

Physiologie du contrôle postural orthostatique

Dr David GASQ^{1,2} et Dr Camille CORMIER^{1,2}

¹ Service des Explorations Fonctionnelles Physiologiques, Hôpital Rangueil, CHU de Toulouse

² ToNIC, Toulouse NeuroImaging Center, Université de Toulouse, Inserm, UPS, France

Ce document propose une synthèse concernant la physiologie et l'évaluation du contrôle postural orthostatique. Pour des raisons didactiques, certains phénomènes ont été volontairement omis ou simplifiés et décrits succinctement. Des ouvrages de référence sont proposés à la fin du document pour approfondir et préciser les connaissances. Ce document est complété par le diaporama présenté lors du Module 3 du DES de MPR.

Tout ce qui est simple est faux mais tout ce qui ne l'est pas est inutilisable (Paul Valéry, 1942).

Table des matières

1.1	Introduction	3
1.2	Bases biomécaniques du maintien postural orthostatique	4
1.3	Afférences du système postural	7
1.3.1	Système visuel	7
1.3.2	Système proprioceptif	8
1.4	Intégration centrale	10
1.5	Activité motrice posturale	13
1.5.1	Tonus musculaire antigravitaire	14
1.5.2	Ajustements posturaux	16
1.6	Physiopathologie de l'instabilité posturale	19
1.7	Évaluation d'une instabilité posturale	21
1.7.1	Évaluation clinique	21
1.7.2	Évaluation instrumentale	23
1.8	Documents de référence	24

Objectifs d'enseignement

1. Expliquer le concept de stabilité posturale sur le plan biomécanique.
2. Expliquer le rôle du système visuel (vision périphérique et vision centrale) dans la physiologie du maintien postural, et définir la visiodépendance posturale.
3. Expliquer le rôle du système vestibulaire dans la physiologie du maintien postural.
4. Expliquer le rôle du système proprioceptif périphérique (fuseaux neuromusculaires, organes tendineux de Golgi, récepteurs péri-articulaires, récepteurs cutanés) dans la physiologie du maintien postural.
5. Comprendre la notion d'intégration des afférences posturales aux différents niveaux du système nerveux central, et expliquer ce qu'est un conflit sensoriel en l'illustrant par un exemple.
6. Décrire la genèse du tonus musculaire antigravitaire.
7. Comprendre la notion d'ajustement postural anticipateur et réactionnel, et expliquer les conséquences potentielles de leur altération.
8. Physiopathologie - Être capable d'identifier et d'expliquer les caractéristiques de l'ataxie vestibulaire, cérébelleuse et proprioceptive.
9. Évaluation – Connaître les principales modalités d'évaluation clinique et instrumentale de l'instabilité posturale.

1.1 Introduction

L'étude de la physiologie du maintien postural orthostatique permet d'appréhender le substrat biomécanique et neurologique mis en jeu pour assurer la stabilité posturale, et de comprendre la sémiologie des pathologies responsables d'une instabilité posturale. Les mécanismes de contrôle postural sont orientés vers la stabilisation de l'individu et l'orientation du corps ou de ses segments pour préparer et supporter le mouvement.

L'organisation fonctionnelle du contrôle de la posture est complexe, et peut être schématisée en trois parties : prise d'informations, intégration des informations, et mise en jeu d'une activité motrice posturale (**Fig. 1**).

1. **Prise d'informations** : le système nerveux a besoin d'être informé en permanence de la position des différents segments corporels entre eux, de la position du corps dans l'espace, et de pouvoir anticiper d'éventuelles modifications environnementales susceptibles d'altérer la stabilité posturale. Pour cela, il fait appel à trois référentiels : un référentiel allocentré correspondant essentiellement aux informations visuelles, un référentiel géocentré ou gravitaire correspondant aux informations d'origine vestibulaire (otolithique) et un référentiel égocentré correspondant à l'ensemble des informations somesthésiques émanant du système musculo-squelettique et en partie du système vestibulaire.

2. **Intégration des informations** : elle est réalisée à différents niveaux du système nerveux afin de pouvoir répondre aux contraintes posturales de la manière la plus adaptée possible.

3. **Activité motrice posturale** : on peut détacher trois fonctions essentielles visant à assurer la stabilité posturale orthostatique : lutter contre les effets de la gravité par le biais d'un tonus musculaire antigravitaire des muscles extenseurs ; mise en jeu d'ajustements moteurs réactionnels en présence d'une déstabilisation externe ; et mise en jeu d'ajustements moteurs anticipés lors de la réalisation de mouvements.

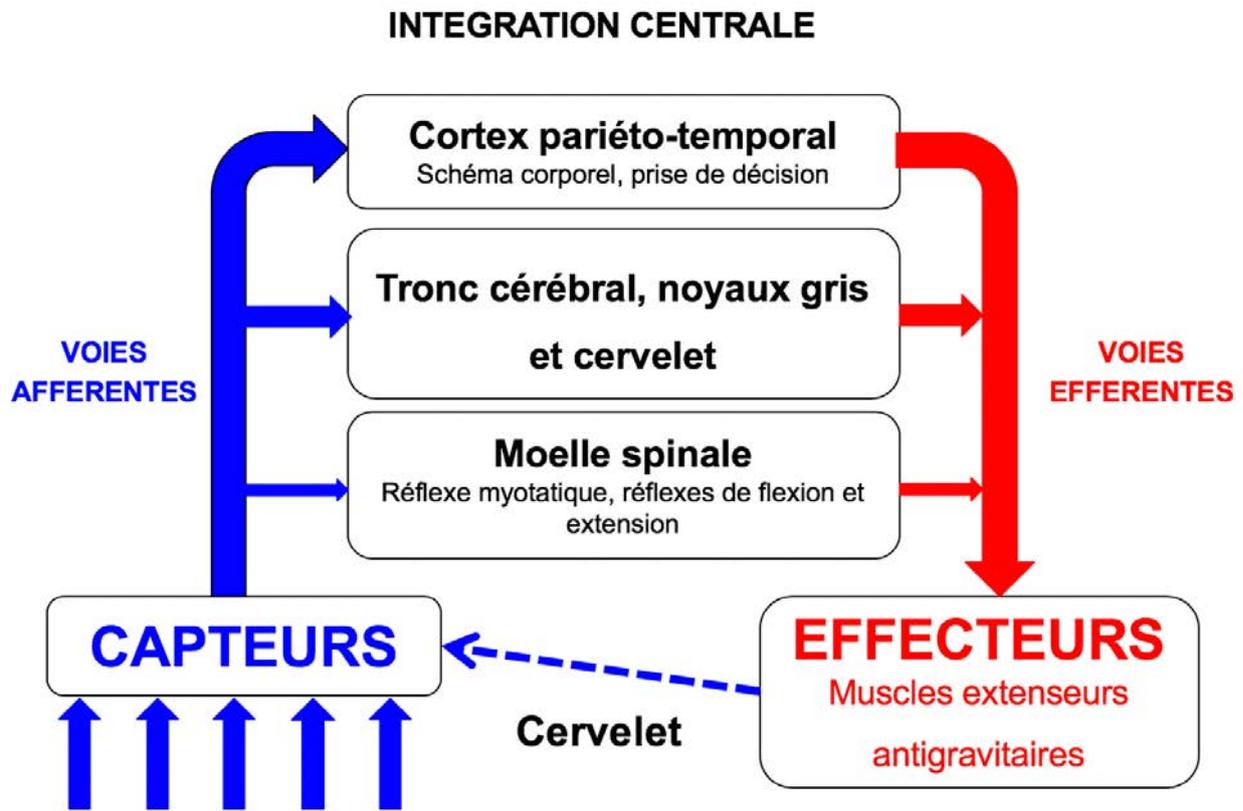


Figure 1. Schématisation de l'organisation fonctionnelle du contrôle de la posture orthostatique.

