
7

Effets de l'âge sur les mécanismes de l'équilibre

La chute se caractérise par une perturbation de la position verticale du corps au-delà des limites de stabilité qui conduit à une perte d'équilibre. Or, la position verticale est intrinsèquement instable et son maintien constitue un défi continuels lors des activités quotidiennes. Ainsi, le maintien de la posture et de l'équilibre, qu'il soit statique ou dynamique, nécessite un système de contrôle complexe capable d'interpréter plusieurs entrées sensorielles et de s'adapter aux changements d'états internes et externes.

Effets du vieillissement sur les systèmes sensoriels, la biomécanique et les capacités cognitives

Le maintien de l'équilibre repose sur la coopération entre d'une part les systèmes sensoriels capables de détecter les positions et déplacements du corps ainsi que l'environnement visuel, et d'autre part les effecteurs qui fournissent les réactions posturo-cinétiques appropriées.

Les informations sensorielles participant à la stabilité posturale, reposent sur des informations visuelles, vestibulaires et somesthésiques. Le tableau 7.1 précise les spécificités fonctionnelles de chacune de ces modalités sensorielles. Chaque entrée sensorielle possède son domaine d'action particulier. Ainsi, les modalités visuelles et proprioceptives offrent un seuil de stimulation suffisamment bas pour autoriser la perception des mouvements lents et des oscillations en position debout. À l'inverse, l'anatomo-physiologie du système vestibulaire lui confère une prédominance dans la détection des mouvements rapides. Ces modalités sensorielles sont complémentaires et offrent également des plages de fonctionnement qui se recouvrent partiellement. La redondance informationnelle qui résulte de leur couplage, permet de lever les ambiguïtés inhérentes à chacune des modalités sensorielles prises isolément et d'améliorer la perception et le codage des déplacements. Les informations sensorielles se combinent et sont intégrées dans différentes structures du système nerveux central : le tronc cérébral, le cervelet et les structures corticales. Les informations sensorielles traitées dans les centres moteurs sont transmises au système musculo-squelettique qui

est l'effecteur de l'équilibre et qui permet de réagir aux perturbations posturales. Dans les conditions posturales les plus difficiles ou en cas d'atteintes sensori-motrices, les réponses posturales perdent leur caractère fondamentalement automatique et mettent en jeu des fonctions cognitives (figure 7.1).

Le vieillissement s'accompagne de nombreux changements physiologiques des différents systèmes sensoriels. Les principaux changements affectant le système vestibulaire ont pour effet une perturbation des influences vestibulo-spinales responsables de l'activation des muscles antigravitaires et une altération des capacités d'équilibration statique et cinétique (Curthoys, 2000 ; Borel et coll., 2008 ; Lacour et coll., 2009 ; Snow et coll., 2009). Les modifications du système visuel consistent en une diminution de la sensibilité aux contrastes, une perturbation de la perception de la profondeur – particulièrement importante afin de mieux négocier les obstacles – et une détérioration de l'acuité visuelle dynamique lors du mouvement de la cible ou du sujet (Menant et coll., 2010). La somesthésie constitue un repère important pour l'équilibre. Avec l'âge, l'information tactile en provenance des pieds et de leur contact avec le sol peut se détériorer. De la même façon, la capacité à détecter la position et la direction des mouvements des articulations diminue (Proske et Gandevia, 2012).

Tableau 7.1 : Contributions sensorielles et motrices au maintien de l'équilibre

Systèmes sensoriels	Capteurs	Participation au maintien de l'équilibre	Altération
Visuel	Rétine	Acuité visuelle	↓
	Muscles oculomoteurs	Sensibilité aux contrastes	↓
		Perception de la profondeur	↓
		Perception des objets dans l'environnement	↓
		Perception du mouvement dans l'environnement	↓
Vestibulaire	Oreille interne	Orientation de la tête	Oui
		Perception du mouvement de la tête	↓
		Stabilisation de la tête et du corps	↓
		Stabilisation des images sur la rétine	↓
Somesthésique (proprioception et toucher)	Muscles	Orientation des segments corporels entre eux	Oui
	Tendons	Perception de la position des articulations	↓
	Articulations	Perception du mouvement du corps	↓
	Peau	Perception du contact avec le sol	↓
		Sensibilité tactile	↓
Systèmes effecteurs	Effecteurs	Participation au maintien de l'équilibre	
Système musculo-squelettique	Commandes motrices	Temps de réaction	↑
		Force musculaire	↓
	Muscles	Vitesse de contraction des muscles	↓
		Os	Synergies musculaires (activation d'un groupe de muscles)
		Densité osseuse (conséquences sur la gravité des chutes)	↓
	Résistance mécanique	↓	

↓ : Diminué ; ↑ : Augmenté

Sur le système moteur, l'effet le plus notoire de l'âge concerne des changements de caractéristiques des muscles : réduction de la force musculaire liée à la diminution du nombre et de la taille des fibres musculaires et aux changements des commandes motrices centrales (Faulkner et coll., 2007 ; Paillard, 2009). Le temps de réaction augmente et la vitesse de contraction des muscles diminue. Tout ceci peut empêcher les sujets âgés d'exercer la force adéquate et de réagir rapidement aux perturbations posturales (Barin et Dodson, 2011).

L'équilibre et le contrôle postural sont normalement des tâches relativement simples assurées par des réflexes sensori-moteurs et des boucles de contrôle automatiques (Massion, 1994 ; Kolb et coll., 2001). Chez l'adulte en bonne santé, le maintien de l'équilibre ne nécessite que peu de ressources attentionnelles (Teasdale et coll., 1993). Cependant, la mobilisation de ressources attentionnelles peut devenir nécessaire dans des situations environnementales où les informations visuelles, vestibulaires ou proprioceptives sont modifiées, ou lorsque le maintien de l'équilibre s'opère dans des conditions d'équilibration dynamique (Lajoie et coll., 1993). Leur participation est plus importante et continue au cours du vieillissement ou après atteinte sensorielle. Il s'agit probablement d'un comportement adaptatif pour compenser le déclin des fonctions sensori-motrices. Une supervision du contrôle postural deviendrait alors nécessaire. Ceci a été illustré par l'incapacité à parler et marcher en même temps chez certaines personnes et par l'utilité de ce signe comme valeur prédictive de chutes chez le sujet âgé (Lundin-Olsson et coll., 1997). Dans les situations de double-tâche comme celle-ci, les ressources attentionnelles doivent être partagées pour une réalisation correcte des tâches posturales et cognitives. Autrement dit, l'implication cognitive dans le contrôle postural augmente avec l'âge (Li et coll., 2002).

Ainsi, les conséquences du vieillissement sur le maintien de l'équilibre ne résultent pas uniquement de l'altération des fonctions sensorielles et motrices, mais le vieillissement cognitif constitue également un facteur important. Au cours du vieillissement, les fonctions exécutives impliquées dans le maintien de l'équilibre sont perturbées (Alescio-Lautier et coll., 2007 ; Park et Reuter-Lorenz, 2009 ; Salthouse, 2012). Plus spécifiquement, les dysfonctions portent sur les processus attentionnels inhibiteurs (c'est-à-dire qu'il n'y a plus de tri sélectif des informations), la flexibilité (capacité à déplacer rapidement son attention entre deux tâches) et la gestion des double-tâches (capacités à coordonner simultanément deux tâches). Il a été montré qu'une perturbation des fonctions exécutives contribue particulièrement aux changements posturo-locomoteurs, mais les mécanismes d'action sont encore mal connus (Allali et coll., 2008).

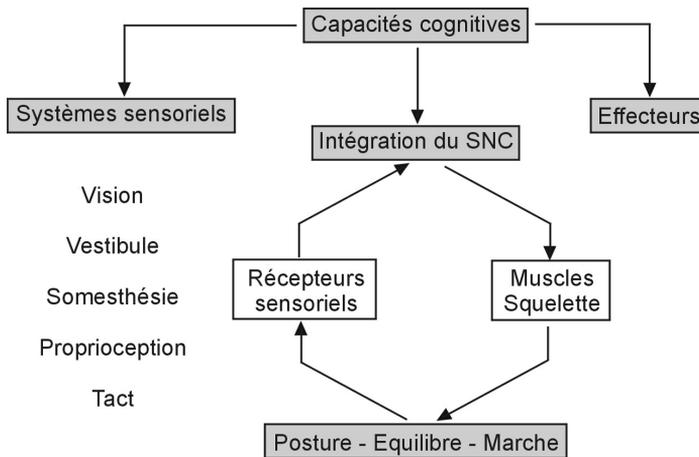


Figure 7.1 : Contrôle postural chez l'Homme

Conséquences du vieillissement sur les risques de chute

En règle générale, la posture, l'équilibre et la marche ont été comparés chez des adultes jeunes (25 ans), d'âge moyen (50 ans) ou âgés non-chuteurs (avec des capacités physiologiques optimales) et chuteurs (ayant chuté une ou plusieurs fois dans les mois précédents) (70 ans), dans différentes conditions de tests statiques ou dynamiques.

