents. The aim of this study was to assess whether postural regulation in falling workers might have specificities in terms of sensorimotor strategies and neuromuscular responses to balance perturbations. Nine multi-fall-victims (MF), 43 single-fall-victims (SF) and 52 controls (C) were compared on performance measurements of static and dynamic postural control. MF and SF had the worst postural performance both in the static and slow dynamic tests, particularly in eyes closed conditions, suggesting a high dependency on visual cues and a lower use of proprioception. Moreover, the sensorial analysis showed that MF and SF relied less on vestibular input in the development of balance strategy and had more difficulties in maintaining a correct upright stance when proprioceptive input was altered. Finally, MF showed longer latency responses to unexpected external disturbance. Overall, postural control quality increased in the order MF, SF and C. MF and SF adopted particular sensorimotor organisation, placing them at an increased risk of falling in specific sensory environments. Strategies incorporating visual information involve using the cognitive processes causing delayed and less accurate fall avoidance responses, in contrast to adaptive strategies based on proprioceptive and vestibular information.

© 2003 Elsevier Ireland Ltd and The Japan Neuroscience Society. All rights reserved.

**Keywords:** Balance control; Falls; Specific sensorimotor organisation; Visual dependency; Static and dynamic posturography; Working individuals

### 1. Introduction

Falls represent a major public-health problem, both for elderly people and in an occupational setting. Falls are responsible for 20–25% of occupational accidents for all sectors of industries combined (CNAMTS, 2001), and significantly threaten the quality of life by causing physical injuries, psychological sequelae and causing severe economical consequences (Larsson and Bjornstig, 1995; Leamon and Murphy, 1995). Moreover, falls represent 2–30% of fatal accidents (Nagata, 1991; Leclercq, 1999).

As suggested in previous studies in elderly populations, impaired balance, which can result from a dysfunction at

every level of postural control, is an important risk factor in the occurrence of falls (Overstall et al., 1977; Tinetti et al., 1988; Wallmann, 2001). Balance control is a complex sensorimotor function requiring the central processing of afferences from the visual, vestibular and somatosensory systems at the vestibular nuclei, leading to the organisation of motor responses such as gaze control by ocular reflexes from visual and vestibular origin and posture stabilisation by vestibulo-spinal reflex. Under conditions of reduced or conflicting sensory inputs, postural control performance generally decreases, pointing out the importance and relevance of each sensory system (Hayashi et al., 1988; Hoshiyama et al., 1993; Kuo et al., 1998).

The multitude of risk factors involved in fall mechanisms and their possible cumulative effects complicate the prevention of this type of occupational accident. Falls are entities with predictable risk factors that may be extrinsic

\* Corresponding author. Tel.: +33-383-682-929;

fax: +33-383-154-647.

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

(environmental factors), intrinsic (human factors) or mixed (combination of extrinsic and intrinsic factors) (Grönqvist et al., 2001a). In workers, the extrinsic factors relating to environment and occupational organisation are well documented and their involvement in the generation of falls is well known (Ledin et al., 1989; Gauchard et al., 2001a; Redfern et al., 2001). Concerning intrinsic factors, some studies have shown that personal factors such as individual differences, physical status or lifestyle may all affect balance control and consequently increase the risk of falls (Davis, 1983; Agnew and Suruda, 1993; Froom et al., 1996; Chau et al., 2002; Gauchard et al., 2003a). Moreover, dual-task activity by its consequences on postural adjustments (Lajoie et al., 1993; McIlroy and Maki, 1995) and by leading to difficulties in resolving sensory conflicts and so generate imbalance (Maki and McIlroy, 1996; Rankin et al., 2000) can become a risk factor of occupational accidents. Regarding balance control, the contribution of intrinsic factors in the occurrence of falls is less known in working individuals, but well studied in the elderly. The relative contribution of the visual cues increases with ageing (Pyykkö et al., 1988). Moreover, a decrease in the quality of proprioceptive information (Skinner et al., 1984; Assaiante and Amblard, 1995) and in the proper use of the vestibular system in the management of inter-sensory conflicts (Woollacott et al., 1986; Cohen et al., 1996; Gauchard et al., 2003b) is found with ageing. All these age-related modifications lead to a decrease in balance control quality and an increase in falls (Peterka and Black, 1990; Lord et al., 1991; Colledge et al., 1994; Perrin et al., 1997).

In addition, the contribution of these postural factors to the mechanisms of work-related falls has received little study despite the high risk of exposure to slipping and falling hazards. As the subject's ability to control his or her posture and to stabilise balance is necessary in avoiding falls (Redfern and Boswick, 1997; Grönqvist et al., 2001b), one hypothesis could be that workers who fall have greater difficulties in sensing and adjusting their postural control to new control tasks and to the new environmental constraints that they continuously face in their occupational activities.

The purpose of the present study was to investigate whether postural regulation in workers having fallen might

have specificities in terms of sensorimotor strategies and neuromuscular responses and whether the recurrence of a fall might be the result of a particular neurosensory organisation.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Subjects

The present study was conducted in the Nancy University Hospital (in north-eastern France) on female workers (nurses and auxiliary nurses) who were recruited by occupational physicians. The fall-victim subjects were female workers who had worked for 3 years or more in the Nancy University Hospital and who had been victims of at least one occupational accident with sick leave due to a fall in the period of 1998–2001. The population of fall-victim workers was split into two groups.

- A single-fall group, SF, was composed of 43 healthy workers (mean age  $45.5 \pm 8.1$  years old) who had been victims of one occupational accident due to a fall.
- A multi-fall group, MF, was composed of nine healthy workers (mean age  $44.9 \pm 7.4$  years old) who had been victims of two or more occupational accidents due to a fall.

A control group, C, was composed of 52 subjects (mean age  $44.6 \pm 6.7$  years old) who were also female workers who had worked for 3 years or more in the same hospital, but who had not had an occupational accident during the same period. Each control was chosen to be the closest to a fall-victim in terms of age ( $\pm 5$  years), grade, hospital care unit and working hours.

No significant differences in weight, height and body mass index were observed between the fall-victim and control groups (Table 1). All participants were free from any pathology of the central nervous system, and showed no orthopaedic disorders either of the trunk or the lower limbs that could affect postural performance. This study was approved by the Regional ethical committee (*Comité de Protection des Personnes qui se prêtent aux Recherches Biomédicales de Lorraine*) and by the

Table 1  
Mean values (m) with standard deviation (S.D.) of age (years), height (cm), weight (kg) and body mass index (BMI,  $\text{kg}/\text{m}^2$ ) for the multi-fall (MF), single-fall (SF) and control (C) groups

	Group			One-way ANOVA			
	MF (n = 9, m (S.D.))	SF (n = 43, m (S.D.))	C (n = 52, m (S.D.))	F-value (P)	Bonferroni test		
					MF/C (P)	SF/C (P)	MF/SF (P)
Age	45.55 (8.16)	44.97 (7.46)	44.63 (6.73)	0.07 (NS)	NS	NS	NS
Height	165.66 (8.53)	161.07 (7.00)	162.44 (4.98)	2.15 (NS)	NS	NS	NS
Weight	66.22 (9.72)	64.23 (11.07)	62.08 (10.28)	0.86 (NS)	NS	NS	NS
BMI	24.08 (3.06)	24.83 (4.27)	23.64 (3.65)	1.11 (NS)	NS	NS	NS

NS: non significant.

Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés. All subjects had given their informed consent prior to the study.

## 2.2. Static and dynamic posturographic tests

Static and dynamic posturographic recordings were performed during the same session using a vertical force platform, fitted with four strain gauges (Toennies GmbH, Freiburg, Germany), in a soundproof room. The subjects were requested to stand barefoot and upright on the platform, remaining as stable as possible, breathing normally, and with their arms at their sides, and were instructed to look straight ahead at a white dot located at eye level two meters away.