1.2 Bases biomécaniques du maintien postural orthostatique

Les premières observations quantifiées de la stabilité d'un sujet en position orthostatique semblent avoir été réalisées par Vierordt en 1860, à l'aide d'un dispositif comprenant une plume attachée à la pointe d'un casque qui grattait une feuille enduite de noir de fumée fixée au plafond. Ces enregistrements ont permis d'objectiver qu'en position orthostatique, apparemment statique (pieds joints, sujet apparemment immobile), le sujet était en réalité animé d'oscillations posturales permanentes. Ces observations illustrent la différence entre les concepts d'équilibre et de stabilité posturale : stricto sensu, l'Homme debout n'est donc pas en équilibre puisqu'il présente en permanence des oscillations posturales. La définition de l'équilibre au sens mécanique du terme repose sur le principe fondamental de la statique découlant de la première loi de Newton, selon laquelle un objet est en équilibre si la résultante des forces et des moments appliqués sur cet objet est nulle. Lorsqu'un sujet est debout, sous l'effet de contraintes internes (activités circulatoire et respiratoire à minima) et éventuellement externes, il est en permanence déséquilibré. Les

oscillations posturales sont donc liées à des ajustements posturaux permanents permettant de maintenir la projection du centre de masse dans le polygone de sustentation, ce processus de recherche permanente de l'équilibre correspondant à la stabilisation posturale.

Sur le plan biomécanique, le poids du sujet s'applique au niveau du centre de masse (situé approximativement en avant du rachis lombo-sacré). En position orthostatique de repos, bras le long du corps, la projection au sol du centre de masse passe en avant des malléoles dans le plan sagittal et se situe entre les deux pieds dans le plan frontal. La zone délimitée par les appuis correspond au polygone de sustentation, et le point d'application de la force de réaction du sol définit le centre des pressions (**Fig. 2**).

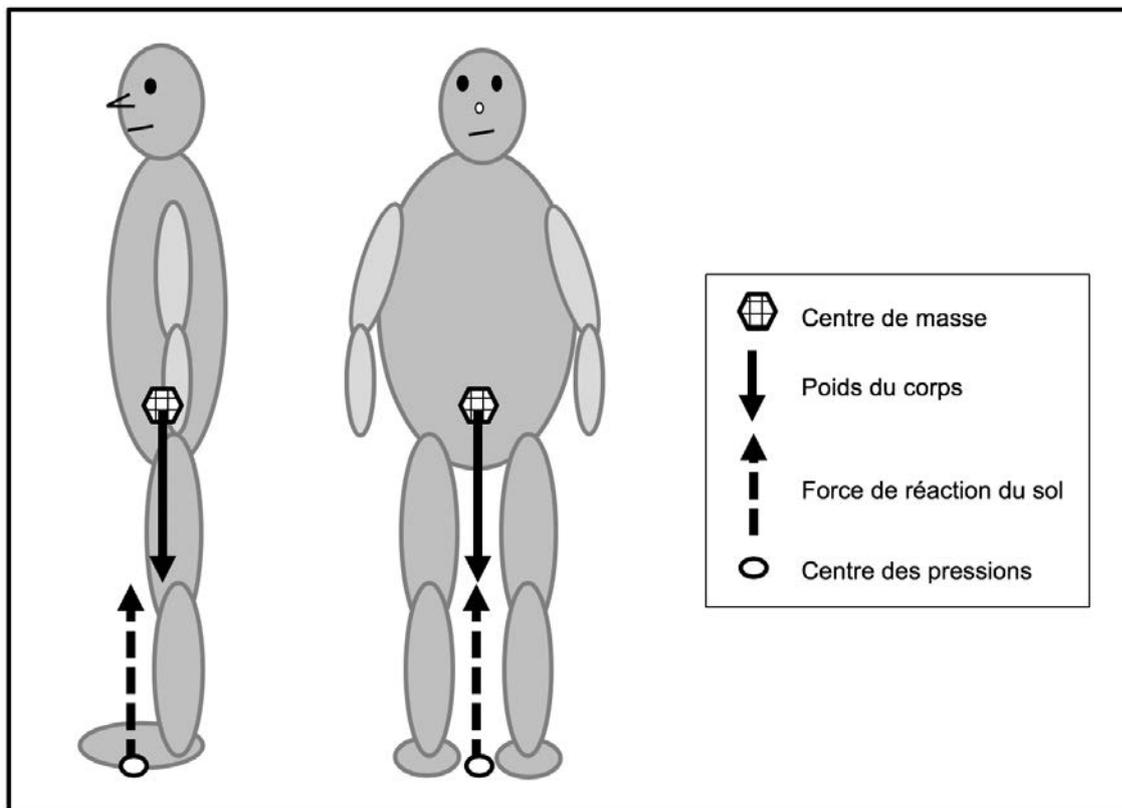


Figure 2. Schématisation biomécanique d'un sujet en position orthostatique.

Sur le plan neurophysiologique, il n'y a pas de récepteur spécifique permettant au système nerveux central de connaître directement la position du centre de masse dans l'espace, cette dernière ne pouvant qu'être estimée à partir du système proprioceptif périphérique.

Un sujet en position orthostatique bipodale peut être modélisé comme un segment rigide oscillant autour des chevilles. Cette modélisation biomécanique des oscillations posturales dans le plan sagittal (**Fig. 3-A**) correspond à l'utilisation d'une stratégie de cheville (également nommé modèle du pendule inversé) dans la mesure où le sujet oscille d'un bloc autour des chevilles : il s'agit d'une modalité physiologique du contrôle postural chez le sujet peu instable au cours de laquelle le maintien de la projection du centre de masse à l'intérieur du polygone de sustentation est réalisé par des déplacements du centre des pressions grâce à de petits mouvements des pieds et des chevilles. A contrario, lorsqu'un sujet est très instable ou qu'il se trouve sur une surface glissante ou réduite, il utilise plutôt une stratégie de hanche : dans ce cadre-là, le sujet abaisse le centre de masse par le biais d'une flexion des genoux et des hanches, et il déplace directement et volontairement son centre de masse par le biais de mouvements du bassin, du tronc et des membres supérieurs (**Fig. 3-B**).