Effets sur l'orientation posturale

Les changements de l'attitude posturale (orientation du corps par rapport à la verticale gravitaire) ont été identifiés comme l'un des principaux facteurs contribuant aux chutes chez les personnes âgées (Tinetti, 2003 ; Snow et coll., 2009). Avec l'avancée en âge, la perception de la verticale posturale devient de moins en moins précise, notamment chez les sujets très âgés qui présentent une grande incertitude dans la détermination de la position de leur corps par rapport à la verticale. Une verticale posturale inclinée vers l'arrière a été avancée comme une raison expliquant la rétropropulsion souvent observée chez les personnes âgées qui ont chuté. Ces changements posturaux pourraient être liés à une représentation de la verticalité moins robuste (Barbieri et coll., 2010). Les personnes âgées qui montrent des scores plus faibles sur les mesures cliniques de l'équilibre, présentent également des oscillations posturales et des réponses musculaires plus importantes que les personnes âgées ayant des capacités physiologiques optimales. Certains travaux suggèrent que

des niveaux élevés de l'activité musculaire sont une caractéristique du déclin lié à l'âge dans la stabilité posturale. Il est difficile de savoir si l'augmentation de l'activité musculaire entraîne une plus grande instabilité posturale ou si l'activité musculaire accrue est une réponse compensatoire à l'augmentation des oscillations posturales (Laughton et coll., 2003).

Effets sur l'équilibre

D'une manière générale, les données de la littérature indiquent qu'en dépit d'une altération possible (mais non renseignée) des systèmes sensoriels ou des systèmes effecteurs, le maintien de l'équilibre n'est pas nécessairement modifié chez le sujet âgé robuste. Ainsi, chez les sujets non-chuteurs, les performances posturales ne se distinguent généralement pas de celles de sujets jeunes ou d'âge moyen (Bernard-Demanze et coll., 2009), y compris les réponses posturales consécutives à des déplacements soudains qui montrent des changements minimes avec l'âge (Peterka et Black, 1990). Cependant, les oscillations du corps deviennent plus importantes lorsque toutes les modalités sensorielles participant normalement au contrôle de la posture, ne sont pas disponibles, par exemple à l'obscurité. D'une manière générale, la littérature indique que, chez les sujets qui ont chuté une fois ou plus dans l'année, certains changements physiologiques liés à l'âge contribuent à une perturbation du contrôle de la posture et de l'équilibre. Les symptômes d'instabilité et les déficits du maintien de l'équilibre peuvent également être aggravés par les pathologies liées au vieillissement.

Les performances posturales sont généralement étudiées chez le sujet âgé en examinant les caractéristiques du maintien de l'équilibre en situation debout, sans mouvement (Maylor et Wing, 1996 ; Teasdale et Simoneau, 2001 ; Woollacott et Shumway-Cook, 2002). Toutefois, les performances dans cette situation ne pourraient présager celles après perturbations posturales soudaines (Mackey et Robinovitch, 2006). Après une perturbation soudaine de l'équilibre, le système nerveux central doit planifier les corrections posturales nécessaires au maintien de la stabilité dynamique. Comparés aux adultes jeunes, les adultes âgés ont plus de difficultés à retrouver leur équilibre (Thelen et coll., 2000). Ces changements de corrections posturales peuvent être liés à la réduction de la force musculaire (Grabiner et coll., 2005), de la raideur des tendons (Karamanidis et Arampatzis, 2007), ainsi qu'au ralentissement de la vitesse de contraction musculaire (Hortobagyi et coll., 1995). La diminution de la force musculaire constitue un facteur de risque de chute. Cependant, une étude longitudinale réalisée sur près de 9 ans ($71,1 \pm 5,4$ ans ; $n=12$) a montré qu'en dépit d'un changement global de taille et de force musculaire, les propriétés contractiles des fibres musculaires ($n=411$ fibres) sont préservées avec l'âge (Frontera et coll., 2008). Ces données suggèrent que les fibres musculaires existantes peuvent compenser et corriger partiellement les

déficits de masse musculaire afin de maintenir une capacité optimale de production de force, même à un âge très avancé ($80 \pm 5,3$ ans à la fin de l'étude). Elles indiquent la nécessité d'utiliser des exercices de contrôle dynamique de l'équilibre dans le cadre de stratégies de prévention des chutes ou de la rééducation (Arampatzis et coll., 2008).

Effets sur la marche

Les caractéristiques de la marche varient avec l'âge. Elles ont été analysées dans de nombreuses études. D'une manière générale, les personnes âgées marchent plus lentement que les jeunes (Bohannon, 1997). La réduction de la vitesse de marche résulte à la fois de la diminution de la longueur du pas (Lord et coll., 1996) et de l'augmentation du temps de double appui (Ferrandez et coll., 1990), tandis que la fréquence du pas augmente. La réduction de l'accélération de la tête et du bassin procure une indication supplémentaire de la stabilité lors de la marche (Menz et coll., 2003). Chez les personnes âgées ayant des capacités physiologiques optimales, l'adoption d'une vitesse réduite et d'un pas plus court a été interprétée comme l'expression d'une marche moins déstabilisante (Woollacott et Tang, 1997). Ceci suggère que les personnes âgées compensent la réduction de leurs capacités physiques en étant plus prudentes et en diminuant le coût énergétique du mouvement (Barak et coll., 2006 ; Schrack et coll., 2010). L'allongement de la durée de la phase préparatoire au mouvement et de la phase de transfert du pas s'inscrit également dans les modifications qui minimisent la perturbation posturale créée par le mouvement (Michel-Pellegrino et coll., 2008). Des interprétations contradictoires sont fournies par d'autres études qui indiquent que les changements des paramètres de marche peuvent être considérés comme des facteurs de risque de chute (Gunter et coll., 2000 et voir chapitre 2). Chez les sujets ayant chuté l'année qui précède, l'augmentation du temps nécessaire aux ajustements posturaux anticipés pourrait être un facteur de risque dans le cas d'une négociation d'obstacle et prendre son origine dans la réduction de la capacité du traitement central nécessaire à la planification motrice et à la régulation du pas (Uemura et coll., 2011).

La variabilité du pas (fluctuation des caractéristiques d'un pas à l'autre) a été décrite comme un facteur fondamental prédictif de la chute, aussi bien lors de la marche sur sol plat que de la descente d'un escalier. Par exemple, lors de la marche, les personnes âgées montrent une plus grande variabilité dans le placement des pieds, la longueur et la largeur du pas, et l'élévation du pied que les jeunes adultes (Barrett et coll., 2010 ; Zietz et coll., 2011 ; Laroche et coll., 2012). De nombreux facteurs peuvent être responsables de cette variabilité parmi lesquels la faiblesse des fléchisseurs dorsaux de la cheville et des fléchisseurs plantaires ; cette faiblesse pourrait nuire à la stabilité dans la phase d'appui du pas et potentiellement contribuer aux chutes (Laroche

et coll., 2010). Sur le plan clinique, ce résultat montre l'importance des programmes de réadaptation qui mettent l'accent sur le renforcement des muscles fléchisseurs plantaires visant à rétablir la fonction et la stabilité de la marche (Kirkwood et coll., 2011).

Par ailleurs, lors de la marche, les instabilités médio-latérales sont accrues chez la personne âgée. La chute liée à une instabilité latérale importante peut conduire à des fractures de hanches (Maki et McLlroy, 2006). Le maintien de l'équilibre s'effectue alors par un pas rapide de rattrapage. La vitesse du pas repose sur la vitesse de flexion des articulations de la hanche, du genou et de la cheville (Madigan et Lloyd, 2005). Afin de réaliser un pas de rattrapage, les forces de propulsion doivent être générées rapidement et atteindre un niveau important, particulièrement pendant la préparation du pas. Si ces caractéristiques ne sont pas remplies, il devient impossible de recruter les muscles suffisamment rapidement (Menz et coll., 2003 ; Mackey et Robinovitch, 2006). Un entraînement incluant la réalisation de pas de rattrapage peut s'avérer bénéfique dans la prévention des chutes.