In the static test, displacements of the centre of foot pressure (CFP) were recorded for 20 s, in eyes open (EO), and then in eyes closed (EC) conditions. Statokinesigrams allowed measurement of sway path (SP) and the area covered by the CFP. Good postural control is mainly reflected by low values for SP and area parameters, the latter further conveying postural control precision (Perrin et al., 1999). Data obtained with EO and EC tests enables calculation of the Romberg's quotients (RQ) (RQ SP: EC/EO SP ratio, RQ area: EC/EO area ratio), which determines the contribution of visual afferences to balance control (Van Parys and Njiokiktjien, 1976). Sways in the anterior–posterior (AP) and lateral (Lat) axes were determined by vectorial analysis of CFP displacement.

During the dynamic test performed for 20 s, the movement displayed by the platform consisted in slow sinusoidal anterior–posterior oscillations of the support with 4° amplitude, at a frequency of 0.5 Hz, in EO and EC conditions (Diener and Dichgans, 1988). The analysis of CFP displacements was carried out by comparing them with the sinusoidal waveform yielded by the movement of the platform and as fast Fourier transformations (FFT) (Fig. 1). FFT graphs were analysed by determining the frequencies and amplitudes of the different peaks, and split in three groups. For this partition, the presence of high frequency peaks, whatever the amplitude yielded, was not taken into account, as it was considered that they do not reflect the level of instability of the subject (Perrin et al., 2002).

- Type 1 recordings, characterised by regular patterns at the same frequency as the stimulus, but in opposite phase with low or high amplitude, are considered to be homogeneous. FFT analysis shows a major peak at 0.5 Hz, with other small peaks of no more than 75% of the amplitude of the major peak, indicating high stability of the participant during the test. This pattern corresponds to a bottom-up regulation model, the body oscillating like an inverted pendulum, and involving mainly ankle movements. This type of sensorimotor strategy, termed “ankle strategy” (Horak and Nashner, 1986), is considered to be anticipatory (Gauchard et al., 2001b).

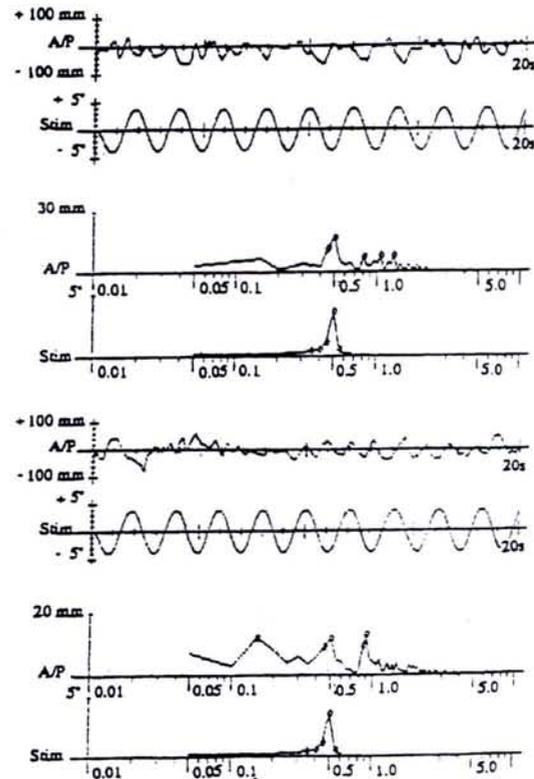


Fig. 1. Centre of foot pressure (CFP) displacements recorded during a sinusoidal posturographic test with oscillations in the sagittal plane. Stim: sinusoidal platform movements. Typical recordings of CFP displacements (anterior–posterior) and their fast Fourier transformations. The abscissa indicates the time that elapsed during the CFP recordings and the frequency in Hertz for the fast Fourier Transformation graphs. The amplitudes, on the ordinate scales, are expressed in millimetres for movement of the subjects and degrees for movement of the platform. Type 1 recordings (graph; upper part) are homogeneous curves. Type 2 recordings (graph; lower part) are inhomogeneous curves, characteristically irregular and representative of higher instability.

- Type 2 recordings, characterised by irregular patterns, at a different frequency from that of the stimulus with high amplitudes at the low frequencies, are considered to be inhomogeneous. FFT analysis shows a major 0.5 Hz peak associated with peaks at lower frequencies reaching more than 75% of the amplitude of the major peak or a major peak occurring at frequencies lower than 0.5 Hz, expressing the instability of the participant during the recording. This pattern corresponds to a top-down regulation model, favouring visual anchorage and/or vestibular reference systems and involving movements of the main joints. This type of sensorimotor strategy, termed “hip strategy” (Horak and Nashner, 1986), involves reactional adjustments (Gauchard et al., 2001b).
- Falls or “stepping strategy” (Horak and Nashner, 1986), were defined by observation of the participant

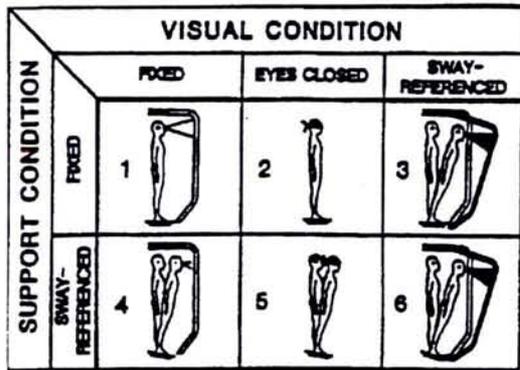


Fig. 2. The six conditions of the SOT (EquiTest, Neurocom International Inc., Clackamas, OR). Conditions 1–3 were performed on a fixed platform with eyes open, eyes closed, and vision sway-referenced. Conditions 4–6 were performed on a sway-referenced platform with eyes open, eyes closed, and vision sway-referenced.

reaching for support or obviously leaning on the security belt.

### 2.3. Sensory organization and motor control tests

All the subjects were also tested on a computerised dynamic posturography platform (EquiTest, Clackamas, OR).

The Sensory Organisation Test (SOT) evaluates the patient's ability to make effective use of visual, vestibular and somatosensory inputs and to suppress sensory information that is inappropriate. To give inadequate information, somatosensory and visual cues are disrupted by using a technique commonly referred to as sway-referenced. This technique involves tilting the support surface and/or the visual surround to directly follow the subject's anterior–posterior COG sway (Nashner, 1990). The SOT is composed of six conditions (Fig. 2); the first two conditions provide a basic measurement of the subject's stability. The support is fixed and the subject's eyes are opened (condition 1) or closed (condition 2). In condition 3, the support surface remains fixed while the subject stands, eyes open, within a sway-referenced visual surround. From conditions 4–6, somatosensory information is systematically disrupted (sway-referenced) and vision is respectively fixed (condition 4), absent (condition 5) and sway-referenced (condition 6). The subject's task is to maintain an upright stance during the three 20 s trials of each condition with as little postural sway as possible and without moving the feet. The subjects wore a harness attached to the ceiling to prevent injury in the case of a fall. When the subject required the assistance of this harness or took a step, the test was rated a fall.

The equilibrium score (ES) was calculated by comparing the patient's anterior–posterior sway during each 20 s SOT trial to the maximal theoretical sway limits of stability (8.5° anteriorly and 4° posteriorly). The following formula was

used to calculate the:

$$\text{equilibrium score} = \left[ 12.5^\circ - \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{12.5^\circ} \right] \times 100$$

where  $\theta_{\max}$  indicates the greatest AP COG sway angle displayed by the subject while  $\theta_{\min}$  indicates the lowest AP COG sway angle. A score of 100 represents no sway, while 0 indicates sway that exceeds the limit of stability, resulting in a fall.

The composite equilibrium score (CES) was calculated by independently averaging the scores for conditions 1 and 2, then adding to the equilibrium scores from each trial of sensory conditions 3–6, and finally dividing that sum by the total number of trials. In order to identify the significance of each sensory system influencing postural control, the ratios of SOT condition 2/condition 1 (RSOM), condition 4/condition 1 (RVIS) and condition 5/condition 1 (RVEST) were interpreted as reflecting the somatosensory, visual and vestibular functions respectively. The effect of altering visual preference (RPREF) on postural stability was also determined by calculating the ratio of SOTs 3 + 6 to SOTs 2 + 5, while the effect of altered proprioceptive inputs (RAPI) was calculated by the ratio of SOTs 4 + 5 + 6 to SOTs 1 + 2 + 3 (Black et al., 1995).