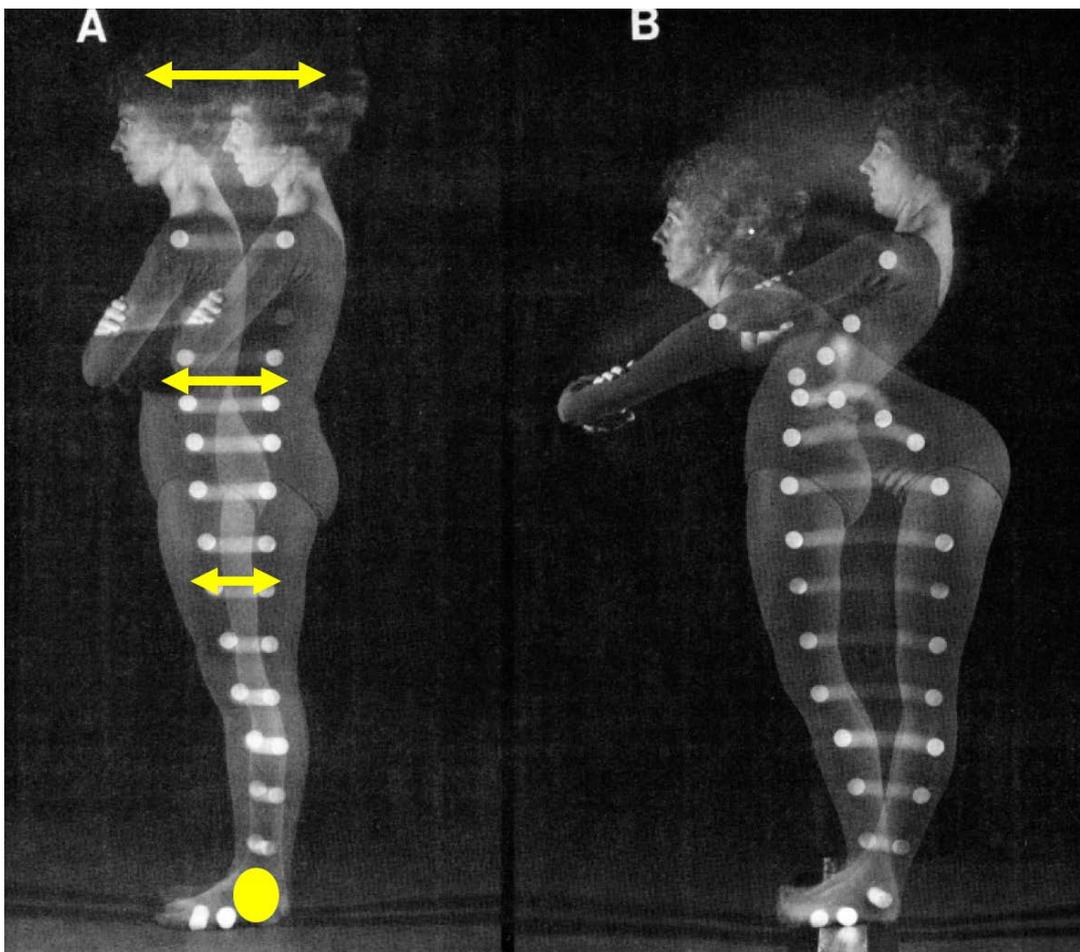


Figure 3. Illustration des stratégies de cheville (A) et de hanche (B) dans le plan sagittal (d'après Horak 1987).

En situation « statique » (pieds immobiles), la stabilité posturale est conservée tant que la projection du centre de masse se projette à l'intérieur du polygone de sustentation. La stabilité posturale peut s'entendre comme le fait de présenter le minimum d'oscillations posturales dans une situation donnée, ou de manière plus globale comme le fait de ne pas chuter (la chute étant le degré maximal d'instabilité posturale). Lors de la marche, il y a un déséquilibre naturel vers l'avant avec une déformation du polygone de sustentation qui à chacun des pas se repositionne sous la projection au sol du centre de masse. En pratique il est nécessaire d'avoir une stabilité posturale correcte en position orthostatique immobile pour que la marche sans aide technique soit possible.

1.3 Afférences du système postural

1.3.1 Système visuel

Le référentiel allocentré correspond au système visuel qui permet de prendre des informations dans l'environnement du sujet. Cette prise d'informations est réalisée grâce aux photorécepteurs rétiens : les cônes présents en grand nombre sur la macula ou fovéa, et les bâtonnets sur la rétine périphérique. La vision centrale est celle de la perception des détails (acuité visuelle), de la fixation et de la stabilisation du regard. La dégradation expérimentale de l'acuité visuelle entraîne une dégradation concomitante et linéaire des performances posturales, la vision centrale ayant un rôle stabilisateur dans le maintien postural par la prise de repère visuels, notamment des repères de verticalité. La vision périphérique permet la perception des mouvements grâce au flux visuel correspondant au défilement de la scène visuelle sur la rétine. Le système visuel peut être trompé car l'interprétation du défilement rétinien peut être lié à un déplacement de l'individu dans l'environnement définissant une sensation égocentrique de déplacement, ou à un déplacement de l'environnement autour de l'individu définissant une sensation exocentrique de déplacement. Ce phénomène est illustré par l'illusion de déplacement vers l'avant qu'un sujet immobile peut ressentir lorsqu'un défilement rétinien est provoqué par un élément se déplaçant vers l'arrière dans le champ visuel périphérique (train en gare par exemple). L'ambiguïté peut être levée en utilisant la vision centrale (tourner la tête pour identifier l'élément en mouvement dans le champ visuel périphérique) et en confrontant la sensation de déplacement avec les autres référentiels (système vestibulaire). Pour le contrôle postural, la perte du champ visuel périphérique est plus délétère que celle du champ visuel central.

La visiodépendance posturale qualifie l'importance de l'utilisation des informations visuelles dans la stabilisation posturale. Elle peut être évaluée en comparant la stabilité posturale d'un sujet les yeux ouverts et les yeux fermés, toutes autres conditions étant similaires par ailleurs, comme ceci est réalisé lors du test de Romberg en pratique clinique (cf. infra). La visiodépendance posturale est physiologiquement variable d'un individu à l'autre mais de manière générale la perte des informations visuelles est associée à une majoration des oscillations posturales. La visiodépendance posturale est significativement augmentée en présence d'une atteinte vestibulaire ou proprioceptive, puisque suite à la perte d'un des deux autres référentiels, l'individu se réfère davantage aux informations visuelles.

1.3.2 Système proprioceptif

La proprioception correspond à la perception du soi, telle que définie par Sherrington en 1906. Le maintien d'une posture orthostatique stable les yeux fermés est permis par la présence d'informations proprioceptives permettant au système nerveux de connaître, en dehors de toute information visuelle, la position et les déplacements des différents segments corporels ainsi que la position et les déplacements du corps dans l'espace. Pour des raisons didactiques, nous individualiserons le système proprioceptif céphalique correspondant au système vestibulaire, et le système proprioceptif périphérique correspondant aux propriocepteurs musculo-squelettiques.

A Proprioception céphalique : système vestibulaire

Le système vestibulaire est composé du système otolithique et du système canalaire qui sont des organes pairs. Le système otolithique ou maculaire, composé de l'utricule (horizontal) et du saccule (vertical) est un véritable référentiel géocentré sensible aux accélérations linéaires exercées sur le massif céphalique, la première d'entre-elles étant la pesanteur. Il permet de coder en permanence la position par rapport au vecteur gravitaire et les déplacements dans les trois plans de l'espace du massif céphalique, et joue un rôle majeur dans la stabilisation posturale.

Le système canalaire ou ampullaire (canaux semi-circulaires horizontal, vertical antérieur et postérieur) est sensible aux accélérations angulaires. Il permet de coder les déplacements du massif céphalique dans les trois plans de l'espace, et joue un rôle majeur dans la stabilisation de la vision lors des mouvements du massif céphalique (réflexe vestibulo-oculaire).

Le système vestibulaire ne permet pas de lever certaines ambiguïtés dans deux situations. La première concerne le système otolithique qui ne permet pas de différencier l'inclinaison du corps entier ou seulement du massif céphalique. Cette ambiguïté peut être levée par les récepteurs somesthésiques cervicaux. La seconde situation concerne le système canalaire qui est mis en défaut en cas de rotation à vitesse constante d'une part, et ne permet pas de différencier une accélération dans un sens de rotation donné d'une décélération dans un sens de rotation contraire d'autre part. Ces ambiguïtés peuvent en général être levées par les récepteurs myo-articulaires cervicaux et la vision (notion de complémentarité entre les différents systèmes afférents).

B Proprioception périphérique

Le système proprioceptif périphérique est un référentiel égocentré composé de différents mécanorécepteurs musculaires, tendineux, péri-articulaires et cutanés qui permettent de coder la position (sens de la position ou statesthésie) et les déplacements des segments corporels entre eux (sens du mouvement ou kinesthésie), voire la position du corps par rapport à l'environnement (récepteurs plantaires).