Les études longitudinales citées plus haut ainsi que de nombreuses autres ont montré que, parmi tous les marqueurs possibles de changements de mobilité, la vitesse de marche représente un marqueur fiable, elle tend à diminuer avec l'âge et à la suite de maladies chroniques. Sur la base de ces résultats, il a été postulé que la réduction de la vitesse de marche est un baromètre de l'effet du vieillissement biologique sur la santé et de l'état fonctionnel. Identifier les mécanismes qui sous-tendent ces changements et préciser la valeur pronostique de la vitesse de marche seront un défi à relever dans les études à venir (Schrack et coll., 2010).

Ces perturbations du contrôle de la posture et de l'équilibre peuvent être aggravées par des maladies fréquemment observées dans le vieillissement, comme la maladie de Parkinson, la neuropathie périphérique, l'arthrite, la sarcopénie, ou les atteintes sensorielles telles que le vertige paroxystique bénin, la cataracte ou la perte du sens de la position. Il est fréquent qu'une ou plusieurs pathologies soient responsables des symptômes d'instabilité de la personne âgée (Barin et Dodson, 2011). D'une manière générale, ces pathologies augmentent l'instabilité, l'amplitude des ajustements posturaux et la variabilité du pas. La présence de multiples facteurs de risque accroît le risque de chute (Tinetti, 2003).

En recherche comme en pratique clinique, les perturbations posturales sont généralement appréhendées comme étant liées au vieillissement dans son ensemble. Comme évoqués précédemment, les troubles de l'équilibre des sujets âgés sont plurifactoriels. Ainsi, le concept de sujets chuteurs peut recouvrir des perturbations d'origine sensorielle, motrice, ou centrale très différentes. Une approche plus analytique chez le sujet âgé, telle qu'elle est réalisée chez l'adulte jeune serait profitable. En particulier, des études supplémentaires sont

nécessaires afin d'examiner l'association des changements liés à l'âge dans les différents systèmes sensoriels avec les symptômes d'instabilité et de déséquilibre chez la personne âgée.

Apport de la double-tâche

Dans la vie de tous les jours, le maintien de l'équilibre s'effectue bien souvent en parallèle d'une seconde tâche dite cognitive, comme marcher en conversant ou en écoutant de la musique. Une situation de double-tâche posturale et cognitive peut nécessiter un partage des ressources attentionnelles. Les sujets âgés ont moins de capacité que les jeunes à diviser leur attention entre deux ou plusieurs tâches. Une tâche cognitive complexe peut affecter le contrôle postural et conduire à une augmentation du risque de chute (Shumway-Cook et coll., 1997). Inversement, la difficulté de la tâche posturale peut altérer la performance cognitive. Une telle interaction n'a pas été retrouvée chez le sujet jeune qui régule automatiquement sa posture en consacrant ses ressources attentionnelles à la tâche cognitive. En revanche, le sujet âgé donne généralement la priorité à la tâche posturale, c'est-à-dire à des stratégies d'évitement de la chute (Lacour et coll., 2008 ; Bernard-Demanze et coll., 2009). En condition de double-tâche, les sujets âgés présentent une réduction de la vitesse de marche, une augmentation de la variabilité du pas (Priest et coll., 2008) et des oscillations médio-latérales du tronc (van Iersel et coll., 2008). De même, il a été montré que la demande attentionnelle nécessaire à la réalisation d'une double-tâche lors du maintien de l'équilibre dynamique est plus importante chez les personnes âgées présentant un déficit de l'équilibre que chez les personnes âgées en bonne santé (Brauer et coll., 2001). Il est probable que les processus cognitifs interfèrent avec le traitement de l'information nécessaire à la réalisation de la tâche posturale. Cette interférence pourrait avoir lieu au niveau de l'intégration sensorielle des différentes informations participant à l'orientation spatiale (Redfern et coll., 2004).

La réalisation de double-tâche est à l'origine du développement d'une série de tests cliniques prédictifs de la chute. Chez le sujet âgé, certaines altérations de la posture ne peuvent être révélées que dans des conditions de double-tâche qui nécessite un partage des ressources attentionnelles normalement dévolues au contrôle de la posture. Ainsi, les double-tâches permettent de distinguer les chuteurs (au moins une chute l'année précédente) des non-chuteurs. Ceci a été mis en évidence dans une double-tâche cognitivo-motrice (compter à rebours en marchant ; Uemura et coll., 2012). Lors de l'initiation de la marche, les déplacements du centre de pression vers l'arrière des chuteurs étaient plus faibles que ceux des non-chuteurs ($p=0,009$; $n=71$; $80,5\pm 7,6$ ans). De même, dans une double-tâche motrice (marcher avec un verre d'eau dans la main), les chuteurs ($n=21$, âgés de $70,4\pm 6,4$ ans) présentent une cadence plus lente ($p=0,02$) et une vitesse de marche plus lente ($p=0,034$) que les non-chuteurs

(n=19, âgés de 67±4,8 ans) (Toulotte et coll., 2006). Par ailleurs, en situation de double-tâche, les sujets à risque de chute vont présenter de mauvais jugements de mobilité qui conduisent à une prise de risque. Ceci a été montré chez des sujets placés dans une situation de simulation de traversée de rue dans un environnement visuel virtuel et marchant sur un tapis roulant alors qu'ils écoutent de la musique ou parlent au téléphone (Nagamatsu et coll., 2011). Les double-tâches offrent la possibilité d'augmenter la sensibilité et la spécificité de la prédiction de la chute (voir Lundin-Olsson et coll., 1997) et d'envisager des traitements rééducatifs centrés sur les stratégies de contrôle des double-tâches (Beauchet et Berrut, 2006). Des recherches futures devront préciser la physiopathologie de ces interrelations entre posture et cognition.

Il est intéressant de noter que dans les pathologies cognitives, le fonctionnement sensori-moteur et la marche sont perturbés (marche plus lente et plus variable) (Taylor et coll., 2013). L'altération des fonctions exécutives joue un rôle crucial dans les troubles de la marche et plus particulièrement dans les situations de double-tâche. Les patients atteints de la maladie d'Alzheimer et souffrant de dysfonctions exécutives présentent une augmentation de la variabilité du pas, aussi bien lors de tâches simples de marche que lors de double-tâche (Sheridan et coll., 2003 ; Allali et coll., 2008). Récemment, il a été montré que l'utilisation d'une double-tâche inspirée d'une situation de la vie quotidienne, le « *Stroop Walking Task* » similaire à la traversée de rue avec feu piéton dans laquelle le sujet doit réagir à un pictogramme visuel par une réponse motrice (marche ou arrêt), permet une détection précoce d'une atteinte des fonctions exécutives avec une sensibilité de 89 % et une spécificité de 94 % (Perrochon et coll., 2013).

Anxiété posturale

Les facteurs psychologiques ne sont pas considérés comme une cause primaire d'instabilité mais sont des éléments contributifs fréquents de l'instabilité chez le sujet âgé. Les plus communs sont l'anxiété et la dépression (Eckhardt-Henn et coll., 2003). La peur de tomber diminue la confiance dans les capacités réelles d'équilibration, augmente l'anxiété et diminue la stabilité (Adkin et coll., 2002). La performance posturale et la stratégie d'équilibration ne dépendent donc pas seulement de la difficulté réelle de la tâche mais de la difficulté perçue par le sujet.

La plupart des études portant sur les changements posturaux en relation avec la peur de tomber ont été réalisées en modifiant le niveau de « menace posturale ». Chez des sujets jeunes, pour une même tâche posturale réalisée au sol et en hauteur, la peur de tomber induite par une élévation de la plateforme provoque des changements dans les exigences du contrôle postural (Adkin et coll., 2000 ; Carpenter et coll., 2004 ; Huffmann et coll., 2009). Ces derniers auteurs montrent que la menace posturale évoquée par une plateforme

rotatoire surélevée et animée de mouvements imprévisibles augmente l'amplitude des réponses de correction de l'équilibre dans les muscles des jambes, du tronc et des bras, et réduit l'amplitude des déplacements du centre de masse. Ces changements seraient le reflet d'une modification des mécanismes de contrôle neuromusculaire. Des liens étroits entre l'anxiété liée à la peur de tomber et la performance de l'équilibre ont également été décrits chez les sujets âgés. Afin d'éviter une situation potentiellement dangereuse, les sujets âgés placés en situation posturale difficile vont également adopter une posture plus rigide en stabilisant la tête sur les hanches, les genoux et les pieds. La peur de tomber se traduit aussi par une réduction de la surface du centre de pression, une diminution des limites de stabilité lors de mouvements volontaires, un ralentissement de la marche et des réajustements posturaux excessifs (Lindenberger et coll., 2000 ; Li et coll., 2001). Toutefois, l'énergie dépensée est plus importante chez le sujet âgé que chez le sujet jeune testé dans les mêmes conditions (Carpenter et coll., 2006 ; Delbaere et coll., 2009). Ces données soulignent que l'anxiété liée à la peur de tomber joue un rôle dans la supervision du contrôle postural, en particulier pour les sujets âgés lorsqu'ils sont placés dans des conditions d'équilibre difficile (Young et coll., 2012).

