

Physiologie et évaluation de la marche

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 sur la physiologie et l'évaluation de la marche. Pour des raisons didactiques, certains phénomènes ont été volontairement omis ou simplifiés et décrits succinctement. Des documents 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	Le cycle de marche	2
1.2	Paramètres spatio-temporels de la marche	5
1.3	Neurophysiologie de la marche	7
1.4	Rappels d'anatomie fonctionnelle de la marche.....	9
1.5	Évaluation de la marche.....	11
1.6	Troubles de la marche et boiteries.....	16
1.6.1	Boiteries de phase d'appui	17
1.6.2	Boiteries de phase oscillante.....	19
1.6.3	Marche hypokinétique à petits pas.....	21
1.6.4	Troubles de la marche d'origine fonctionnelle.....	22
1.6.5	Autres situations.....	22
1.7	Documents de référence	24

Objectifs d'enseignement

1. Connaître la définition du cycle de marche et identifier ses différentes phases.
2. Connaître les paramètres temporels (vitesse, cadence, temps d'appuis unipodal et bipodal) et spatiaux (longueur du pas, longueur d'enjambée, largeur et angle du pas) permettant de décrire la marche.
3. Décrire les principales structures neurologiques impliquées dans la marche (notamment le générateur spinal de marche), en expliquant leurs rôles respectifs.
4. Évaluation - Décrire les principales modalités d'évaluation instrumentale de la marche en pratique clinique.
5. Comprendre quels sont les facteurs d'une marche peu coûteuse sur le plan énergétique.
6. Physiopathologie - décrire les principaux troubles de la marche, en expliquant brièvement leur physiopathologie.

1.1 Le cycle de marche

La marche est le mode de locomotion naturel de l'être humain adulte, combinant le maintien de la station debout et la propulsion. Elle met en jeu de manière combinée et alternée les deux membres inférieurs. Au cours de la marche le corps reste en permanence en contact avec le sol par une succession de doubles appuis et d'appuis unipodaux.

La description du cycle de marche est codifiée, et constitue la base de la description d'une marche normale ou pathologique (**Fig. 1**). Le cycle de marche est défini pour chaque membre inférieur. Il débute par le contact initial du pied, suivi d'une phase d'appui puis d'une phase oscillante, et se termine lors du nouveau contact de ce pied au sol. Lorsqu'on normalise le cycle de marche en pourcentage de 0% (contact initial) à 100% (contact initial suivant), on distingue deux phases :

- **Phase d'appui** correspond à toute la période où le pied est en contact avec le sol. Son début correspond au contact initial (contact du pied avec le sol réalisé par le talon de manière physiologique) et sa fin au décolllement des orteils (perte de contact du pied avec le sol). Pour une vitesse de marche physiologique elle s'étend de 0 à 60% du cycle de marche.
- **Phase oscillante** où le pied n'est plus en contact avec le sol correspond à l'avancée du membre inférieur. Son début correspond au décolllement des orteils et sa fin au contact

initial suivant du même pied. Pour une vitesse de marche physiologique elle s'étend de 60 à 100% du cycle de marche, soit une durée de 40% du cycle de marche.