Les fuseaux neuromusculaires sont des structures disposées en parallèle des fibres musculaires striées squelettiques, permettant de coder la longueur et la vitesse d'allongement musculaire. La réponse tonique des fuseaux neuromusculaires (longueur) est transmise par les fibres Ia et II, alors que la réponse phasique (vitesse d'étirement) est transmise uniquement par les fibres Ia. Du fait de la présence de muscles ou de tendons autour de toutes les articulations, les fuseaux neuromusculaires permettent un codage tridimensionnel permanent de la position et des déplacements articulaires. Les afférences Ia correspondent au premier neurone du réflexe myotatique, qui permet un rétrocontrôle permanent de la longueur du muscle. En position orthostatique, le réflexe myotatique joue un rôle important dans la présence d'un tonus musculaire des muscles extenseurs antigravitaires. L'innervation motrice des fuseaux neuromusculaires (motoneurons gamma) permet de moduler le gain du réflexe myotatique et de modifier la raideur musculaire.

Les organes tendineux de Golgi sont des structures sensibles à la tension disposées en série à la jonction myo-tendineuse.

Des capteurs péri-articulaires disposés dans la capsule articulaire et les ligaments permettent de coder la position articulaire.

Les capteurs de Ruffini disposés dans le derme permettent de coder l'étirement cutané, fournissant une information redondante avec celle des fuseaux neuromusculaires disposés dans les muscles sous-jacents.

Les corpuscules de Pacini disposés dans le derme profond de la peau plantaire permettent de coder les variations de pressions s'exerçant sous les pieds, et donc de manière indirecte codent la position du corps par rapport à son support.

1.4 Intégration centrale

Les informations issues des afférences posturales sont intégrées par le système nerveux central à différents niveaux. Le premier niveau d'intégration se situe au niveau segmentaire spinal, les autres niveaux d'intégration se situant dans le tronc cérébral (noyaux vestibulaires, substance réticulée), le cervelet, les noyaux gris de la base et le cortex cérébral.

Le **premier niveau d'intégration spinal** est largement automatisé, sous la dépendance d'informations hétéro-modalitaires en provenance des différents récepteurs et d'influences supra-spinales, et peut donner lieu à des ajustements posturaux réflexes. Le réflexe myotatique (**Fig. 4**) est un réflexe monosynaptique (boucle courte) permettant d'exciter les motoneurons alpha d'un muscle lorsque ce dernier est étiré (information en provenance des fuseaux neuromusculaires) et d'inhiber les motoneurons des muscles antagonistes par le biais de l'inhibition réciproque. L'inhibition autogénique ou réflexe myotatique inverse est une boucle réflexe qui a une action inhibitrice sur les motoneurons alpha d'un muscle en réponse à une stimulation des organes tendineux de Golgi : ce réflexe permet de moduler l'intensité de la contraction musculaire. Le réflexe ipsilatéral d'extension permet d'exciter les muscles extenseurs des membres inférieurs en réponse à la stimulation des récepteurs de pressions de la plante des pieds. A contrario, comme l'illustre la réaction motrice provoquée par une douleur plantaire lorsqu'un sujet marche sur un objet piquant, un stimulus nociceptif peut déclencher un réflexe de flexion ipsilatéral (retrait du membre) et d'extension controlatéral (pour soutenir le poids du corps).

Au niveau du tronc cérébral, les **noyaux vestibulaires et la formation réticulée** sont deux centres intégrateurs importants des afférences posturales. Les noyaux

vestibulaires sont des formations paires situées dans le bulbe rachidien. On distingue 4 noyaux principaux, chacun ayant une fonction plus ou moins spécialisée selon l'origine de ses afférences. Le noyau vestibulaire latéral reçoit des afférences vestibulaires primaires en provenance de la macula utriculaire, et le noyau vestibulaire inférieur reçoit des informations vestibulaires et cérébelleuses, ces deux noyaux jouant un rôle important dans la modulation du tonus postural, via les faisceaux vestibulo-spinaux se projetant sur les motoneurons de la corne antérieure de la moelle. Les noyaux vestibulaires médian et supérieur reçoivent des informations en provenance du système vestibulaire canalaire et sont impliqués dans les réflexes vestibulo-oculaires. La formation réticulée pontique et bulbaire est un centre de convergence recevant des informations directes ou indirectes de l'ensemble des structures en lien avec le contrôle postural, jouant un rôle important dans la modulation du tonus postural via les faisceaux réticulo-spinaux.

Le **cervelet** reçoit des informations poly-sensorielles en provenance des propriocepteurs périphériques (faisceaux spino-cérébelleux), du système vestibulaire et du système visuel l'informant sur les performances motrices en cours de réalisation, mais également des informations sur les programmes moteurs en cours de planification et d'exécution (copie efférente). Il joue un rôle majeur dans la planification et la réorganisation des commandes motrices en modulant l'activité des faisceaux moteurs descendants (rubro-, réticulo- et vestibulo-spinaux). Il joue également un rôle majeur dans les processus d'apprentissage.

Les **noyaux gris de la base** jouent un rôle majeur dans les processus de contrôle moteur (planification et exécution du mouvement) et dans les processus cognitifs (mémoire, comportement, émotions), tous potentiellement en lien avec le contrôle postural, et participent également au contrôle de la posture et du tonus via le noyau pédonculo-pontin. Le **thalamus** est un carrefour sur les voies afférentes de la somesthésie avant qu'elles ne se projettent sur le cortex somato-sensoriel. Le thalamus postéro-latéral a un rôle particulièrement important dans la fusion des référentiels gravitationnels somesthésique et vestibulaire, contribuant au modèle interne de verticalité.

En dehors des zones corticales spécialisées dans la motricité ou le traitement de différentes modalités sensorielles (somesthésie, vision, audition), il existe des régions corticales d'intégration multimodale. Le **cortex temporo-pariéto-insulaire**, ou « cortex postural », est une zone d'intégration majeure, jouant un rôle important dans les

représentations internes de verticalité et dans la perception de l'espace. Des lésions concernant les zones spécialisées dans la construction d'un référentiel gravitaire vertical sont susceptibles d'altérer la posture et la stabilité posturale du sujet.

En synthèse, le système nerveux central reçoit en permanence des afférences posturales des différents récepteurs, qui sont globalement concordantes et redondantes. Par exemple, lorsqu'un sujet debout est en train d'osciller vers l'avant, le système vestibulaire détecte une accélération céphalique vers l'avant, le système visuel périphérique détecte un défilement rétinien vers l'arrière, la vision centrale peut détecter un déplacement vers l'avant par rapport à un point fixe de l'environnement, les fuseaux neuromusculaires de la loge postérieure de jambe détectent un allongement musculaire, les récepteurs péri-articulaires de cheville détectent un mouvement de flexion dorsale de cheville et les récepteurs plantaires de Pacini détectent une variation de pression se dirigeant vers l'avant-pied. En situation physiologique, le système nerveux bénéficie d'informations complémentaires et redondantes qui sont toutes concordantes, le fonctionnement du système postural étant alors automatique. En condition de privation sensorielle, par exemple lorsque les yeux sont fermés chez un sujet sain, ou en cas de déficience vestibulaire isolée chez un sujet qui a les yeux ouverts, le système nerveux présente des possibilités de substitution sensorielle pour assurer un maintien postural efficient. En cas de déficit vestibulaire par exemple, les informations visuelles sont utilisées pour se substituer aux informations vestibulaires manquantes, ayant pour conséquences une majoration de la visiodépendance posturale associée à une confiance renforcée dans le canal visuel.