The Motor Control Test (MCT) evaluates the automatic motor reactions provoked by unexpected support surface perturbations. The sudden forward (F) and backward (B) translations are delivered at two intensities in sets of three trials to test the latency and force vectors of the response. The translation amplitudes are height normalised to yield medium (M) (1.8° sway) and large (L) (3.2° sway) translation, and last for 300 and 400 ms, respectively.

The latency (L) is defined as the time in milliseconds between the onset of a translation during the MCT, and the onset of the patient's active response to the support surface movement. Latencies are the averaged performance of the right and left feet. The latency composite score (LCS) reflects the average latency for both legs, and for both translation directions.

The same instructions given to subjects induced sufficiently similar behaviour that inter-individual comparisons were possible.

### 2.4. Statistics

The statistics were produced with Stata 5.0 software (Stata Corporation, College Station, Texas). Comparisons between the three groups were made using one-way analysis of variance for the static, SOT and MCT tests. One value of Area EC in SF group and one value of RQ area in MF group were eliminated in the analysis as they are higher than mean + 3 (S.D.). Then, for each statistically significant value of  $F$ , 2 by 2 comparisons were made using the Bonferroni test. For the slow sinusoidal test the comparison of frequencies was made with the Fisher's exact test. Statistical significance was accepted for  $P$  values lower than 0.05.

Table 2  
Static test

	Group			One-way ANOVA			
	MF ( <i>n</i> = 9, <i>m</i> (S.D.))	SF ( <i>n</i> = 43, <i>m</i> (S.D.))	C ( <i>n</i> = 52, <i>m</i> (S.D.))	<i>F</i> -value ( <i>P</i> )	Bonferroni test		
					MF/C ( <i>P</i> )	SF/C ( <i>P</i> )	MF/SF ( <i>P</i> )
SP/s (cm)							
EO	0.80 (0.19)	0.74 (0.18)	0.72 (0.19)	0.80 (NS)	NS	NS	NS
EC	1.30 (0.55)	1.09 (0.32)	1.10 (0.44)	1.07 (NS)	NS	NS	NS
Area/s (cm <sup>2</sup> )							
EO	0.31 (0.26)	0.28 (0.27)	0.29 (0.19)	0.06 (NS)	NS	NS	NS
EC	0.97 (1.29)	0.45 (0.41) <sup>a</sup>	0.43 (0.28)	4.75 (0.01)	0.009	NS	0.01
AP/s (cm)							
EO	0.12 (0.05)	0.11 (0.06)	0.13 (0.06)	0.48 (NS)	NS	NS	NS
EC	0.23 (0.10)	0.22 (0.10)	0.25 (0.14)	0.65 (NS)	NS	NS	NS
Lat/s (cm)							
EO	0.07 (0.02)	0.07 (0.04)	0.06 (0.03)	1.20 (NS)	NS	NS	NS
EC	0.12 (0.08)	0.08 (0.05)	0.06 (0.03)	6.41 (0.002)	0.002	NS	0.01
RQ SP	1.63 (0.54)	1.47 (0.38)	1.48 (0.38)	0.68 (NS)	NS	NS	NS
RQ area	2.04 (1.29) <sup>a</sup>	1.94 (1.23)	1.67 (0.69)	1.05 (NS)	NS	NS	NS

Mean results of SP, area, anterior–posterior (AP), lateral (Lat) parameters in eyes open (EO) and eyes closed (EC) conditions and of Romberg's quotient (RQ) for the multi-fall (MF), single-fall (SF) and control (C) groups. NS: non significant.

<sup>a</sup> One value of area EC in SF group and one value of RQ area in MF group were eliminated in the analysis as they are higher than mean +3 (S.D.).

### 3. Results

Table 2 shows the results obtained from the static tests. The lowest area values were observed in C whereas the highest values were noted in the MF group. The differences were statistically significant in EC condition between the MF and C ( $P = 0.009$ ) and MF and SF ( $P = 0.01$ ) groups. A similar pattern was observed for the lateral sway values, the differences being statistically significant in EC condition between the MF and C ( $P = 0.002$ ) and the MF and SF ( $P = 0.01$ ) groups. Although our results for the main parameters highlight a grading, from highest to lowest value, of MF, SF and C, no significant differences were observed for the SP, AP parameter and RQ SP, RQ area in the three groups.

Table 3 shows results obtained from the slow dynamic test. In EO condition, even if homogeneous type 1 patterns

were predominant for all the groups, the fall-victims displayed few stable strategies, but none of the participants of the three groups fell. Significant differences were observed for sensorimotor strategies between the MF and C ( $P = 0.003$ ) and SF and C ( $P = 0.01$ ) groups. When the test was performed in EC condition, the frequency of homogeneous type 1 patterns dropped for the three groups. This decrease was significantly greater for MF and SF compared to the controls. There were also several falls in the MF and SF groups, none being noted in C. Highly significant differences were observed for the sensorimotor strategies between the MF and C ( $P = 0.0001$ ), SF and C ( $P = 0.005$ ), and MF and SF ( $P = 0.0001$ ) groups.

Table 4 provides the results concerning the SOT and the MCT. During the SOT, the lowest values were noted for MF and significant differences were observed in condition

Table 3  
Slow dynamic test

	MF, <i>n</i> = 9, % ( <i>n</i> )	SF, <i>n</i> = 43, % ( <i>n</i> )	C, <i>n</i> = 52, % ( <i>n</i> )	Fisher's exact test		
				MF/C ( <i>P</i> )	SF/C ( <i>P</i> )	MF/SF ( <i>P</i> )
EO						
Type 1	67 (6)	79 (34)	96 (50)	0.003	0.01	NS
Type 2	33 (3)	21 (9)	4 (2)			
Falls	0 (0)	0 (0)	0 (0)			
EC						
Type 1	0 (0)	13 (6)	40 (21)	0.0001	0.005	0.0001
Type 2	33 (3)	80 (34)	60 (31)			
Falls	67 (6)	7 (3)	0 (0)			

Mean results of the frequency distribution in three types of strategies in eyes open (EO) and eyes closed (EC) conditions for the multi-fall (MF), single-fall (SF) and control (C) groups. NS: non significant.

Table 4  
Sensory organisation and motor control tests

	Group			One-way ANOVA			
	MF (n = 9, m (S.D.))	SF (n = 4, m (S.D.))	C (n = 52, m (S.D.))	F-value (P)	Bonferroni test		
					MF/C (P)	SF/C (P)	MF/SF (P)
<b>SOT</b>							
ES 1	93.11 (2.08)	94.86 (1.63)	95.19 (1.76)	5.49 (0.005)	0.004	NS	0.02
ES 2	90.51 (5.16)	92.64 (2.69)	93.46 (1.77)	5.24 (0.006)	0.006	NS	NS
ES 3	88.66 (4.35)	89.98 (6.53)	91.60 (3.71)	1.93 (NS)	NS	NS	NS
ES 4	82.03 (6.28)	84.35 (8.51)	86.83 (4.28)	3.00 (NS)	NS	NS	NS
ES 5	45.74 (19.55)	58.62 (16.72)	69.11 (7.81)	15.3 (0.0001)	0.0001	0.001	0.02
ES 6	50.25 (23.16)	63.78 (12.88)	72.04 (7.50)	15.3 (0.0001)	0.0001	0.003	0.007
CES	70.26 (8.57)	76.98 (7.53)	81.96 (3.33)	18.8 (0.0001)	0.0001	0.0001	0.008
RSOM	97.20 (5.03)	97.66 (2.67)	98.20 (1.77)	0.82 (NS)	NS	NS	NS
RVIS	88.10 (6.47)	88.90 (8.77)	91.23 (4.35)	1.81 (NS)	NS	NS	NS
RVEST	49.17 (21.02)	61.76 (17.60)	72.62 (8.20)	14.17 (0.0001)	0.0001	0.001	0.04
RPREF	103.11 (18.82)	102.37 (10.94)	100.78 (5.46)	0.44 (NS)	NS	NS	NS
RAP1	65.43 (14.12)	74.49 (11.40)	81.37 (5.23)	14.74 (0.0001)	0.0001	0.001	0.02
<b>MCT</b>							
LMF	136.11(19.81)	129.41 (11.13)	131.92 (12.65)	1.16 (NS)	NS	NS	NS
LLF	130.00 (18.87)	123.48 (13.95)	126.05 (16.64)	0.74 (NS)	NS	NS	NS
LMB	137.77(17.34)	132.55 (13.38)	135.77 (16.13)	0.74 (NS)	NS	NS	NS
LLB	144.44 (16.48)	129.06 (13.68)	130.86 (14.97)	4.18 (0.01)	0.03	NS	0.01
LCS	140.88 (12.48)	128.62 (8.86)	131.46 (11.31)	5.17 (0.007)	0.04	NS	0.006