En résumé, il apparaît que la capacité à maintenir une position debout ne dépend pas seulement de la difficulté inhérente à la tâche mais aussi des conséquences attendues d'une perte d'équilibre. Les recherches futures devraient examiner, chez le jeune, la façon dont le contrôle postural est influencé par des niveaux élevés d'anxiété, ce qui permettrait de préciser comment, dans le cas de pathologies liées à l'âge, les changements posturaux peuvent influencer sur l'équilibre. En outre, des traitements rééducatifs d'ensemble devraient cibler les déterminants physiologiques et psychologiques de l'équilibre et de la mobilité.

Mécanismes mis en place pour retrouver l'équilibre : stratégies individuelles

Si le maintien de l'équilibre semble relever d'un processus uniforme mettant en jeu les mêmes systèmes sensoriels et les mêmes effecteurs chez tous les individus, l'examen détaillé de la participation des différentes modalités sensorielles et des différents groupes musculaires à la régulation posturale montre que le maintien de l'équilibre doit, au contraire, être envisagé comme un phénomène susceptible de varier en fonction des individus et du contexte (lumière *versus* obscurité, sujet statique *versus* en mouvement...). Le contrôle de l'équilibre s'élabore sur la base d'un ensemble de stratégies sensorielles (implication variable des entrées sensorielles dans un contexte donné) et de stratégies motrices (variabilité des articulations et groupes musculaires impliqués dans la réponse posturale).

Stratégies impliquées dans le contrôle de l'équilibre

Stratégies sensorielles

Afin de déterminer de manière optimale la stabilisation posturale et l'orientation du corps, des mécanismes centraux assignent des pondérations aux différentes informations sensorielles (vestibulaires, visuelles et proprioceptives). Chaque personne s'appuie de manière différente sur les informations sensorielles disponibles. De même, en cas de changements dans la disponibilité des capteurs, la nouvelle pondération sensorielle est spécifique à chacun. Ces changements peuvent être transitoires et dépendre du contexte (lumière ou obscurité, condition statique ou dynamique...) ou plus durables et liés à une altération sensorielle. Les modèles d'intégration multi-sensorielle sont largement fondés sur l'idée d'une attribution d'un poids variable aux entrées visuelles, vestibulaires et proprioceptives au moyen d'un modèle interne pour arriver à un estimateur optimal. Dans ces modèles, le cerveau prédit en permanence les retours sensoriels et adapte le contrôle en fonction du mouvement de l'environnement et des informations sensorielles disponibles (Young, 2011).

Ainsi, chez l'adulte jeune ou d'âge moyen, les investigations suggérant une intervention majeure de la modalité sensorielle visuelle dans le contrôle de la posture statique montrent de très grandes différences interindividuelles. L'analyse comparée des oscillations posturales à la lumière et à l'obscurité témoigne du poids différent de la vision dans le maintien du contrôle postural statique. Certains sujets présentent des oscillations posturales accrues à l'obscurité, alors que pour d'autres, les oscillations sont moindres à l'obscurité (Lacour et coll., 1997). Ces différences pourraient refléter des stratégies sensorielles individuelles sélectionnées au cours de l'ontogenèse ou préférentiellement utilisées en fonction de l'expérience du sujet (Borel et coll., 2008), ou encore, résulter d'adaptations mises en place au cours de l'âge. Il est probable que ces pondérations changent avec l'âge : de nombreuses études décrivent une dépendance accrue aux informations visuelles dans le maintien de l'équilibre (Eikema et coll., 2012). Ceci est particulièrement adapté lorsque les indices proprioceptifs (comme l'appui sur une surface souple) ne sont plus aussi fiables. Cependant, une dépendance visuelle exacerbée peut contribuer aux chutes en situation de conflits sensoriels (par exemple dans des tests mimant l'illusion de déplacement ressentie dans un véhicule à l'arrêt lors du démarrage d'un véhicule voisin) ou en présence d'environnements visuels mouvants (tests analogues au mouvement d'une foule ou au défilement de l'environnement visuel lors de la conduite automobile) (Guerraz et coll., 2001). De plus, il est bien connu que le système vestibulaire se détériore chez les personnes âgées. Or, les afférences vestibulaires et proprioceptives cervicales sont traitées conjointement dans le système nerveux central (Horak et coll., 2001). Ainsi, les personnes âgées sont plus dépendantes de la proprioception cervicale pour maintenir leur coordination posturale que les jeunes adultes (Patel et coll., 2010).

Stratégies motrices

Les stratégies de mouvement utilisées pour le maintien du contrôle postural sont également variables et dépendantes du contexte, de l'environnement et des expériences passées. La stratégie motrice mise en jeu pour maintenir l'équilibre est sélectionnée parmi un ensemble de solutions multiples offertes par la redondance du système musculo-squelettique. Les synergies musculaires seraient basées sur une combinaison d'activations musculaires automatiques (Massion, 1994 ; Torres-Oviedo et Ting, 2010). Ces auteurs ont montré que le contrôle de l'équilibre est réalisé en activant les muscles qui sont contraints par un ensemble de synergies musculaires, spécifiques de la tâche, et utilisés selon les besoins. Par conséquent, les stratégies d'activation des muscles montrent aussi une dépendance en fonction du contexte.

Fondamentalement, la stabilité du corps humain peut être comparée à celle d'un pendule inversé. Afin de maintenir l'orientation verticale du corps par rapport à la gravité et à la surface du support, le système de commande doit maintenir en permanence un contrôle actif du tonus musculaire. Lorsque le centre de gravité s'écarte de la position verticale, les couples de forces induits ont pour effet de déstabiliser davantage le corps. Il en résulte des oscillations continues (Maurer et Peterka, 2005). Le système nerveux central équilibre activement la tête, le tronc et les jambes avec des corrections fondées sur des rétroactions sensorielles (O'Connor et Kuo, 2009).

Plusieurs stratégies correctives peuvent être choisies afin de maintenir la position debout. L'une d'entre elles, appelée « stratégie de cheville », régule l'équilibre en utilisant un point de pivot autour de la cheville. Elle est appropriée pour corriger les faibles oscillations du corps sur sol ferme. Une autre stratégie, nommée « stratégie de hanche », utilise deux points de pivots, au niveau de la hanche et de la cheville. Elle autorise des mouvements rapides du corps, souvent pour des perturbations plus importantes (Park et coll., 2004). Le « pas de rattrapage » est également une stratégie fréquemment utilisée après une perturbation, en cas de perte d'équilibre. Elle modifie la base de support quand des contraintes additionnelles sont imposées aux articulations. Pour réaliser un pas de rattrapage, les forces de propulsion doivent être générées rapidement et atteindre un niveau important, particulièrement pendant la préparation du pas. Si ces caractéristiques ne sont pas remplies, il devient impossible de recruter les muscles suffisamment rapidement (Menz et coll., 2003). L'entraînement de la force et la rééducation de l'équilibre sont considérés comme une partie intégrante de nombreuses stratégies de prévention des chutes, comme cela sera décrit en détail dans la section suivante. Avec l'âge, les stratégies de coordination mises en place pour maintenir l'équilibre diffèrent de celles observées chez le sujet jeune. Ainsi, le sujet âgé utilise plus fréquemment la stratégie de hanche pour réguler sa posture dans des situations où le sujet jeune utilise préférentiellement la stratégie de cheville. La rigidification des segments corporels les uns par rapport aux autres est également

plus fréquente. La rigidification de la tête sur le tronc a pour effet de réduire les oscillations de la tête et ainsi de minimiser les instabilités qui peuvent résulter des mouvements de la tête. Des stratégies visant à réduire les mouvements de la tête sur le tronc ont été décrites chez des patients atteints de pathologie vestibulaire (Young et coll., 2012) et dans la maladie de Parkinson (Mesure et coll., 1999). Une augmentation de l'activation des muscles antagonistes a également été mise en évidence lors de la marche chez les adultes âgés. D'un point de vue fonctionnel, la coactivation accrue n'empêche pas la locomotion, mais elle est un changement nécessaire lié au vieillissement normal (Hortobagyi et coll., 2009). L'ensemble de ces observations ont des implications importantes quant à la mise en œuvre d'exercices de rééducation pour récupérer et compenser des troubles de l'équilibre.