En cas de discordance entre les différents canaux d'informations, il y a une situation de **conflit sensoriel**. Des exemples de conflit sensoriel de la vie quotidienne sont l'illusion de déplacement vers l'avant en cas de défilement rétinien provoqué par un objet se déplaçant vers l'arrière dans le champ visuel périphérique (cf. supra) ou encore le mal des transports provoqué par une discordance entre informations visuelles et vestibulaires (avec souvent des réactions végétatives typiques d'un dysfonctionnement vestibulaire). Il est également possible de provoquer expérimentalement un conflit sensoriel. L'utilisation d'un dispositif de vision stabilisée lorsque le sujet est debout (il présente donc des oscillations posturales) créé un conflit entre l'absence de perception de déplacement par le système visuel et l'ensemble des propriocepteurs qui détectent des mouvements. Un autre exemple correspond à la vibration des tendons calcanéens qui en stimulant les fuseaux neuromusculaires des triceps suraux

donne l'illusion d'un déplacement vers l'avant et provoque une rétropulsion chez un sujet debout ayant les yeux fermés. Dans ces différentes situations, le système nerveux est en présence d'informations discordantes, et il doit faire un choix afin de sélectionner les afférences les plus pertinentes afin de proposer des adaptations posturales efficaces. Les processus automatiques de stabilisation posturale deviennent en général conscients (exemple du train d'à côté qui part en sens inverse ou du bus d'à côté qui démarre en sens opposé au feu rouge). L'utilisation expérimentale de situations de conflit sensoriel permet d'évaluer les capacités d'adaptation de l'intégration centrale et de sensibiliser la détection de certaines atteintes. Par exemple, en cas d'atteinte vestibulaire où la visiodépendance posturale du sujet est renforcée, l'utilisation d'une évaluation en condition de vision stabilisée (l'information visuelle n'est alors plus pertinente pour contrôler les oscillations posturales) met souvent le sujet en difficulté car il se fie plus à la vision (même si l'information est erronée) qu'aux informations proprioceptives périphériques (seule possibilité de substitution sensorielle). Si des situations de conflit sensoriel ou de distorsion des afférences posturales se répètent, que ce soit expérimentalement ou dans le cadre d'une pathologie, le système nerveux a la possibilité de recalibrer les informations sensorielles.

Enfin, il existe des interactions entre les processus cognitifs et les processus moteurs, comme en atteste la simple constatation que certains sujets sont obligés de stopper la marche pour répondre à une question. La **réalisation d'une tâche posturale et d'une tâche cognitive de manière concomitante** permet d'évaluer le coût attentionnel de la tâche posturale et d'évaluer les capacités d'attention partagée. Le coût attentionnel est généralement proportionnel à la difficulté de la tâche posturale. La réalisation d'une évaluation en situation de double tâche posturale et cognitive est intéressante pour sensibiliser la détection d'une altération du contrôle postural chez le sujet âgé ou présentant une pathologie neurologique.

1.5 Activité motrice posturale

Les informations sensorielles issues des afférences posturales sont intégrées à différents niveaux du système nerveux central pour permettre un contrôle hiérarchisé de la motricité des muscles posturaux. Les muscles posturaux présentent d'une part une activité tonique permanente (tonus postural) permettant de conserver une station érigée en dépit de la gravité et constituant un support pour la réalisation de mouvements, et d'autre part une activité phasique correspondant aux ajustements posturaux.

1.5.1 Tonus musculaire antigravitaire

Les motoneurones de la moelle spinale constituent ce que Sherrington a nommé la voie finale commune du système moteur. Ces motoneurones reçoivent en permanence des influx excitateurs et inhibiteurs d'origine segmentaire et supra-segmentaire. La résultante de toutes ces actions se traduit par l'existence d'un tonus musculaire des muscles posturaux antigravitaire qui correspond à la traduction mécanique du niveau d'activité des motoneurones alpha. Deux facteurs expliquent que la contraction permanente des muscles extenseurs antigravitaires (i.e. le tonus musculaire antigravitaire) puisse être maintenue au cours du temps sans fatigabilité. Tout d'abord, les muscles posturaux extenseurs sont riches en unités motrices toniques, composées de fibres musculaires de type I avec un métabolisme oxydatif, qui sont peu fatigables. Le recrutement des unités motrices s'effectuant de manière ordonnée selon le principe de taille d'Henneman, les petites unités motrices peu fatigables sont recrutées prioritairement. Enfin, il y a un phénomène de rotation du recrutement des unités motrices au cours du temps contribuant également à la limitation de la fatigue.

Le réflexe myotatique est un maillon clé dans la genèse du tonus musculaire des muscles extenseurs antigravitaires car sous l'effet de la pesanteur, il y a une tendance permanente à l'allongement de ces muscles responsable d'une excitation permanente des fuseaux neuromusculaires. L'excitation permanente des motoneurones alpha peut être modulée directement par des influences supra-spinales se projetant sur le motoneurone alpha, ou indirectement par le biais de la boucle gamma (motoneurones fusimoteurs gamma) qui permet de moduler le gain du réflexe myotatique en définissant la longueur musculaire servant de point de consigne à la boucle de régulation myotatique (**Fig. 4**).

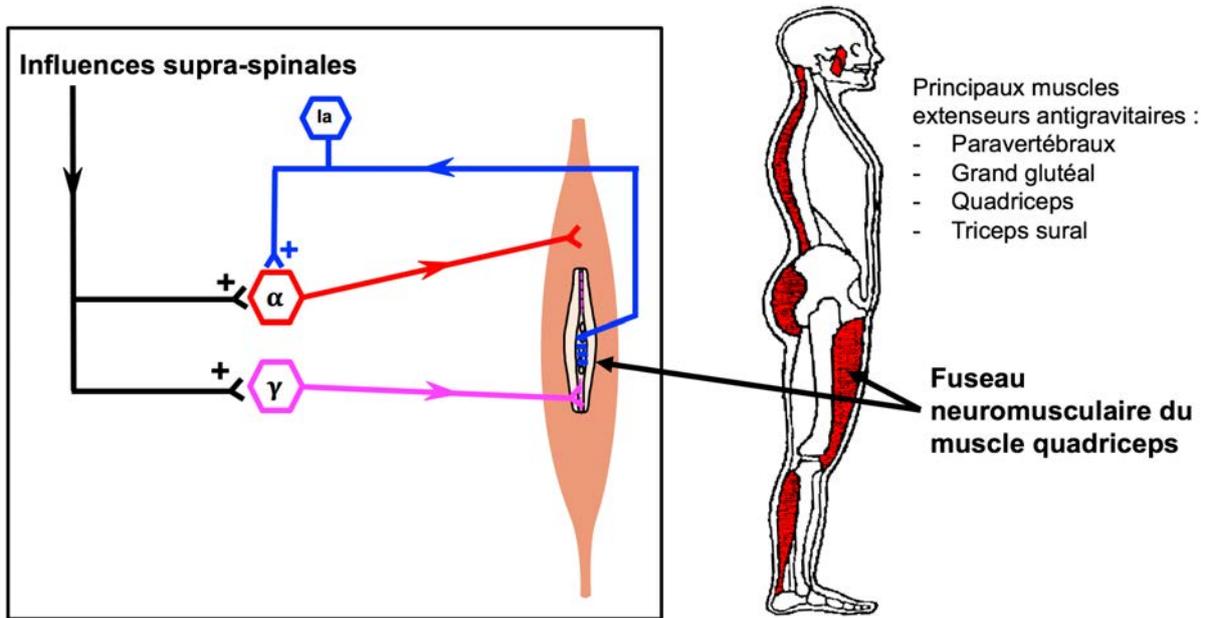


Figure 4. Modulation du tonus musculaire par le réflexe myotatique et les influences supra-spinales.