Sensory organisation test (SOT)—mean results of the equilibrium score (ES) for the six conditions, the composite equilibrium score (CES), the ratios of the somesthetic (RSOM), visual (RVIS), vestibular (RVEST) functions, the ratio of visual preference (RPREF), and the ratio of altered proprioceptive inputs (RAP1) for the MF, SF and C groups. Motor control test (MCT)—mean results of the active response latency (L) to the support surface movement for medium (M) and large (L) translations in the forward (F) and backward (B) directions and of the latency composite score (LCS) for the multi-fall (MF), single-fall (SF) and control (C) groups. NS: non significant.

1 between the MF and C ( $P = 0.004$ ), and MF and SF ( $P = 0.02$ ) groups, in condition 2 between the MF and C ( $P = 0.006$ ) groups, in condition 5 between the MF and C ( $P = 0.0001$ ), SF and C ( $P = 0.001$ ) and MF and SF ( $P = 0.02$ ) groups, and in condition 6 between the MF and C ( $P = 0.0001$ ), SF and C ( $P = 0.003$ ) and MF and SF ( $P = 0.007$ ) groups. There were also several falls in MF (five) and SF (nine) in condition 5 and in MF (five) and SF (two) in condition 6, none being noted in C. The lowest values for the CES were observed in MF and the differences were significant between the MF and C ( $P = 0.0001$ ), SF and C ( $P = 0.0001$ ), and MF and SF ( $P = 0.008$ ) groups. Concerning the different ratios, the lowest values were observed in MF and the differences were significant for the RVEST between the MF and C ( $P = 0.0001$ ), SF and C ( $P = 0.001$ ), and MF and SF ( $P = 0.04$ ) groups, and for the RAP1 between the MF and C ( $P = 0.0001$ ), SF and C ( $P = 0.001$ ), and MF and SF ( $P = 0.02$ ) groups. A MF, SF and controls hierarchy, from worst to best, can be proposed on the basis of the SOT's scores.

During the MCT, the longest mean latencies to onset of active response for large backwards translation were recorded in MF and the differences were significant between the MF and C ( $P = 0.03$ ), and MF and SF ( $P = 0.01$ ) groups. The (LCS) was also the longest in MF and the differences were significant between the MF and C ( $P = 0.04$ ), and MF and SF ( $P = 0.006$ ) groups. Conversely, no significant differ-

ence was observed for the LMF, LLF and LMB between the three groups.

#### 4. Discussion

In this study, the single-fall and particularly the multi-fall subjects showed a poorer quality of static and dynamic balance, especially in eyes closed condition, showing a higher contribution of visual afferent and a lower use of proprioception compared with the controls. The fall-victim groups also showed relatively less reliance on vestibular information and great difficulties in maintaining a correct upright stance when proprioceptive input was altered. Moreover, the multi-fall-victims displayed significantly longer neuromuscular response latencies to balance perturbations. In addition, the current results allow the proposal of a balance hierarchy, from worst to best, multi-fall-victim, single-fall-victim and controls, which suggests that specific sensorimotor organisation has an important role in the occurrence and in the recurrence of falls. Multifall could be either due to inner factors or consequence of trauma consecutive to the first fall. This last hypothesis is not retained due to the fact that fall-group subjects with pathologies classically negatively affecting balance control were excluded.

The static tests used in this study allowed an evaluation of the body sway and of the dependency of the subject on visual afferent. Several studies have shown that ageing

is associated with a higher contribution of the visual cues (Pyykkö et al., 1988; Perrin et al., 1997). This results in reduced postural control (Lord et al., 1991; Perrin et al., 1997) and an increased risk of falls. The current EC results indicated that multi-fall-victims have difficulty shifting sensorimotor dominance from vision to proprioception, suggesting a deficit in the correct use of somatosensory input for postural control and a higher contribution of visual afferent. Because slips and trips occur unexpectedly, prompt and accurate reactional responses are necessary to avoid falling. Proprioceptive information, with elementary medullar processing, could generate a quick stabilising motor response, whereas visual information, from environmental references with a higher level processing, generates a more accurate but slower response. Strategies involving higher visual contribution appear insufficient to prevent falls in contrast with those involving vestibular and proprioceptive preferences.

The use of a particular sensorimotor strategy to control posture depends on the choice of sensory cues (visual, vestibular or proprioceptive) employed to detect divergences between the planned posture and that really adopted. It is well known that subjects select sensory orientation references differently according to their personal experience (Horak et al., 1994; Assaiante and Amblard, 1995) that age-related changes could accentuate.

The loss of redundant sensory inputs affects the fall-victim groups to a greater extent than the controls. When visual or somatosensory inputs were reduced or removed, the fall-victim groups swayed more than the controls but within their limits of stability. A significant drop in postural stability and several falls actually occurred when both of these sensory inputs were reduced (slow dynamic test, SOTs' 5, 6), leaving the vestibular input as the main source of sensory information available for balance. Indeed, during these stressful conditions, subjects have to compensate for the visual deprivation and the absence of proprioceptive detection by an increased usage of vestibular referential and/or correct their posture by adopting a more appropriate balance strategy involving reorganisation of the different components of postural control. Several studies on falls among the elderly population have proposed that imbalance and falls could be explained by the lower reliance on vestibular afferent in the construction of balance strategy (Woollacott et al., 1986; Cohen et al., 1996). Our data indicate that fall-victims are dependent on support surface and visual references, and that not only do they not base their postural control on the vestibular referential but also adopt postural control schemes that place them at increased risk of falling in specific sensory environments.

Vestibular inputs play an important role in the control of lateral body sway oscillations (Magnusson et al., 1990; Kristinsdottir et al., 2000) whereas proprioceptive inputs control the anterior–posterior oscillations (Nakagawa et al., 1993). In our study, the multi-fall-victims were found to have a poor postural stability in the frontal plane which could be explained by their low reliance on vestibular information.

In this respect, our results are consistent with those of Maki et al. (1994) indicating that the control of lateral stability is a good predictor of the risk of falling.

To maintain the COG over the base of the support during postural disturbance of an unexpected nature, the subjects have to execute coordinated and properly scaled corrective movements involving long-loop pathways of the automatic control system (Brooks, 1986). In our study, the multi-fall-victims demonstrated a diminished functional ability to recover balance control quickly following an unexpected external disturbance. These inadequate responses with longer latencies are probably the result of less of a reliance on proprioceptive and vestibular inputs (Gauchard et al., 2003b), which are known to activate and modulate these balance-correcting responses (Allum and Shepard, 1999).

The increased number of falls during conditions in which visual and tactile-proprioceptive cues were distorted or absent could also reflect a deficit in sensorimotor processing rather than a peripheral vestibular system dysfunction (Wolfson et al., 1992). In order to maintain postural control in a variety of environmental conditions, motion information from sensory systems must be selected by the central nervous system (CNS) so that inappropriate or inadequate sensory inputs can be ignored when necessary; the CNS comparing them to an internal model and generating correct motor commands to the muscles (Mergner et al., 1997). In addition, it is possible that the central processing, which must deal with conflicting sensory information, may produce inappropriate responses based on the sensory signals available (Peterka and Black, 1990) that lead the subjects to instability.