Différents types d'interventions pour retrouver l'équilibre

Sur la base des mécanismes physiologiques et biomécaniques décrits ci-dessus, différents types d'intervention sont donc possibles afin de compenser (corriger) les instabilités posturales. La plupart concernent l'exercice physique, d'autres l'utilisation de dispositifs particuliers (tableau 7.II).

Différents types d'exercice physique

Le travail de l'équilibre est préconisé dans le cas d'altérations sensori-motrices. Le travail de l'équilibre fait partie des programmes de rééducation dits « vestibulaires ». Il répond à trois objectifs : accroître l'activation des capteurs vestibulaires, activer les mécanismes d'intégration dans le système nerveux central en stimulant différentes entrées sensorielles, et entraîner les systèmes effecteurs neuromusculaires à répondre à une variété de positions et de mouvements (Ledin et coll., 1991 ; Kannus, 2005). Dans ce cadre, l'introduction de perturbations imprévisibles, qui n'autorisent pas l'anticipation par les commandes centrales, s'est révélée particulièrement efficace (Shapiro et Melzer, 2010). Les études rapportées plus haut ont montré que ce type d'entraînement particulièrement développé au Canada et aux États-Unis, réduit le risque de chute de 15 à 50 %. Néanmoins, des études supplémentaires sont nécessaires sur la façon dont les déficiences sensorielles peuvent être surmontées en vue de promouvoir la stabilité posturale.

Les exercices musculaires de résistance et d'endurance augmentent la masse musculaire et améliorent les capacités fonctionnelles des muscles chez le sujet âgé (Snijders et coll., 2009). Ils contribuent à une bonne performance de l'équilibre (pour revue : Orr, 2010). Il convient de noter que si la pratique régulière d'une activité physique intense peut permettre de conserver la masse musculaire grâce à une hypertrophie des fibres, elle est incapable de renverser la perte du nombre de fibres résultant de processus neuropathiques (Proske

et Gandevia, 2012). S'il semble clair que l'exercice est efficace pour réduire la perte de masse musculaire, il augmenterait les dommages mécaniques et le stress oxydatif. Il est donc opportun de sélectionner un protocole d'exercices progressifs. De nombreuses questions demeurent quant à la relation entre le vieillissement, l'exercice et les mécanismes impliqués (Fulle et coll., 2004).

L'analyse comparée de l'entraînement de l'équilibre et de la force indique une plus grande efficacité de l'entraînement de l'équilibre (Tinetti et coll., 1994). Cependant, Gillespie et coll. (2009), dans une revue systématique de la littérature, indiquent qu'une combinaison d'entraînement de l'équilibre et de la force a l'effet le plus important sur le risque de chute et le taux de chutes, suivie d'un entraînement combiné de la flexibilité et de l'endurance (Karinkanta et coll., 2010). Il est important de noter que les programmes d'entraînement personnalisés se révèlent les plus efficaces (Gillespie et coll., 2003 ; Neyens et coll., 2011).

Les exercices de transfert de poids dans les directions antéro-postérieures ou médio-latérales améliorent la stabilité posturale et la contribution des chevilles au contrôle de la posture statique et dynamique en augmentant le pivot autour de la cheville, ce qui est considéré comme la stratégie la plus sûre pour compenser les perturbations de faible amplitude chez le sujet âgé (Gouglidis et coll., 2011).

Tableau 7.II : Stratégies d'intervention et leurs modes d'action

Différents types d'exercices	Mode d'action
Entraînement de l'équilibre	Stimulation multi-sensorielle Entraînement des systèmes effecteurs neuromusculaires
Entraînement de la force musculaire et de l'endurance Exercices réguliers Exercices de fitness	Effet bénéfique sur la masse et la fonction musculaire Augmente l'activité métabolique et l'oxygénation du cerveau
Exercice de transfert de poids	Améliore la contribution des chevilles au contrôle postural
Solutions prospectives	Mode d'action
<i>Tai chi</i>	Semblable à l'entraînement de l'équilibre Effet bénéfique sur l'équilibre et le contrôle postural
Renforcement proprioceptif (ceintures vibrantes)	Compense les informations sensorielles déficitaires
Renforcement tactile plantaire (semelles vibrantes)	Améliore la perception par les récepteurs cutanés plantaires
Biofeedback vibro-tactile, auditif ou visuel	Augmente le retour sensoriel Aide à la stabilisation du corps dans l'espace
Entraînement cognitif	Améliore les capacités de partage attentionnel en situation de double-tâche posturale et cognitive

D'une manière générale, la pratique d'une activité physique régulière est une mesure efficace pour prévenir les chutes. Elle fait obstacle ou au moins retarde la sarcopénie qui se caractérise par un déclin de la masse musculaire et la perte

des capacités fonctionnelles. De plus, l'exercice physique améliore l'efficacité des capillaires sanguins, augmente l'activité métabolique et l'oxygénation du cerveau. Ainsi, un exercice régulier et un style de vie actif pour lutter contre la sédentarité sont associés à une réduction des risques de chute et à un effet protecteur relatif aux atteintes cognitives (Kaliman et coll., 2011). Les exercices qui augmentent l'aptitude aérobie de sujets sédentaires (par exemple marcher, nager ou faire du vélo) ont également montré une amélioration des performances dans le domaine cognitif, en particulier pour des tâches qui impliquent les processus de contrôle exécutifs (Schaefer et Schumacher, 2011). Les effets sur la cognition sont majorés lorsqu'ils sont combinés à l'entraînement de la force et de la flexibilité (Colcombe et Kramer, 2003).

Autres types d'intervention

Outre les exercices décrits précédemment, d'autres méthodes plus récentes peuvent s'inscrire dans les stratégies de réduction des risques. Parmi ces méthodes, le *tai chi*, qui est un travail basé sur les arts martiaux chinois, semble présenter un effet bénéfique sur l'équilibre et le contrôle postural semblable à celui de l'entraînement traditionnel de l'équilibre décrit plus haut (Hain et coll., 1999 ; Wu, 2002). Cependant, il semble que de longues périodes d'entraînement soient nécessaires pour parvenir à ce résultat.

D'autres méthodes, comme le renforcement proprioceptif, améliorent la stabilité posturale chez le sujet âgé. Chez les personnes âgées présentant une altération proprioceptive, les oscillations posturales sont considérablement accrues. Une solution consiste à renforcer les informations proprioceptives. Les dispositifs haptiques comme les ceintures de vibration semblent être en mesure d'avertir un individu lorsque les oscillations se sont trop éloignées du centre de support. En substance, leur effet consiste à répliquer les informations qui auraient été fournies par les informations sensorielles en provenance des pieds, des chevilles et des genoux. Étant donné l'importance des informations proprioceptives chez les sujets âgés, telle que nous l'avons vue dans les sections précédentes, ces méthodes sont prometteuses dans le domaine de la prévention des chutes (Haggerty et coll., 2012). La stimulation plantaire réalisée grâce à des vibrations mécaniques améliore également l'équilibre chez le sujet âgé. Cette stimulation a pour effet d'améliorer le codage de la pression du pied par les récepteurs cutanés plantaires, qui deviennent sensibles à des stimuli qui étaient auparavant sous le seuil de détection (Priplata et coll., 2003).

À ces renforcements sensoriels vibro-tactiles, s'ajoutent des biofeedbacks auditifs ou visuels qui fournissent une aide à la stabilisation du corps dans l'espace par une augmentation du retour sensoriel auditif ou visuel qui permettent un codage des oscillations posturales respectivement par la hauteur et le volume du son ou par la vision en temps réel des oscillations du

centre de pression. Ces dispositifs sont basés sur les interactions sensorielles. Selon le fonctionnement naturel des sens qui contribuent au contrôle de l'équilibre (vestibulaire, somesthésique et visuel), les biofeedbacks peuvent jouer un rôle de substitution des informations sensorielles déficitaires ou d'augmentation du poids d'une information donnée dans l'intégration sensorimotrice réalisée au niveau du système nerveux central (Zijlstra et coll., 2010). Enfin, l'entraînement cognitif est un type d'intervention tout à fait récent et prometteur. Dans une section antérieure, comme mentionné chez le sujet âgé, l'attention et les fonctions exécutives sont essentielles au contrôle postural et peuvent expliquer en partie des instabilités observées dans certaines pathologies liées à l'âge. L'entraînement cognitif s'inscrit dans la lignée de ces études et repose sur l'hypothèse qu'un entraînement spécifique des ressources attentionnelles et de certaines fonctions exécutives peut améliorer les capacités de partage attentionnel en situation de double-tâche posturale et cognitive. À ce jour, les études réalisées ont montré que l'entraînement cognitif améliore les performances motrices en situation d'équilibration dynamique (Li et coll., 2010 ; Borel et coll., 2012) ou lors de la marche (Verghese et coll., 2010 ; Montero-Odasso et coll., 2012). Des études complémentaires sont nécessaires afin de préciser les modes d'action et les limites de ce type d'entraînement.