Les principales influences supra-spinales impliquées dans la modulation du tonus musculaire des muscles extenseurs antigravitaires proviennent des noyaux vestibulaires et de la formation réticulée situés dans le tronc cérébral. La formation réticulée pontique, par le biais du faisceau réticulo-spinal médian, constitue un système excitateur des motoneurones ipsilatéraux. A contrario, la formation réticulée bulbaire, par le biais du faisceau réticulo-spinal latéral, a une influence inhibitrice bilatérale sur les motoneurones. Le tonus musculaire des muscles extenseurs antigravitaires dépend en partie de l'équilibre entre les influences excitatrices pontiques et inhibitrices bulbaires, elles-mêmes influencées par l'état de vigilance : lorsque le niveau de vigilance est élevé, les neurones de la formation réticulée pontique sont très actifs, et inversement lorsque le niveau de vigilance diminue. Le noyau vestibulaire latéral situé dans le bulbe, qui reçoit des afférences en provenance du système otolithique, exerce un effet excitateur sur les motoneurones ipsilatéraux des muscles extenseurs antigravitaires par le biais du faisceau vestibulo-spinal latéral.

1.5.2 Ajustements posturaux

A partir de l'intégration des informations en provenance des afférences posturales et selon les mouvements envisagés, le système nerveux central génère un ensemble coordonné d'actes moteurs permettant à chaque instant de maintenir ou d'adapter une posture en dépit d'évènements pouvant la perturber.

Les **ajustements posturaux anticipés** sont déclenchés avant l'exécution d'actes moteurs volontaires susceptibles de déstabiliser la posture, afin de préparer l'organisme à la perturbation qui va suivre. Par exemple, lorsqu'un sujet debout veut saisir un verre posé devant lui, les premiers muscles à se contracter avant la saisie sont ceux de la loge postérieure de jambe, de cuisse et les paravertébraux : ces ajustements posturaux anticipés permettent de compenser la déstabilisation provoquée par la saisie de l'objet (modification du centre de masse du système). La mise en jeu des ajustements posturaux anticipés fait partie intégrante des programmes moteurs mis en jeu, ce qui signifie que leur mise en jeu correcte nécessite l'intégrité de l'ensemble des structures cérébrales impliquées dans la genèse d'un mouvement : noyaux gris de la base, cervelet et cortex moteurs.

Lorsque les mécanismes moteurs de compensation sont déclenchés a posteriori, les actes moteurs générés mettent en jeu des boucles neurologiques de rétroaction et se nomment **ajustements posturaux réactionnels**. La mise en jeu de ces boucles de contrôle est déclenchée par l'intégration centrale des afférences posturales et la confrontation de l'acte moteur prédit par la copie éfferente du programme moteur et l'acte moteur réel. Il ne s'agit pas d'un mécanisme réflexe, puisque les ajustements posturaux réactionnels peuvent être modulés au cours du temps en fonction d'une pratique ou d'un apprentissage. Par exemple, lorsqu'une personne marche sur une surface glissante et que son pied glisse vers l'avant, il y a des contractions réactionnelles disto-proximales des muscles de la loge antérieure de jambe et de cuisse qui correspondent à des ajustements posturaux réactionnels. Le cervelet, disposé en parallèle sur les voies sensori-motrices, a un rôle important dans le rétrocontrôle des actes moteurs. Par le biais des faisceaux spinocérébelleux dorsal et ventral, il reçoit en permanence des informations en provenance des propriocepteurs périphériques d'une part, et la copie conforme (ou décharge corollaire) de la commande motrice reçue à chaque instant par les motoneurons d'autre part. Le cervelet compare en permanence l'acte moteur réalisé avec

l'acte moteur initialement prévu, ce qui lui permet si nécessaire de modifier la commande motrice pour l'ajuster.

En synthèse, le maintien postural et la réalisation des mouvements sont intégrés dans des processus de régulation en boucle ouverte et boucle fermée : l'exécution d'un mouvement est coordonnée avec des ajustements posturaux anticipés en boucle ouverte pour anticiper son effet déstabilisant, et des boucles fermées de rétrocontrôle permettent d'ajuster le contrôle postural en cas de déstabilisation imprévue liée au mouvement exécuté ou à une autre cause. Une altération des structures impliquées dans la mise en jeu des ajustements posturaux anticipés et réactionnels est un facteur majeur d'instabilité posturale. La **Figure 5** illustre de manière simplifiée les différentes étapes sensori-motrices mises en jeu lors de la production d'un acte moteur volontaire, incluant les ajustements posturaux.