In our study, there were small differences between the three groups in conditions that did not stress postural control. Our results show that the postural differences appeared when the difficulty of the tests increased, especially in situations of sensorial conflict. This observation must be taken into consideration in the prevention of accidents due to falling, and examinations aimed at detecting subjects at risk should place individuals in dynamic situations at the least, and indeed even in situations of sensorial conflict, as these are found in workplaces and are probably at the origin of occupational accidents.

In conclusion, this study has demonstrated that the reweighting of the different cues controlling balance, which workers frequently have to deal in the workplace, is less efficient in fall-victims, and particularly in multi-fall-victims. This difficulty in adapting and adjusting motor control performance correctly and rapidly to changing external and internal constraints produces instability, which often results in a fall. As impaired balance is a good predictor of falls, the early detection of a particular sensorimotor organisation promoting visual information to the detriment of proprioceptive and vestibular cues could limit the risk of occupational accidents, possibly by the development of a prevention approach aimed at adapting task to worker.

## Acknowledgements

Financial support from the CIRC-Centre Hospitalier-Universitaire de Nancy, Conseil Régional de Lorraine and Conseil Général de Meurthe-et-Moselle grants are gratefully acknowledged.

## References

- Agnew, J., Suruda, A.J., 1993. Age and fatal work-related falls. *Hum. Factors* 35, 731–736.
- Allum, J.H.J., Shepard, N.T., 1999. An overview of the clinical use of dynamic posturography in the differential diagnosis of balance disorders. *J. Vestib. Res.* 9, 223–252.
- Assaiante, C., Amblard, B., 1995. An ontogenetic model for the sensorimotor organization of balance control in humans. *Hum. Mov. Sci.* 14, 13–43.
- Black, F.O., Paloski, W.H., Doxey-Gasway, D.D., Reschke, M.F., 1995. Vestibular plasticity following orbital spaceflight: recovery from post-flight postural instability. *Acta Otolaryngol. (Stockholm)* 520 (Suppl.), 450–454.
- Brooks, V., 1986. *The Neural Basis of Motor Control*. Oxford University Press, New York.
- Chau, N., Mur, J.M., Benamghar, L., Siegfried, C., Dangelzer, J.L., Franca, M., Jacquin, R., Sourdou, A., 2002. Relationships between some individuals characteristics and occupational accidents in the construction industry: a case-control study on 880 victims of accidents occurred during a two-year period. *J. Occup. Health* 44, 131–139.
- Cohen, H., Heaton, L.G., Congdon, S.L., Jenkins, H.A., 1996. Changes in sensory organization test scores with age. *Age Ageing* 25, 39–44.
- Colledge, N.R., Cantley, P., Peaston, I., Brash, H., Lewis, S., Wilson, J.A., 1994. Ageing and balance: the measurement of spontaneous sway by posturography. *Gerontology* 40, 273–278.
- Caisse Nationale de l'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés (CNAMTS), 2001. *Statistiques financières et technologiques des accidents du travail (années 1997, 1998, 1999)*. CNAMTS, Paris.
- Davis, P.R., 1983. Human factors contributing to slips, trips and falls. *Ergonomics* 26, 51–59.
- Diener, H.C., Dichgans, J., 1988. On the role of vestibular and somatosensory information for dynamic postural control in humans. In: Pompeiano, O., Allum, J. (Eds.), *Progress in Brain Research*, vol. 76. Elsevier, Amsterdam, pp. 253–262.
- Froom, P., Melamed, S., Kristal-Boneh, E., Gofar, D., Ribak, J., 1996. Industrial accidents are related to relative body weight: the Israeli CORDIS study. *Occup. Environ. Med.* 53, 832–835.
- Gauchard, G.C., Chau, N., Mur, J.M., Perrin, Ph.P., 2001a. Falls and working individuals: role of extrinsic and intrinsic factors. *Ergonomics* 44, 1330–1339.
- Gauchard, G.C., Jeandel, C., Perrin, Ph.P., 2001b. Physical and sporting activities improve vestibular afferent usage and balance in the elderly human subjects. *Gerontology* 47, 263–270.
- Gauchard, G.C., Chau, N., Touron, C., Benamghar, L., Dehaene, D., Perrin, Ph.P., Mur, J.M., 2003a. Individual characteristics in occupational accidents due to imbalance: a case-control study of the employees of a railway company. *Occup. Environ. Med.* 60, 330–335.
- Gauchard, G.C., Gangloff, P., Jeandel, C., Perrin, Ph.P., 2003b. Physical activity improves gaze and posture control in the elderly. *Neurosci. Res.* 45, 409–417.
- Grönqvist, R., Abeysekera, J., Gard, G., Hsiang, S.M., Leamon, T.B., Newman, D.J., Giolo-Perzack, K., Lockhart, T.E., Pai, C.Y., 2001a. Human-centred approaches in slipperiness measurement. *Ergonomics* 44, 1167–1199.
- Grönqvist, R., Chang, W.R., Courtney, T.K., Leamon, T.B., Redfern, M.S., Strandberg, L., 2001b. Measurement of slipperiness: fundamental concepts and definitions. *Ergonomics* 44, 1102–1117.
- Hayashi, R., Miyake, A., Watanabe, S., 1988. The functional role of sensory inputs from the foot: stabilizing human standing posture during voluntary and vibration-induced body sway. *Neurosci. Res.* 5, 203–213.
- Horak, F.B., Nashner, L.M., 1986. Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configuration. *J. Neurophysiol.* 55, 1369–1381.
- Horak, F.B., Shupert, C.L., Dietz, V., Horstmann, G., 1994. Vestibular and somatosensory contributions to responses to head and body displacements in stance. *Exp. Brain Res.* 100, 93–106.
- Hoshiyama, M., Watanabe, S., Kaneoke, Y., Koike, Y., Takahashi, A., 1993. Effect of optokinetic stimulation on human balance recovery in unexpected forward fall. *Neurosci. Res.* 18, 121–127.
- Kristinsson, E.K., Jarnlo, G.B., Magnusson, M., 2000. Asymmetric vestibular function in the elderly might be a significant contributor to hip fractures. *Scand. J. Rehabil. Med.* 32, 56–60.
- Kuo, A.D., Speers, R.A., Peterka, R.J., Horak, P.B., 1998. Effect of altered sensory conditions on multivariate descriptors of human postural sway. *Exp. Brain Res.* 122, 185–195.
- Lajoie, Y., Teasdale, N., Bard, C., Fleury, M., 1993. Attentional demands for static and dynamic equilibrium. *Exp. Brain Res.* 97, 139–144.
- Larsson, T.J., Bjornstig, U., 1995. Persistent medical problems and permanent impairment five years after occupational injury. *Scand. J. Soc. Med.* 23, 121–128.
- Leamon, T.B., Murphy, P.L., 1995. Occupational slips and falls: more than a trivial problem. *Ergonomics* 38, 487–498.
- Leclercq, S., 1999. Prevention of same level falls: a more global appreciation of this type of accident. *J. Safety Sci.* 30, 103–112.
- Ledin, T., Odkvist, L.M., Möller, C., 1989. Posturography findings in workers exposed to industrial solvents. *Acta Otolaryngol. (Stockholm)* 107, 357–361.
- Lord, S.R., Clark, R.D., Webster, I., 1991. Postural stability and associated physiological factors in a population of aged persons. *J. Gerontol.* 46, M69–M76.
- Magnusson, M., Enbom, H., Johansson, R., Wiklund, J., 1990. Significance of pressure input from the human feet in lateral postural control. The effect of hypothermia on galvanically induced body-sway. *Acta Otolaryngol. (Stockholm)* 110, 321–327.
- Maki, B., Holliday, P., Topper, A., 1994. A prospective study of postural balance and risk of falling in an ambulatory and independent elderly population. *J. Gerontol.* 49, M72–M84.
- Maki, B.E., McIlroy, W.E., 1996. Influence of arousal and attention on the control of postural sway. *J. Vestib. Res.* 6, 53–59.
- McIlroy, W.E., Maki, B.E., 1995. Adaptive changes to compensatory stepping responses. *Gait Posture* 3, 43–50.
- Mergner, T., Huber, W., Becker, W., 1997. Vestibular-neck interaction and transformation of sensory coordinates. *J. Vestib. Res.* 7, 347–367.
- Nagata, H., 1991. Analysis of fatal falls on the same level or on stairs/steps. *Safety Sci.* 14, 213–222.
- Nakagawa, H., Ohashi, N., Watanabe, Y., Mizukoshi, K., 1993. The contribution of proprioception to posture control in normal subjects. *Acta Otolaryngol. (Stockholm)* 504 (Suppl.), 112–116.
- Nashner, L.M., 1990. Dynamic posturography in the diagnosis and management of dizziness and balance disorders. *Neurol. Clin.* 8, 331–349.
- Overstall, P.W., Exton-Smith, A.N., Imms, F.J., Johnson, A.L., 1977. Falls in the elderly related to postural imbalance. *Br. Med. J.* 1, 261–264.
- Perrin, Ph.P., Jeandel, C., Perrin, C., Bene, M., 1997. Influence of visual control, conduction and central integration on static and dynamic balance in healthy older adults. *Gerontology* 43, 223–231.
- Perrin, Ph.P., Gauchard, G.C., Perrot, C., Jeandel, C., 1999. Effects of physical and sporting activities on balance control of elderly people. *Br. J. Sports Med.* 33, 121–126.
- Perrin, Ph.P., Deviterne, D., Hugel, F., Perrot, C., 2002. Judo, better than dance, develops sensorimotor adaptabilities involved in balance control. *Gait Posture* 15, 187–194.
- Peterka, R.J., Black, F.O., 1990. Age-related changes in human posture control: sensory organization tests. *J. Vestib. Res.* 1, 73–85.