En conclusion, l'équilibre repose sur des fonctions sensorielles et motrices qui s'altèrent au cours du vieillissement. Cependant, les réponses posturales chez des personnes âgées robustes sont très proches de celles de sujets plus jeunes. En revanche, des instabilités, des difficultés dans le maintien de l'équilibre et des perturbations de la marche sont décrites chez les personnes prédisposées à la chute, et aggravées par les pathologies liées au vieillissement (pathologies sensorielles, maladie de Parkinson, pathologies neurologiques). Certains changements posturaux ne peuvent être mis en évidence que dans des conditions où le maintien de l'équilibre est plus difficile : lorsque toutes les modalités sensorielles qui participent normalement au contrôle de la posture ne sont pas disponibles, ou dans des conditions de double-tâche cognitive et posturale qui nécessitent un partage des ressources attentionnelles normalement dévolues au contrôle de la posture. Ce type de tâche est particulièrement intéressant dans une perspective de diagnostic des troubles posturo-locomoteurs et d'augmentation de la sensibilité de la prédiction de la chute.

De nombreux paramètres ont été décrits comme étant caractéristiques du déclin lié à l'âge ou comme facteurs contribuant aux chutes. Ils concernent l'attitude posturale, l'activité musculaire, les paramètres de marche (en particulier la réduction de la vitesse de marche), l'augmentation de la variabilité du pas, ainsi que l'augmentation de la durée de la phase préparatoire au mouvement. Les personnes âgées semblent donc adopter une démarche plus prudente et moins coûteuse d'un point de vue énergétique qui constituerait une adaptation aux changements de capacités physiques. Il semblerait

qu'au-delà de certaines limites, qui restent à définir, ces comportements posturaux deviennent des facteurs de risque de chute.

Par ailleurs, les performances posturales et les stratégies d'équilibration ne dépendent pas seulement de la difficulté réelle de la tâche mais aussi de la difficulté perçue par le sujet. Ainsi, la peur de tomber diminue la stabilité. Dans ce cadre, il serait intéressant de réaliser des essais avec évaluation. Ces données pourraient présenter des implications dans le domaine de la rééducation. Des traitements rééducatifs d'ensemble devraient cibler non seulement les aspects physiologiques de l'équilibre et de la mobilité mais également leurs déterminants psychologiques.

Dans leur ensemble, ces observations ont des implications importantes quant à la mise en œuvre d'exercices de rééducation adaptés pour pallier aux troubles de l'équilibre ou dans le cadre de stratégies de prévention des chutes. Une approche plus écologique et plus globale de la prévention des chutes et de la rééducation des troubles de l'équilibre du sujet âgé devrait s'appuyer sur ces différents aspects sensoriels, biomécaniques et/ou cognitifs et tenir compte du contexte et des stratégies individuelles.

BIBLIOGRAPHIE

ADKIN AL, FRANK JS, CARPENTER MG, PEYSAR GW. Postural control is scaled to level of postural threat. *Gait Posture* 2000, **12** : 87-93

ADKIN AL, FRANK JS, CARPENTER MG, PEYSAR GW. Fear of falling modifies anticipatory postural control. *Exp Brain Res* 2002, **143** : 160-170

ALESCIO-LAUTIER B, MICHEL BF, HERRERA C, ELAHMADI A, CHAMBON C, et coll. Visual and visuospatial short-term memory in mild cognitive impairment and Alzheimer disease : role of attention. *Neuropsychologia* 2007, **45** : 1948-1960

ALLALI G, ASSAL F, KRESSIG RW, DUBOST V, HERRMANN FR, BEAUCHET O. Impact of impaired executive function on gait stability. *Dement Geriatr Cogn Disord* 2008, **26** : 364-369

ARAMPATZIS A, KARAMANIDIS K, MADEMLI L. Deficits in the way to achieve balance related to mechanisms of dynamic stability control in the elderly. *J Biomech* 2008, **41** : 1754-1761

BARAK Y, WAGENAARRC, HOLT KG. Gait characteristics of elderly people with a history of falls: a dynamic approach. *Phys Ther* 2006, **86** : 1501-1510

BARBIERI G, GISSOT AS, PERENNOU D. Ageing of the postural vertical. *Age (Dordr)* 2010, **32** : 51-60

BARIN K, DODSON EE. Dizziness in the Elderly. *Otolaryngologic Clinics of North America* 2011, **44** : 437-454

BARRETT RS, MILLS PM, BEGG RK. A systematic review of the effect of ageing and falls history on minimum foot clearance characteristics during level walking. *Gait Posture* 2010, **32** : 429-435

BEAUCHET O, BERRUT G. Gait and dual-task: definition, interest, and perspectives in the elderly. *Psychol Neuropsychiatr Vieil* 2006, **4** : 215-225

BERNARD-DEMANZE L, DUMITRESCU M, JIMENO P, BOREL L, LACOUR M. Age-related changes in posture control are differentially affected by postural and cognitive task complexity. *Curr Aging Sci* 2009, **2** : 139-149

BOHANNON RW. Comfortable and maximum walking speed of adults aged 20-79 years: reference values and determinants. *Age Ageing* 1997, **26** : 15-19

BOREL L, LOPEZ C, PÉRUCH P, LACOUR M. Vestibular syndrome: a change in internal spatial representation. *Neurophysiol Clin* 2008, **38** : 375-389

BOREL L, MICHEL M, LÉONARD J, JIMENO P, DUMITRESCU M, ALESCIO-LAUTIER B. Effet d'un entraînement cognitif sur le contrôle postural chez la personne âgée. *Neurophysiol Clin* 2012, **42** : 401

BRAUER SG, WOOLLACOTT M, SHUMWAY-COOK A. The interacting effects of cognitive demand and recovery of postural stability in balance-impaired elderly persons. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2001, **56** : M489-M496

BUCHNER DM, CRESS ME, DE LATEUR BJ, ESSELMAN PC, MARGHERITA AJ, et coll. The effect of strength and endurance training on gait, balance, fall risk, and health services use in community-living older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med* 1997, **52** : M218-M224

CARPENTER MG, FRANK JS, ADKIN L, PATON A, ALLUM JHJ. Influence of postural anxiety on postural reactions to multi-directional surface rotations. *J Neurophysiol* 2004, **92** : 3255-3265

CARPENTER MG, ADKIN AL, BRAWLEY LR, FRANK JS. Postural, physiological and psychological reactions to challenging balance: does age make a difference? *Age Ageing* 2006, **35** : 298-303

COLCOMBE S, KRAMER AF. Fitness effects on the cognitive function of older adults: a meta-analytic study. *Psychol Sci* 2003, **14** : 125-130

CURTHOYS IS. Vestibular compensation and substitution. *Curr Opin Neurol* 2000, **13** : 27-30

DELBAERE K, STURNIEKS DL, CROMBEZ G, LORD SR. Concern about falls elicits changes in gait parameters in conditions of postural threat in older people. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2009, **64** : 237-242

ECKHARDT-HENN A, BREUER P, THOMALSKE C, HOFFMANN SO, HOPF HC. Anxiety disorders and other psychiatric subgroups in patients complaining of dizziness. *J Anxiety Disord* 2003, **17** : 369-388

EIKEMA DJ, HATZITAKI V, TZOVARAS D, PAPAXANTHIS C. Age-dependent modulation of sensory reweighting for controlling posture in a dynamic virtual environment. *Age (Dordr)* 2012, **34** : 1381-1392

FAULKNER J, LARKIN L, CLAFIN D, BROOKS SV. Age related changes in the structure and function of skeletal muscles. *Clin Exp Pharmacol Physiol* 2007, **34** : 1091-1096

FERRANDEZ AM, PAILHOUS J, DURUP M. Slowness in elderly gait. *Exp Aging Res* 1990, **16** : 79-89