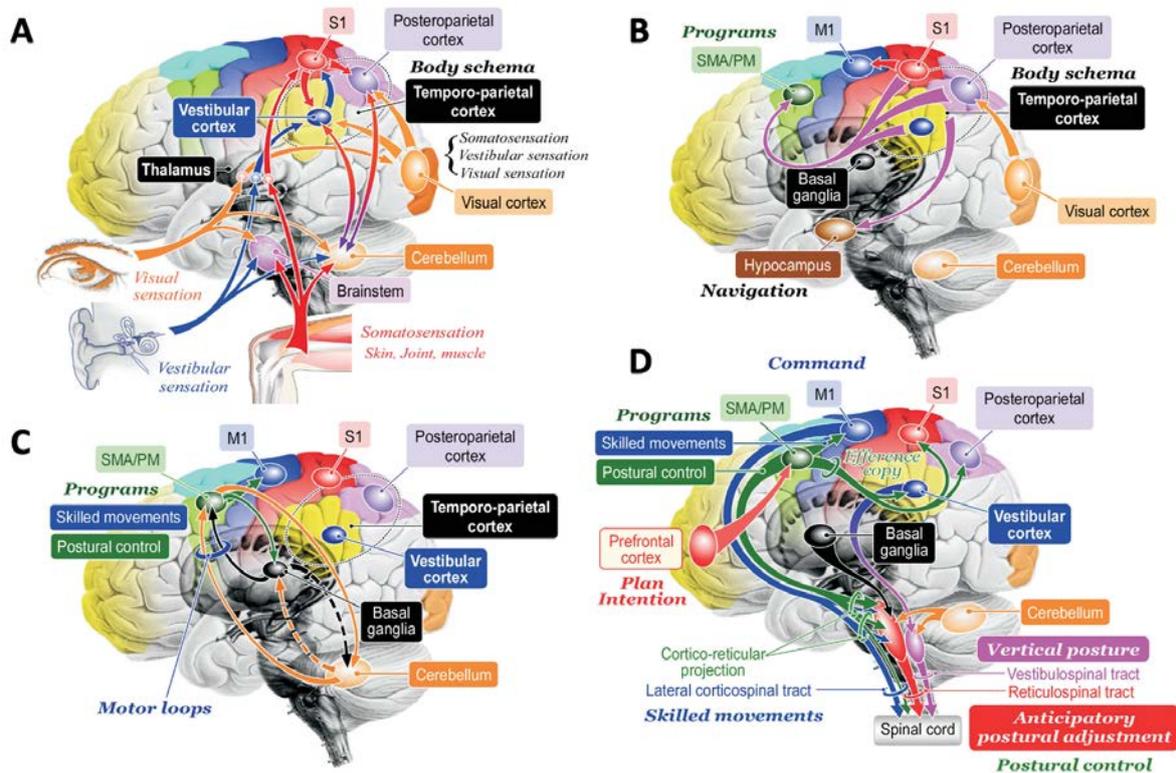


Figure 5. Synthèse des processus cognitifs mis en jeu lors d'un mouvement. **A : Intégration des informations somesthésiques** qui convergent vers le tronc cérébral, le cervelet, le thalamus et le cortex cérébral. Au niveau du cortex cérébral, les signaux du cortex visuel, du cortex vestibulaire et du cortex sensoriel primaire (S1) sont intégrés et un modèle interne du soi, intégrant le schéma corporel et le sens de la verticalité, peut être construit au niveau du cortex temporo-pariétal (incluant le cortex vestibulaire et le cortex pariétal postérieur). Des connexions réciproques entre cortex associatif et cervelet contribuent à ce processus. **B : Transmission des informations vers le cortex moteur.** Les informations sont transmises à l'aire motrice supplémentaire (SMA) et au cortex prémoteur (PM) où elles peuvent être utilisées pour produire des programmes moteur. Des informations sont également transférées à l'hippocampe pour être réutilisées ultérieurement. **C : Programmation motrice.** Les aires corticales motrices coopèrent avec les noyaux gris centraux et le cervelet afin de produire des programmes moteurs appropriés. **D : Production d'actes moteurs par projections corticofuges vers le tronc cérébral et la moelle épinière.** Les informations générées au niveau du cortex temporo-pariétal sont utilisées pour maintenir la posture verticale via les voies cortico-vestibulaire et vestibulospinale. Le cortex préfrontal peut déclencher l'exécution de programmes moteurs dans le SMA/PM, pouvant inclure des mouvements ciblés et des ajustements posturaux. Des ajustements posturaux anticipés peuvent être produits et transmis via les voies cortico-réticulaire et réticulospinale. Les programmes moteurs sont ensuite envoyés au cortex moteur primaire (M1) afin que des mouvements souhaités puissent être réalisés (d'après Takakusaki 2017).

1.6 Physiopathologie de l'instabilité posturale

Le maintien d'une posture orthostatique stable nécessite la mise en jeu de nombreux processus neurologiques et biomécaniques étroitement intriqués. Pour que le contrôle postural soit efficient, une intégrité des systèmes afférents, des systèmes d'intégration et des effecteurs est requise. Lorsqu'une ou plusieurs parties de ces systèmes dysfonctionnent, dans le cadre d'une pathologie neurologique par exemple, le sujet présente une instabilité posturale qui peut se compliquer de chutes aux conséquences potentiellement graves. Le terme d'*ataxie posturale* qualifie spécifiquement l'instabilité posturale.

L'ataxie proprioceptive est secondaire à une perte des afférences proprioceptives des membres inférieurs et éventuellement du tronc. Dans les atteintes complètes, le maintien d'une position orthostatique et la marche ne sont pas possibles sans aide technique. Dans les formes partielles, les plus fréquentes, les sujets présentent une visiodépendance posturale accrue se traduisant par une instabilité augmentée dans l'obscurité ou les yeux fermés. Le test de Romberg est classiquement positif les yeux fermés avec des chutes multidirectionnelles. La marche est également altérée avec une démarche talonnante.

L'ataxie vestibulaire est secondaire à la perte partielle ou totale des afférences vestibulaires. Dans tous les cas, en plus des signes spécifiques de l'atteinte vestibulaire, comme en cas d'ataxie proprioceptive, les sujets présentent une visiodépendance posturale accrue se traduisant par une instabilité augmentée dans l'obscurité ou les yeux fermés. Lorsque l'atteinte vestibulaire est unilatérale, le test de Romberg est positif les yeux fermés avec des chutes latéralisées du côté atteint qui est hypotonique. La marche aveugle peut également être déviée du côté atteint. La visiodépendance accrue des sujets les rend plus sensibles aux situations de conflit sensoriel où l'information visuelle est manipulée.

L'ataxie cérébelleuse est secondaire à une atteinte cérébelleuse (particulièrement du vermis) ou des voies cérébelleuses correspondantes. Le cervelet étant placé en parallèle sur les systèmes de planification et d'exécution du mouvement, son contrôle s'effectue indépendamment des conditions de disponibilité sensorielle. Le test de Romberg est caractérisé par une instabilité présente les yeux ouverts avec une danse des tendons mieux visible sur la face antérieure de cheville, et parfois un élargissement du polygone de sustentation rendant impossible le maintien de la position pieds-joints. La fermeture des yeux

ne provoque classiquement pas de dégradation majeure de l'instabilité (pas de visiodépendance posturale majorée). La marche est généralement perturbée avec un élargissement du polygone de sustentation (marche sur une ligne impossible) et une démarche festonnante dite pseudo-ébrieuse.

Il existe une instabilité posturale dans le cadre du **syndrome parkinsonien** lié à l'atteinte des neurones dopaminergiques de la substance noire. Les noyaux gris de la base ont des rôles multiples, certains concernant la préparation et l'initiation du mouvement ainsi que le changement rapide de stratégie motrice. Dans le cadre du syndrome parkinsonien, une des raisons de l'instabilité posturale correspond à la perte des ajustements posturaux anticipés et réactionnels, ne permettant plus une correction adaptée des déséquilibres posturaux.

Une situation d'instabilité posturale particulière en rétropulsion correspond aux **ataxies frontales**, secondaires à des atteintes frontales et se démasquant parfois après un alitement prolongé. La tendance à chuter en arrière est classiquement aggravée à la fermeture des yeux, et peut se manifester en position assise. De manière concomitante, il peut exister une véritable apraxie de la marche, nommée astasie-abasie dans sa forme maximale où le sujet ne peut pas se tenir debout et marcher en l'absence de tout déficit moteur.

Certaines ataxies entrent dans le cadre de **troubles fonctionnels** somatoformes. Dans ces situations, il y a souvent une dissociation entre l'importance des signes subjectifs et visibles d'une part, et l'absence de signe objectif de toute atteinte neurologique ou orthopédique et de conséquence traumatique de l'instabilité d'autre part.

En pratique clinique, toutes les situations d'instabilité posturale ne se résument pas aux situations décrites ci-dessus, étant donné que les sujets présentent souvent plusieurs déficiences neurologiques et/ou orthopédiques intriquées. L'exemple typique correspond à **l'instabilité posturale du sujet âgé qui est polyfactorielle**, liée à un vieillissement physiologique de l'ensemble des structures et fonctions impliquées dans le maintien postural.

1.7 Évaluation d'une instabilité posturale

En pratique clinique, l'évaluation de la stabilité posturale revient à quantifier les oscillations posturales d'un sujet debout, de manière clinique ou instrumentale. L'évaluation clinique est incontournable, et peut parfois être complétée par une évaluation instrumentale sur plateforme de force pour améliorer la quantification de l'instabilité posturale ou des contributions sensorielles.

1.7.1 **Évaluation clinique**

L'évaluation clinique de la stabilité posturale relève de tests simples, proposés successivement au patient selon ses capacités. Dans un premier temps, la possibilité de maintien d'une posture orthostatique avec ou sans canne et sans contrainte au niveau de la position des pieds est évaluée. Une instabilité posturale peut être en partie compensée par un élargissement du polygone de sustentation se traduisant par une majoration de l'écartement des pieds.

On évalue ensuite la stabilité du patient en réduisant son polygone de sustentation pour sensibiliser la mise en évidence d'une instabilité : position en tandem (un pied devant l'autre sur une même ligne), position pieds joints et appui monopodal. Le test de Romberg correspond spécifiquement à l'évaluation de la stabilité posturale du patient debout pieds nus et joints, d'abord les yeux ouverts puis secondairement les yeux fermés. Si le patient réussit à rester stable sans bouger les pieds durant 30 secondes les yeux ouverts, on lui demande ensuite de fermer les yeux durant 30 secondes. Le test est positif si le patient est obligé de bouger les pieds pour ne pas chuter ou s'il chute (lors de la réalisation de ce test le praticien doit évidemment rester très proche du patient pour limiter le risque de traumatisme !). Si le patient réussit, le praticien peut observer des oscillations plus ou moins importantes mais qu'il est difficile de quantifier. L'observation classique d'une « danse des tendons » au niveau de la cheville en cas d'ataxie cérébelleuse traduit le fait que l'activité des muscles de la jambe est augmentée et moins efficace. La comparaison des capacités de stabilisation posturale entre les conditions yeux ouverts et fermés permet d'évaluer la visiodépendance posturale, qui est classiquement augmentée (avec chute les yeux fermés) en cas d'ataxie vestibulaire et proprioceptive. Le test de Romberg peut être complété par une évaluation de la qualité des ajustements posturaux anticipés (par exemple, en observant les conséquences sur la stabilité posturale d'un mouvement d'élévation des membres supérieurs au-dessus de la tête) ou

réactionnels (par exemple, en exerçant une poussée antéro-postérieure sur le thorax du patient pour évaluer sa stratégie de stabilisation lorsqu'il va chuter vers l'arrière).