- Pyykkö, I., Aalto, H., Hytonen, M., Starck, J., Jäniti, P., Ramsay, H., 1988. Effect of age on postural control. In: Amblard, B., Berthoz, A., Clarac, F. (Eds.), *Proceedings of the Ninth International Symposium on Postural and Gait Research, International Congress Series 812, Posture and Gait: Development, Adaptation and Modulation*. Excerpta Medica, Marseille, France, Amsterdam, New York, Oxford, pp. 95–104.
- Rankin, J.K., Woollacott, M.H., Shumway-Cook, A., Brown, L.A., 2000. Cognitive influence on postural stability: a neuromuscular analysis in young and older adults. *J. Gerontol.* 55, M112–M119.
- Redfern, M.S., Cham, R., Gielo-Perczak, K., Grönqvist, R., Hirvonen, M., Lanshammar, H., Marpett, M., Yi-Chung Pai, C., Powers, C., 2001. Biomechanics of slips. *Ergonomics* 44, 1138–1166.
- Redfern, M.S., Blawick, D., 1997. Slips, trips and falls. In: Nordin, M., Andersson, G., Pope, M. (Eds.), *Musculoskeletal Disorders in the Workplace*. Masby-Year Inc., pp. 152–166.
- Skinner, H.B., Barrack, R.L., Cook, S.D., 1984. Age-related decline in proprioception. *Clin. Orthop.* 184, 208–211.
- Tinetti, M.E., Speechley, M., Ginter, S.F., 1988. Risk factors for falls among elderly persons living in the community. *New Engl. J. Med.* 319, 1701–1707.
- Van Parys, J.A.P., Nijokiktjen, Ch.J., 1976. Romberg's sign expressed in a quotient. *Agressologie* 17, 95–100.
- Wallmann, H.W., 2001. Comparison of elderly nonfallers and fallers on performance measures of functional reach, sensory organization, and limits of stability. *J. Gerontol.* 56, M580–M583.
- Wolfson, L., Whipple, R., Derby, C.A., Amerman, P., Murphy, T., Tobin, J.N., Nashner, L.M., 1992. A dynamic posturography study of balance in healthy elderly. *Neurology* 42, 2069–2075.
- Woollacott, M., Shumway-Cook, A., Nashner, L.M., 1986. Ageing and posture control changes in sensory organization and muscular coordination. *Int. J. Ageing Hum. Dev.* 23, 97–114.

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1  
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES  
Rue du Jardin Botanique - BP 11  
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

## Annexe 2 :

### *International Archives of Occupational and Environmental Health*

Vouriot A, Hannhart B, Gauchard GC, Barot A, Ledin T, Mur JM, Perrin Ph  
(sous presse)

Professor  
Philippe P. Perrin, MD, PhD  
UFR STAPS  
Université Henri Poincaré-Nancy 1  
30, rue du Jardin Botanique  
F - 54600 Vellers-lès-Nancy  
France

International Archives of  
**Occupational**  
and  
**Environmental**  
**Health**

Prof. Dr. med. H. Drexler  
- Editor in Chief -  
Institut mit Poliklinik für Arbeits-,  
Sozial - und Umweltmedizin  
der Universität Erlangen-Nürnberg  
Schillerstr. 25/29  
D-91054 Erlangen

Phone: ++49-9131/85 2 2255  
Fax: ++49-9131/85 2 2317  
++49-9131/85 6130  
e-mail: [IAOEH.KHSchaller@rzmail.uni-erlangen.de](mailto:IAOEH.KHSchaller@rzmail.uni-erlangen.de)

Erlangen, 13 January 2005

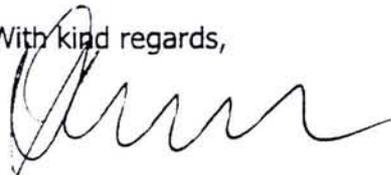
**Vouriot A et al.**  
**Long-term exposure to solvents impairs vigilance and postural control**  
**in serigraphy workers**  
**(IAOEH-no. 2672)**

Dear Colleague,

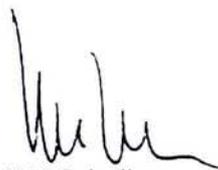
thank you for your revised paper. I am pleased to inform you that your a.m. contribution has been accepted for publication as a Short Communication. We have already received the electronic version of your manuscript which we will forward to the publisher.

Thank you very much for your cooperation.

With kind regards,



Professor Dr. med. H. Drexler  
- Editor in Chief -



K.H. Schaller  
Associate Editor

Annexe 3:

*Neurotoxicology*  
2005;48:239-247



## Chronic Exposure to Anesthetic Gases Affects Balance Control in Operating Room Personnel

Alexandre Vouriot<sup>1,2</sup>, Gérome C. Gauchard<sup>1,2</sup>, Narkasen Chau<sup>1,3</sup>, Rachel Nadif<sup>1</sup>,  
Jean-Marie Mur<sup>1,3</sup>, Philippe P. Perrin<sup>1,2,4,\*</sup>

<sup>1</sup>National Institute for Health and Medical Research (INSERM), U420, Faculty of Medicine, Vandoeuvre-lès-Nancy, France

<sup>2</sup>Balance Control and Motor Performance, UFR STAPS, Henri Poincaré University-Nancy 1, Villers-lès-Nancy, France

<sup>3</sup>French National Research and Safety Institute (INRS), Vandoeuvre-lès-Nancy, France

<sup>4</sup>Department of ENT, University Hospital of Nancy, Vandoeuvre-lès-Nancy, France

Received 31 March 2004; accepted 16 November 2004  
Available online 25 December 2004

### Abstract

Exposure to anesthetic gases is known to alter certain structures and functions of the central nervous system. As the effects of long-term exposure on balance control mechanisms have been the subject of few investigations, these were evaluated in 53 operating room personnel exposed to anesthetic gases and in 53 non-exposed individuals. Balance control was assessed by static and dynamic posturography. Exposed workers had the worst static and dynamic postural performances, particularly in the eyes closed condition, suggesting increased dependency on vision and decreased use of proprioception. This poorer ability to modify the weight and to switch the different cues controlling balance suggests central information processing disorders. By impairing information and its central integration, exposure to anesthetic gases leads to inappropriate organization of sensorimotor stabilization strategies.  
© 2004 Elsevier Inc. All rights reserved.