FRONTERA WR, REID KF, PHILLIPS EM, KRIVICKAS LS, HUGHES VA, et coll. Muscle fiber size and function in elderly humans: a longitudinal study. *J Appl Physiol* 2008, **105** : 637-642

FULLE S, PROTASI F, DI TG, PIETRANGELO T, BELTRAMIN A, et coll. The contribution of reactive oxygen species to sarcopenia and muscle ageing. *Exp Gerontol* 2004, **39** : 17-24

GILLESPIE LD, GILLESPIE WJ, ROBERTSON MC, LAMB SE, CUMMING RG, ROWE BH. Interventions for preventing falls in elderly people. *Cochrane Database Syst Rev* 2003, **4** : CD000340

GILLESPIE LD, ROBERTSON MC, GILLESPIE WJ, LAMB SE, GATES S, et coll. Interventions for preventing falls in older people living in the community. *Cochrane Database Syst Rev* 2009, **15** : CD007146

GOUGLIDIS V, NIKODELIS T, HATZITAKI V, AMIRIDIS IG. Changes in the limits of stability induced by weight-shifting training in elderly women. *Exp Aging Res* 2011, **37** : 46-62

GRABINER MD, OWINGS TM, PAVOL MJ. Lower extremity strength plays only a small role in determining the maximum recoverable lean angle in older adults. *Journals of Gerontology A Biological Sciences and Medical Sciences* 2005, **60** : M1447-M1450

GUERRAZ M, YARDLEY L, POLLAK L, RUDGE P, GRETTY MA, et coll. Visual vertigo: symptom assessment, spatial orientation and postural control. *Brain* 2001, **124** : 1646-1656

GUNTER K, WHITE K, WC WH, SNOW C. Functional mobility discriminates nonfallers from one-time and frequent fallers. *J Gerontol* 2000, **55** : M672-M676

HAGGERTY S, JIANG LT, GALECKI A, SIENKO KH. Effects of biofeedback on secondary-task response time and postural stability in older adults. *Gait & Posture* 2012, **35** : 523-528

HAIN T, FULLER L, WEIL L, KOTSIAS J. Effects of T'ai Chi on Balance. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 1999, **125** : 1191-1195

HORAK FB, EARHART GM, DIETZ V. Postural responses to combinations of head and body displacements: vestibular-somatosensory interactions. *Exp Brain Res* 2001, **141** : 410-414

HORTOBAGYI T, ZHENG D, WEIDNER M, LAMBERT NJ, WESTBROOK S, HOUMARD JA. The influence of aging on muscle strength and muscle fiber characteristics with special reference to eccentric strength. *Journals of Gerontology (series A) Biological Sciences and Medical Sciences* 1995, **50** : B399-B406

HORTOBAGYI T, SOLNIK S, GRUBER A, RIDER P, STEINWEG K, et coll. Interaction between age and gait velocity in the amplitude and timing of antagonist muscle coactivation. *Gait Posture* 2009, **29** : 558-564

HUFFMANN JL, HORSLEN BC, CARPENTER AL, ADKIN AL. Does increased postural threat lead to more conscious control of posture ? *Gait Posture* 2009, **30** : 528-532

KALIMAN P, PARRIZAS M, LALANZAJE, CAMINS A, ESCORIHUELA RM, et coll. Neurophysiological and epigenetic effects of physical exercise on the aging process. *Ageing Research Reviews* 2011, **10** : 475-486

KANNUS P. Prevention of falls and consequent injuries in elderly people. *Lancet* 2005, **366** : 1885-1893

KARAMANIDIS K, ARAMPATZIS A. Age-related degeneration in leg extensor muscle-tendon units decreases recovery performance after a forward fall: compensation with running experience. *European Journal of Applied Physiology* 2007, **99** : 73-85

KARINKANTA S, PIIRTOLA M, SIEVÄNEN H, UUSI-RASI K, KANNUS P. Physical therapy approaches to reduce fall and fracture risk among older adults. *Nat Rev Endocrinol* 2010, **6** : 396-408

KIRKWOOD RN, TREDE RG, MOREIRA BS, KIRKWOOD SA, PEREIRA LS. Decreased gastrocnemius temporal muscle activation during gait in elderly women with history of recurrent falls. *Gait Posture* 2011, **34** : 60-64

KOLB FP, LACHAUER S, DIENER HC, TIMMANN D. Changes in conditioned postural responses. Comparison between cerebellar patients and healthy subjects. *Acta Physiol Pharmacol Bulg* 2001, **26** : 143-146

LACOUR M, BARTHELEMY J, BOREL L, MAGNAN J, XERRI C, et coll. Sensory strategies in human postural control before and after unilateral vestibular neurotomy. *Exp Brain Res* 1997, **115** : 300-310

LACOUR M, BERNARD-DEMANZE L, DUMITRESCU M. Posture control, aging, and attention resources: models and posture-analysis methods. *Neurophysiol Clin* 2008, **38** : 411-421

LACOUR M, DUTHEIL S, TIGHILET B, LOPEZ C, BOREL L. Tell me your vestibular deficit, and I'll tell you how you'll compensate. Basic and Clinical Aspects of Vertigo and Dizziness. *Ann NY Acad Sci* 2009, **1164** : 268-278

LAJOIE Y, TEASDALE N, BARD C, FLEURY M. Attentional demands for static and dynamic equilibrium. *Exp Brain Res* 1993, **97** : 139-144

LAROCHE DP, CREMIN KA, GREENLEAF B, CROCE RV. Rapid torque development in older female fallers and nonfallers: a comparison across lower-extremity muscles. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 2010, **20** : 482-488

LAROCHE DP, COOK SB, MACKALA K. Strength asymmetry increases gait asymmetry and variability in older women. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 2012, **44** : 2172-2181

LAUGHTON CA, SLAVIN M, KATDARE K, NOLAN L, BEAN JF, et coll. Aging, muscle activity, and balance control: physiologic changes associated with balance impairment. *Gait Posture* 2003, **18** : 101-108

LEDIN T, KRONHED A, MOLLER C, MOLLER M, ODKVIST L, OLSSON B. Effects of balance training in elderly evaluated by clinical tests and dynamic posturography. *J Vestib Res* 1991, **1** : 129-138

LI KZH, LINDENBERGER U, FREUND AM, BALTES PB. Walking while memorizing: Age-related differences in compensatory behaviour. *Psychol Sci* 2001, **12** : 230-237

LI KZH, LINDENBERGER U. Relations between aging sensory/sensorimotor and cognitive functions. *Psychology and Aging* 2002, **26** : 777-783

LI KZH, ROUDAIA E, LUSSIER M, BHERER L, LEROUX A, MCKINLEY PA. Benefits of cognitive dual-task training on balance performance in healthy older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2010, **65** : 1344-1352

LINDENBERGER U, MARSISKE M, BALTES PB. Memorizing while walking: increase in dual-task costs from younger adulthood to old age. *Psychol Aging* 2000, **15** : 417-436

LORD SR, LLOYD DG, LI SK. Sensori-motor function, gait patterns and falls in community-dwelling women. *Age Ageing* 1996, **25** : 292-299

LUNDIN-OLSSON L, NYBERG L, GUSTAFSON Y. « Stops walking when talking » as a predictor of falls in elderly people. *Lancet* 1997, **349** : 617

MACKEY DC, ROBINOVITCH SN. Mechanisms underlying age-related differences in ability to recover balance with the ankle strategy. *Gait Posture* 2006, **23** : 59-68

MADIGAN ML, LLOYD EM. Age and stepping limb performance differences during a single-step recovery from a forward fall. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2005, **60** : 481-485

MAKI BE, MCLLOYD WE. Control of rapid limb movements for balance recovery: age-related changes and implications for fall prevention. *Age Ageing* 2006, **35** (suppl 2) : ii12-ii18

MASSION J. Postural control system. *Curr Opin Neurobiol* 1994, **4** : 877-887

MAURER C, PETERKA RJ. A New interpretation of spontaneous sway measures based on a simple model of human postural control. *J Neurophysiol* 2005, **93** : 189-200

MAYLOR EA, WING AM. Age differences in postural stability are increased by additional cognitive demands. *J Gerontol Psychol Sci* 1996, **51** : 143-154

MENANT JC, ST GEORGE RJ, FITZPATRICK RC, LORD SR. Impaired depth perception and restricted pitch head movement increase obstacle contacts when dual-tasking in older people. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2010, **65** : 751-757

MENZ HB, LORD SR, FITZPATRICK RC. Age-related differences in walking stability. *Age Ageing* 2003, **32** : 137-142