Il est ensuite possible d'évaluer les capacités de maintien d'un appui monopodal, cette épreuve étant intégrée à la plupart des échelles cliniques d'évaluation de la stabilité posturale. Enfin, une évaluation plus dynamique est proposée à travers l'observation de la marche et des demi-tours, éventuellement complétée par la marche sur une ligne (épreuve du funambule).

De nombreuses échelles permettent de quantifier l'instabilité posturale et sont utilisables en pratique clinique, deux des plus classiques et génériques étant le *Berg Balance Scale (BBS)* et le *Timed Up and Go Test (TUG)*. Certaines échelles sont spécifiques et adaptées à certaines situations : *Postural Assessment Scale for Stroke (PASS)* après un accident vasculaire cérébral, scores *International Cooperative Ataxia Rating Scale (ICARS)* et *Scale for the Assessment and Rating of Ataxia (SARA)* en cas d'ataxie cérébelleuse.

Généralement les échelles cliniques présentent peu d'effet plancher, mais en revanche elles présentent souvent un effet plafond limitant leur intérêt chez des sujets capables de maintenir un appui unipodal durant quelques secondes.

1.7.2 Évaluation instrumentale

La quantification instrumentale de l'instabilité posturale permet de pallier à la difficulté de quantifier le degré d'instabilité posturale cliniquement, par exemple lors d'un test de Romberg où le sujet ne chute pas mais présente visuellement une augmentation des oscillations posturales. Il y a également un intérêt dans les situations où les échelles cliniques présentent un effet plafond. Cette quantification est parfois utile pour assurer une évaluation objective avant et après un traitement, pour assurer un suivi longitudinal ou pour évaluer les contributions sensorielles au maintien postural ou pour dépister les troubles fonctionnels.

La *posturographie* est un terme générique englobant tous les aspects de l'analyse posturale, des aspects cinématiques jusqu'aux mesures réalisées avec des plateformes de force en conditions statique et dynamique. La *stabilométrie* est le terme consacré pour l'étude de la stabilité posturale sur plateforme de force, qui est une méthode très accessible et simple à mettre en œuvre. La plateforme de force enregistre les positions successives du centre des pressions résultant (**Fig. 6**) au cours du temps, permettant de quantifier indirectement les oscillations posturales du sujet en se basant par exemple sur sa vitesse de déplacement. Elle permet également de quantifier plus ou moins directement les asymétries d'appui selon l'axe médio-latéral (asymétrie entre les deux pieds) ou antéro-postérieur (asymétrie entre avant et arrière-pieds). Idéalement il faut disposer de deux plateformes (une sous chaque pied) pour étudier de manière directe les asymétries d'appui droite-gauche. La contribution des informations visuelles au maintien postural peut être estimée simplement par la comparaison des données chiffrées obtenues en conditions yeux ouverts et yeux fermés (i.e. quantification de la visiodépendance posturale). Il est également possible d'évaluer le retentissement sur le contrôle postural d'une tâche cognitive concomitante chez des patients âgés ou présentant une altération des ressources attentionnelles. Enfin, des dispositifs d'évaluation instrumentale standardisée en conditions dynamiques, tels que l'*Equitest* par exemple, permettent d'évaluer les différentes contributions sensorielles au contrôle postural, l'effet de conflits sensoriels sur la stabilité posturale et les stratégies motrices posturales : ces dispositifs sont très onéreux et réservés à des centres de référence.

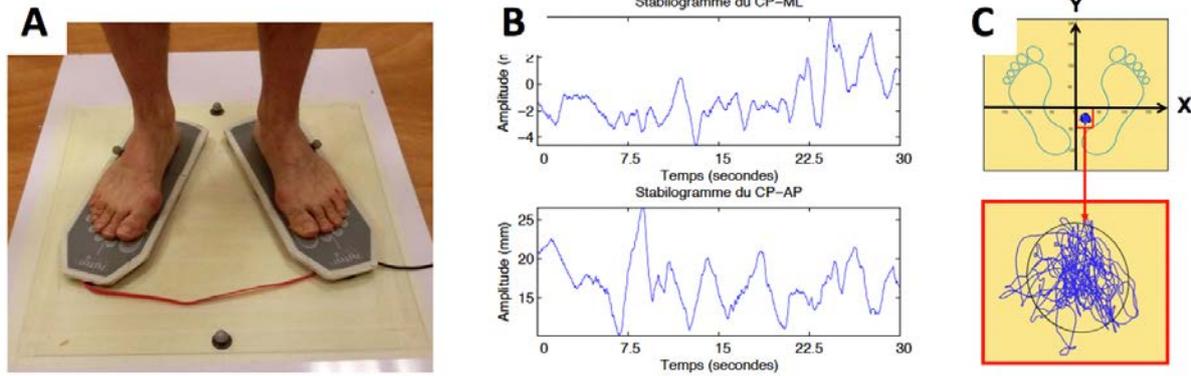


Figure 6. **A** : Les pieds du sujet sont disposés sur deux plateformes de force avec 17 cm d'écart entre le milieu de la partie postérieure des talons et un angle d'ouverture des pieds de 14° vers l'avant (axe passant par le milieu du talon et le 1^{er} métatarsien). **B** : Stabilogrammes correspondant à l'enregistrement des déplacements du centre des pressions au cours du temps selon l'axe médio-latéral et antéro-postérieur. **C** : Statokinésigramme correspondant à la projection dans le plan horizontal XY des déplacements du centre des pressions au cours du temps. La quantification de la vitesse de déplacement du centre des pressions lors de l'acquisition est un paramètre permettant d'évaluer la stabilité posturale du sujet.

1.8 Documents de référence

- Kandel ER, Schwartz JH and Jessell TM (2000). *Principles of Neural Science* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Paillard T (2016). *Posture et équilibration humaines*. Éditions De Boeck Supérieur - Collection Posture, Équilibre et Mouvement.
- Berthoz A (1997). *Le sens du mouvement*. Éditions Odile Jacob.
- McIlroy WE et Maki BE (1997). *Preferred placement of the feet during quiet stance: development of a standardized foot placement for balance testing*. Clin Biomech (Bristol, Avon); 12(1):66-70.
- Richard D et Orsal D (2007). *Neurophysiologie : Organisation et fonctionnement du système nerveux* (3^{ème} ed.). Dunod.
- Ruhe A, Fejer R et Walker B (2010). *The Test-Retest Reliability of Centre of Pressure Measures in Bipedal Static Task Conditions--a Systematic Review of the Literature*. Gait Posture; 32(4):436-445.
- Takakusaki K (2017). *Functional Neuroanatomy for Posture and Gait Control*. J Mov Dis; 10(1):1-7.
- Visser JE, Carpenter MG, van der Kooij H et Bloem BR (2008) *The clinical utility of posturography*. Clin Neurophysiol; 119(11):2424-2436.
- Winter DA (1995). *Human balance and posture control during standing and walking*. Gait Posture; 3:193-214.