**Keywords:** Balance control; Anesthetic gases; Long-term effects; Posturography; Compensatory mechanisms; Workers

### INTRODUCTION

The complaints of operating room personnel occupationally exposed to halogenated volatile anesthetic agents are disorientation, fixated vision, vertigo, headaches and mood disorders (Schneider, 1986). Muscle leg weakness, numbness and tingling have also been reported (Brodsky et al., 1981; Saurel-Cubizolles et al., 1992). Moreover, occupational exposure to volatile anesthetic agents is known to be responsible for a reduction in alertness (Cook et al., 1978) and risk evaluation (Bentin et al., 1978). Short-term exposure to these chemical hazards has neurobehavioral effects

such as slower reaction time and reduced cognitive efficiency (Camerino et al., 1992; Lucchini et al., 1996).

Balance control is a complex sensorimotor function requiring the central processing of afferences from the visual, vestibular and somatosensory systems in the vestibular nuclei, leading to the organization of motor responses, such as gaze control by ocular reflexes from visual and vestibular origin and posture stabilization by the vestibulo-spinal reflex. Damage to any of these systems influences the common output of the postural system, resulting in an increased risk of occupational accidents (Gauchard et al., 2003; Vouriot et al., 2004).

Sedative drugs are assumed to impair postural control (Cutson et al., 1997) as well as vestibulo-ocular reflex (Schroeder, 1971) and voluntary eye movements (Padoan et al., 1992) and to act on central sensory

\* Corresponding author. Tel.: +33 383 682 929;  
fax: +33 383 154 647.  
E-mail address: Philippe.Perrin@staps.uhp-nancy.fr (P.P. Perrin).

Annexe 4:

*Neuroscience Letters*  
2002;329:96-100

## Mood states and anxiety influence abilities to maintain balance control in healthy human subjects

Benoît Bolmont<sup>a,\*</sup>, Pierre Gangloff<sup>b,c</sup>, Alexandre Vouriot<sup>b,c</sup>, Philippe P. Perrin<sup>b-d,1</sup>

<sup>a</sup>UFR SciFa, Département STAPS, Université de Metz, Campus Bridoux, Avenue Général Delestraint, 57070 Metz-Borny, France

<sup>b</sup>Equilibration et Performance Motrice, UFR STAPS, Université Henri Poincaré-Nancy 1, 54600 Villers-lès-Nancy, France

<sup>c</sup>Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (INSERM), U 420, Faculté de Médecine, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

<sup>d</sup>Laboratoire d'Exploration Fonctionnelle, Service ORL, Centre Hospitalier Universitaire de Nancy, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

Received 7 January 2002; received in revised form 24 May 2002; accepted 24 May 2002

### Abstract

Previous studies have shown that anxiety and balance disorders could be related; however, the association between psychological processes and equilibrium remains ambiguous. In this study, we have examined whether mood states and anxiety may influence the ability to use the somatosensory, visual and vestibular systems and affect balance control in healthy subjects. Seven male students were submitted to a program testing equilibrium over a 12-day period, during which moods and anxiety states were assessed using self-evaluated questionnaires. Significant negative correlations were found between moods, including anxiety, and the subject's sensory and motor systems of balance control, suggesting that low moods may alter balance performance. However, depending on the type of mood, it is likely that adverse changes in mood states may affect balance in different ways, either through the sensory organization or motor control. © 2002 Elsevier Science Ireland Ltd. All rights reserved.

**Keywords:** Mood states; Anxiety; Equilibrium; Postural control

The maintenance of equilibrium results from the integration at the central nervous system level of vestibular, somatosensory, and visual inputs, and depends on the quality and the integrity of the motor effectors aiming at compensating postural disturbances [12]. All these sensorial afferences project on, and are integrated at the vestibular nuclei of the brainstem; this allows the organization of motor reflex responses, such as the vestibulo-ocular and the vestibulo-spinal reflexes, and the occurrence of adaptive and compensatory ocular and body movements [11]. The importance and relevance of each sensory system in the control of posture has been well established through the observation of individuals deprived of sensory inputs from one or more of the three systems; this lack of input, or a lack of accurate input, generally decreases postural control performance [17].

Balance disorders and elevated levels of anxiety could be associated [5]. Previous studies have shown that individuals with postural control dysfunctions, such as vestibular disorders,

are prone to be anxious [5,9,14]. This has been suggested to result, at least partly, from somatopsychic processes; for instance, dizziness, a frightening experience, could lead to fear or panic and thus to the occurrence and development of an anxiety response [18]. Reciprocally, evidence of postural instability has been observed in subjects suffering from anxiety disorders [19]; this has led to the assumption that anxiety could affect the highly complex postural system [16]. It is likely that this association between anxiety and balance disorders, which is not restricted to clinical samples [21], may be explained by neuro-anatomic studies which have shown that common central neural circuits could be involved in the control of vestibular processing and anxiety [1,6]. However, the relationship between anxiety and postural control remains unclear. Indeed, although dizziness or disequilibrium may contribute to an escalating cycle of anxiety, anxiety in turn has been demonstrated to affect postural control, either negatively [16] or positively, by influencing the interactions of visual inputs with somatosensory and vestibular inputs [15,20].

Only few systematic and quantitative studies have investigated the relationship between postural control and

\* Corresponding author.

<sup>1</sup> Co-corresponding author.

E-mail addresses: bolmont@sciences.univ-metz.fr

(B. Bolmont), philippe.perrin@staps.u-nancy.fr (P.P. Perrin).

## Annexe 5:

*International Journal of Neuroscience*  
2002;112:1191-206

## EFFECTS OF EXERCISE-INDUCED FATIGUE WITH AND WITHOUT HYDRATION ON STATIC POSTURAL CONTROL IN ADULT HUMAN SUBJECTS

GÉROME C. GAUCHARD  
PIERRE GANGLOFF  
ALEXANDRE VOURIOT

Institut National pour la Santé et la Recherche Médicale  
Faculté de Médecine, Vandoeuvre-lès-Nancy, France  
Laboratoire Equilibration et Performance Motrice  
Unité de Formation et de Recherche en Sciences et Techniques  
des Activités Physiques et Sportives  
Villers-ès-Nancy, France

JEAN-PIERRE MALLIÉ

Laboratoire d'Exploration Fonctionnelle Rénale  
Centre Hospitalier Universitaire de Nancy  
Vandoeuvre-lès-Nancy, France

PHILIPPE P. PERRIN

Institut National pour la Santé et la Recherche Médicale  
Faculté de Médecine, Vandoeuvre-lès-Nancy, France  
Laboratoire Equilibration et Performance Motrice  
Unité de Formation et de Recherche en Sciences et Techniques  
des Activités Physiques et Sportives  
Villers-ès-Nancy, France  
Laboratoire d'Exploration Fonctionnelle  
Service ORL, Centre Hospitalier Universitaire de Nancy  
Vandoeuvre-lès-Nancy, France

Received 19 April 2002.

This study was supported by a grant of the Société des Eaux Minérales de Saint-Amand-les-Eaux.