MESURE S, AZULAY J-P, POUGET J, AMBLARD B. Strategies of segmental stabilization during gait in Parkinson disease. *Exp Brain Res* 1999, **129** : 573-581

MICHEL-PELLEGRINO V, HEWSON D, HOGREL JY, DUCHENE J. Stepping down backwards as a means of detecting biomechanical differences between healthy older and younger adults. *Aging Clin Exp Res* 2008, **20** : 226-233

MONTERO-ODASSO M, VERGHESE J, BEAUCHET O, HAUSDORFF JM. Gait and cognition: a complementary approach to understanding brain function and the risk of falling. *Journal of the American Geriatrics* 2012, **60** : 2127-2136

NAGAMATSU LS, VOSS M, NEIDER MB, GASPAR JG, HANDY TC, et coll. Increased cognitive load leads to impaired mobility decisions in seniors at risk for falls. *Psychol Aging* 2011, **26** : 253-259

NEYENS JC, VAN HAASTREGT JC, DIJCKS BP, MARTENS M, VAN DEN HEUVEL WJ, et coll. Effectiveness and implementation aspects of interventions for preventing falls in elderly people in long-term care facilities: a systematic review of RCTs. *J Am Med Dir Assoc* 2011, **12** : 410-425

O'CONNOR SM, KUO AD. Direction-dependent control of balance during walking and standing. *J Neurophysiol* 2009, **102** : 1411-1419

ORR R. Contribution of muscle weakness to postural instability in the elderly. A systematic review. *Eur J PhysRehabil Med* 2010, **46** : 183-220

PAILLARD T. Vieillesse et condition physique. Editions Ellipses, collection Essentiel en sciences du sport, 2009

PARK S, HORAK FB, KUO AD. Postural feedback responses scale with biomechanical constraints in human standing. *Exp Brain Res* 2004, **154** : 417-427

PARK DC, REUTER-LORENZ P. The adaptive brain: aging and neurocognitive scaffolding. *Annu Rev Psychol* 2009, **60** : 173-196

PATEL M, FRANSSON PA, KARLBERG M, MALMSTROM EM, MAGNUSSON M. Change of body movement coordination during cervical proprioceptive disturbances with increased age. *Gerontology* 2010, **56** : 284-290

PERROCHON A, KEMOUN G, WATELAIN E, BERTHOZ A. Walking Stroop carpet: an innovative dual-task concept for detecting cognitive impairment. *Clinical Interventions in Aging* 2013, **8** : 317-328

PETERKA RJ, BLACK FO. Age-related changes in human posture control: sensory organization tests. *J Vest Research* 1990, **1** : 73-85

PRIEST AW, SALAMON KB, HOLLMAN JH. Age-related differences in dual task walking: a cross sectional study. *J Neuroeng Rehabil* 2008, **5** : 29

PRIPLATA AA, NIEMI JB, HARRY JD, LIPSITZ LA, COLLINS JJ. Vibrating insoles and balance control in elderly people. *Lancet* 2003, **362** : 1123-1124

PROSKE U, GANDEVIA SC. The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiological Reviews* 2012, **92** : 1651-1697

REDFERN MS, TALKOWSKI ME, JENNINGS JR, FURMAN JM. Cognitive influences in postural control of patients with unilateral vestibular loss. *Gait Posture* 2004, **19** : 105-114

SALTHOUSE T. Consequences of age-related cognitive declines. *Annu Rev Psychol* 2012, **63** : 201-226

SCHAEFER S, SCHUMACHER V. The interplay between cognitive and motor functioning in healthy older adults: findings from dual-task studies and suggestions for intervention. *Gerontology* 2011, **57** : 239-246

SCHRACK JA, SIMONSICK EM, FERRUCCI L. The energetic pathway to mobility loss: an emerging new framework for longitudinal studies on aging. *J Am Geriatr Soc* 2010, **58** (suppl 2) : S329-S336

SHAPIRO A, MELZER I. Balance perturbation system to improve balance compensatory responses during walking in old persons. *J Neuroeng Rehabil* 2010, **7** : 32

SHERIDAN PL, SOLOMONT J, KOWALL N, HAUSDORFF JM. Influence of executive function on locomotor function: divided attention increases gait variability in Alzheimer's disease. *J Am Geriatr Soc* 2003, **51** : 1633-1637

SHUMWAY-COOK A, WOOLLACOTT M, KERNS KA, BALDWIN M. The effects of two types of cognitive tasks on postural stability in older adults with and without a history of falls. *Journal of Gerontology Biol Sci* 1997, **52** : M232-M240

SNIJEDERS T, VERDIJK LB, VAN LOON L. The impact of sarcopenia and exercise training on skeletal muscle satellite cells. *Ageing Research Reviews* 2009, **8** : 328-338

SNOW J, WACKYM P, BALLENGER J. Ballenger's Otorhinolaryngology: Head and Neck Surgery. Shelton, Conn. People's Medical Pub. House/BC Decker, 2009

TAYLOR ME, DELBAERE K, MIKOLAIZAK AS, LORD SR, CLOSE JC. Gait parameter risk factors for falls under simple and dual task conditions in cognitively impaired older people. *Gait Posture* 2013, **37** : 126-130

TEASDALE N, BARD C, LARUE J, FLEURY M. On the cognitive penetrability of posture control. *Exp Aging Res* 1993, **19** : 1-13

TEASDALE N, SIMONEAU M. Attentional demands for postural control: the effects of aging and sensory reintegration. *Gait & Posture* 2001, **14** : 203-210

THELEN DG, MURIUKI M, JAMES J, SCHULZ AB, ASHTON-MILLER JA, ALEXANDER NB. Muscle activities used by young and old adults when stepping to regain balance during a forward fall. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 2000, **10** : 93-101

TINETTI M, BAKER D, MCAVAY GE. A multifactorial intervention to reduce the risk of falling among elderly people living in the community. *N Engl J Med* 1994, **331** : 821-827

TINETTI ME. Preventing falls in elderly persons. *New England Journal of Medicine* 2003, **348** : 42-49

TORRES-OVIEDO G, TING LH. Subject-specific muscle synergies in human balance control are consistent across different biomechanical contexts. *J Neurophysiol* 2010, **103** : 3084-3098

TOULLOTTE C, THEVENON A, WATELAIN E, FABRE C. Identification of healthy elderly fallers and non-fallers by gait analysis under dual-task conditions. *Clin Rehabil* 2006, **20** : 269-276

UEMURA K, YAMADA M, NAGAI K, ICHIHASHI N. Older adults at high risk of falling need more time for anticipatory postural adjustment in the precrossing phase of obstacle negotiation. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2011, **66** : 904-909

UEMURA K, YAMADA M, NAGAI K, SHINYA M, ICHIHASHI N. Effect of dual-tasking on the center of pressure trajectory at gait initiation in elderly fallers and non-fallers. *Aging Clin Exp Res* 2012, **24** : 152-156

VAN IERSEL MB, KESSELS RP, BLOEM BR, VERBEEK AL, OLDE RIKKERT MG. Executive functions are associated with gait and balance in community-living elderly people. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2008, **63** : 1344-1349

VERGHESE J, MAHONEY J, AMBROSE AF, WANG C, HOLTZER R. Effect of cognitive remediation on gait in sedentary seniors. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2010, **65A** : 1338-1343

WOOLLACOTT MH, TANG PF. Balance control during walking in the older adult: research and its implications. *PhysTher* 1997, **77** : 646-660

WOOLLACOTT M, SHUMWAY-COOK A. Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research. *Gait Posture* 2002, **16** : 1-14

WU G. Evaluation of the effectiveness of Tai Chi for improving balance and preventing falls in the older population -A review. *J Am Geriatr Soc* 2002, **50** : 746-754

YOUNG LR. Optimal estimator models for spatial orientation and vestibular nystagmus. *Exp Brain Res* 2011, **210** : 465-476

YOUNG LR, BERNARD-DEMANZE L, DUMITRESCU M, MAGNAN J, BOREL L, LACOUR M. Does fear of falling influence control of posture? A comparative study in healthy subjects and compensated unilateral vestibular loss patients. *J Vest Res* 2012, **22** : 129-138

ZIETZ D, JOHANNSEN L, HOLLANDS M. Stepping characteristics and Centre of Mass control during stair descent: Effects of age, fall risk and visual factors. *Gait Posture* 2011, **34** : 279-272

ZIJLSTRA A, MANCINI M, CHIARI L, ZIJLSTRA W. Biofeedback for training balance and mobility tasks in older populations: a systematic review. *J Neuroeng Rehab* 2010, **7** : 58