Address correspondence to Professor Ph. Perrin, MD, PhD, Laboratoire Equilibration et Performance Motrice, Unité de Formation et de Recherche en Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (UFR STAPS), 30, rue du Jardin Botanique, 54 600 Villers-ès-Nancy, France. E-mail: philippe.perrin@staps.uhp-nancy.fr

Postural instability can be the result of various factors, including fatigue. Although it is well known that exercise-induced fatigue may be responsible for a decrease in performance, its effects on postural control, as well as those of hydration, have been relatively little explored. This study evaluated the effects of fatigue, with and without rehydration, on postural control in 10 healthy subjects who regularly practice sports activities. All subjects were submitted to three types of ergocycle exercises: maximal oxygen uptake ( $Vo_{2max}$ ) and submaximal exercises in no-hydrated and hydrated conditions at a power corresponding to approximately 60% of the  $Vo_{2max}$  of each subject. Static posturographic tests were performed immediately before (control) and after exercises. The postural control performance decreased from the best to the worst: control, hydration, dehydration, and  $Vo_{2max}$ . Fast Fourier transformation of the center of foot pressure showed three patterns of amplitude spectral density, with an increase of spectral amplitude for dehydration, more important for  $Vo_{2max}$  conditions. Spectral amplitudes for control and hydration conditions were relatively similar. This hierarchy suggests that fatigue mainly alters muscular effectors and sensory inputs, such as proprioception, resulting in poor postural regulation. Moreover, fluid ingestion could be responsible for the preservation of muscular functions and of sensory afferences accurately regulating postural control.

**Keywords** balance, fatigue, hydration, postural control, posturography

Postural balance is a complex function requiring the central integration of information from multiple sensory afferents (visual, vestibular, and somatosensory), leading to the selection and execution of context-specific motor responses (Keshner, Allum, & Pfaltz, 1987). Under normal conditions (stable vision, fixed support), this information is redundant but complementary, with proprioceptive and visual inputs contributing more than vestibular ones (Fitzpatrick & McCloskey, 1994).

Postural instability can result from an alteration at any level of the equilibrium regulation (Nashner, Black, & Wall, 1982; Horak, Nashner, & Diener, 1990). This has been studied particularly in elderly people, who associate decreased sensitivity in sensors (Straube, Botzel, Hawken, Paulus, & Brandt, 1988; Perrin, Jeandel, Perrin, & Béné, 1997), less effective information treatment in central nervous system (Perrin et al., 1997; Lopez, Honrubia, & Baloh, 1997), and low-performance muscular capacities (Bemben, Massey, Bemben, Misner, & Boileau, 1991). It is also known that postural control can

**S.C.D. - U.H.P. NANCY 1**  
**BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES**  
Rue du Jardin Botanique - BP 11  
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

## Annexe 6:

### *Communications à des congrès scientifiques*

PhP. Perrin, G.C. Gauchard, A. Vouriot, L. Benamghar, M.L. Lepori, N. Chau, J.M. Mur.  
Sensorial organisation favouring higher visual contribution is a risk factor of falls in an  
occupational setting.  
XXIII<sup>th</sup> Meeting of the Barany Society,  
Paris, July 7<sup>th</sup>-9<sup>th</sup>, 2004.

PhP. Perrin, G.C. Gauchard, A. Vouriot, L. Benamghar, M.L. Lepori, N. Chau, J.M. Mur.  
Stratégies sensorielles et risque de chutes chez l'homme au travail.  
XXXIX<sup>th</sup> Symposium de la Société Internationale d'Otoneurologie,  
Bilbao, May 27<sup>th</sup>-28<sup>th</sup>, 2005.

Nom : **VOURIOT**

Prénom : Alexandre

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1  
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES  
Rue du Jardin Botanique - BP 11  
54601 VILLERS-LÈS-NANCY Cedex

**DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE NANCY I**  
**en Neurosciences.**

VU, APPROUVE ET PERMIS D'IMPRIMER N° 1062

Nancy, le 29 Août 2005

Le Président de l'Université



**UFR STAPS, UHP**

**NANCY** – 30, rue du Jardin Botanique – 54600 VILLERS-LÈS-NANCY

Tél : 33.(0)3.83.68.29.00 - Fax : 33.(0)3.83.68.29.02 - Mail :

@staps.uhp-nancy.fr

**ANTENNE DE LONGWY** – 186, rue de Lorraine – 54400 COSNES-ET-ROMAIN

Tél : 33.(0)3.82.39.62.15 - Fax : 33.(0)3.82.39.62.96 - Mail : stapslw@iut-longwy.uhp-nancy.fr

**ANTENNE D'ÉPINAL** – 2, avenue Pierre Blanck – 88000 ÉPINAL

Tél : 33.(0)3.29.29.61.60 - Fax : 33.(0)3.29.29.61.62 - Mail : Sylvie.Schumacher@staps.uhp-nancy.fr

### **Identification de facteurs posturaux individuels et environnementaux à l'origine de troubles de l'équilibre chez l'homme au travail.**

Les accidents de travail de type chute constituent un véritable problème de santé publique, mais certains de leurs mécanismes sont encore mal connus. Les facteurs de risque de chute sont typiquement classés en deux groupes : individuels (intrinsèques) et environnementaux (extrinsèques). Cette thèse a pour objectif d'identifier à quels niveaux de la régulation posturale les facteurs individuels et environnementaux provoquent des dysfonctionnements à l'origine de déséquilibres chez l'homme au travail. Ainsi, différents examens posturographiques ont permis d'évaluer l'organisation sensorielle et la qualité de régulation posturale d'agents hospitaliers chuteurs (monochuteurs et multichuteurs) et de salariés régulièrement exposés à des solvants.

Une organisation sensorielle favorisant l'ancrage visuel constitue un facteur de risque dans la survenue et la récurrence d'accidents du travail de type chute, par la réduction de la capacité du sujet à s'adapter à certains environnements sensoriels spécifiques et l'augmentation du délai de ses réponses neuromusculaires face à une perturbation externe. Un profil postural associé aux chutes a ainsi été identifié et pourrait aider à la détection de salariés potentiellement à risque.

Concernant les facteurs environnementaux, l'exposition à long terme aux solvants (en particulier aux hydrocarbures benzéniques) génère une dégradation de la qualité du contrôle postural, notamment en situation de conflits sensoriels. Les salariés exposés ont également rapporté un état de vigilance réduit sans pour autant que la qualité de leur sommeil soit affectée, suggérant ainsi des atteintes des structures corticales et sous-corticales régulant la vigilance et l'équilibre. Le développement d'outils d'investigation simples et reproductibles, à partir d'indicateurs prédictifs, pourrait permettre la mise en évidence d'atteintes précoces, non seulement par les solvants, mais aussi par d'autres agents neurotoxiques.

La connaissance des facteurs intrinsèques et extrinsèques dans les mécanismes de chute pourrait diminuer le risque d'accidents en adaptant la tâche et l'environnement du travailleur, ainsi qu'en optimisant ses capacités à maintenir l'équilibre de manière appropriée.

### **Identification of postural intrinsic and extrinsic factors responsible for impaired balance among workers.**

Work-related falls represent a major public-health problem but some of their mechanisms are still unknown. Risk factors associated with work-related falls can be typically categorized into two groups: individual (intrinsic) and environmental (extrinsic). The aim of this study was to identify at which level of the postural regulation, individual and environmental factors may cause dysfunction generating imbalance among workers. Then, different posturographic recordings were used to investigate sensorial organisation and quality of postural regulation in hospital personnel who fell (single-fallers and multi-fallers) and in workers occupationally exposed to solvents.

Sensorial organisation favouring higher visual contribution is a risk factor of falls in an occupational setting by reducing workers' ability to adapt their posture in specific sensorial environments and by increasing latencies of their neuromuscular responses to unexpected perturbation. Thus, postural profile associated with work-related falls has been shown and could be useful in detection of workers at risk.

Concerning extrinsic factors, long-term solvent exposure (mainly to aromatic hydrocarbons) is responsible for a poor quality of static balance control and a diminished ability to efficiently adjust postural performance in sensory conflict situations. Moreover, exposed workers reported reduced vigilance without impaired quality of sleep, suggesting dysfunctions in cortical and subcortical structures controlling vigilance and postural stability. The development of simple and reproducible tools could be useful to appreciate fine preclinical central effects of solvents and of others neurotoxic agents exposure.

Knowledge of both extrinsic and intrinsic factors in fall mechanisms could prevent the risk of occupational accidents by adapting work and its environment to the worker and by optimising the individual's abilities to maintain appropriate equilibrium.