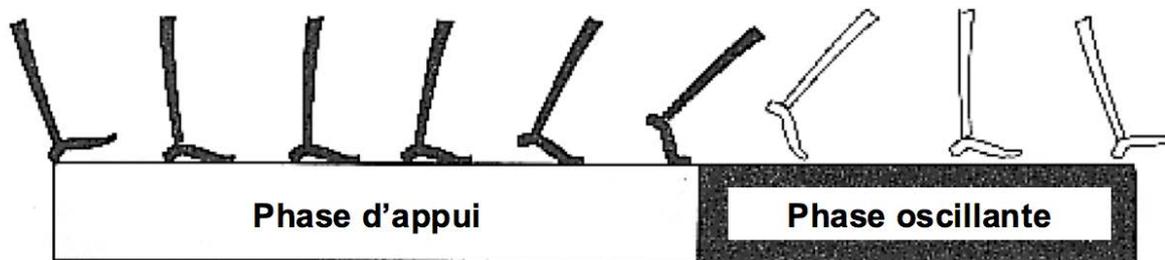
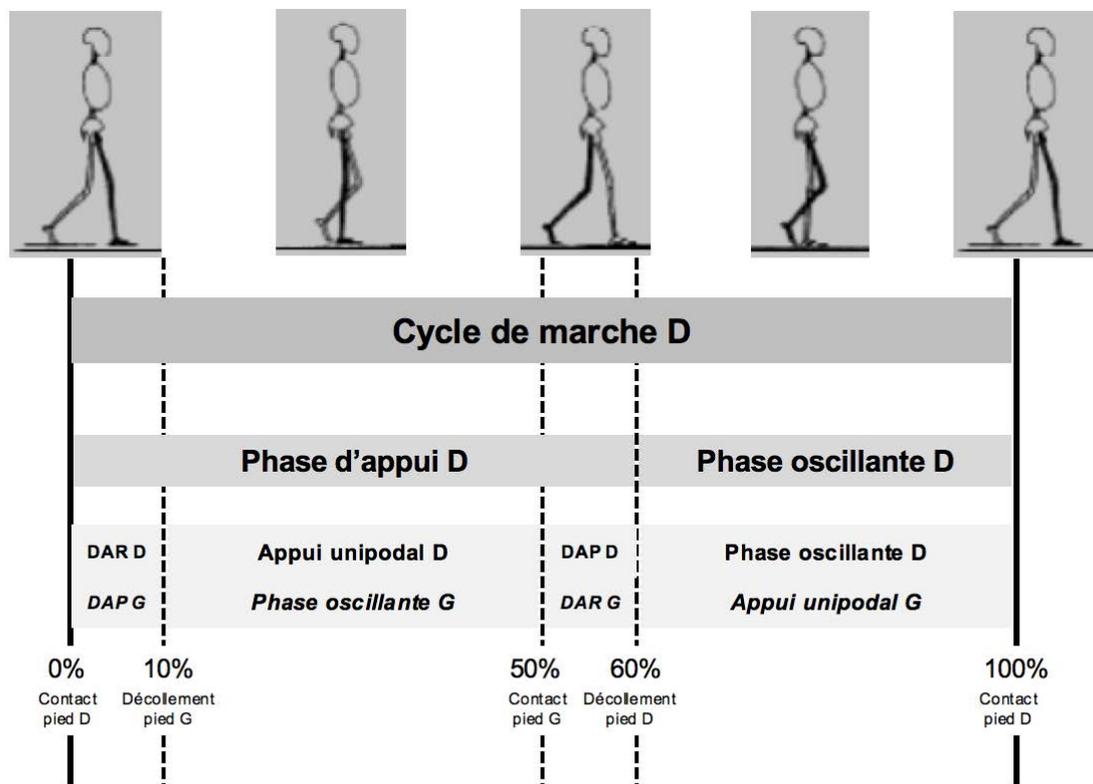


Figure 1 : division du cycle de marche en phase d'appui et phase oscillante (modifié d'après Perry, 1992).

La description du cycle de marche intègre le comportement du pied controlatéral. Si nous décrivons le cycle de marche du pied droit physiologique (Fig. 2), on distingue :

- **Phase de double appui de réception** qui débute avec le contact initial du pied droit, et se poursuit par la mise en charge du membre inférieur droit (transfert du poids du corps du membre inférieur gauche sur le membre inférieur droit). Elle s'étend de 0 à 10% du cycle de marche, soit une durée de 10% du cycle de marche. Au cours de cette phase, les deux pieds sont en contact avec le sol.
- **Phase d'appui unipodal** sur le pied droit (simple appui) qui débute lorsque le pied gauche décolle et se termine lorsque le pied gauche reprend contact avec le sol. Cette phase s'étend de 10 à 50% du cycle de marche, soit une durée de 40% du cycle de marche. Cette phase est concomitante de la phase oscillante du pied gauche.
- **Phase de double appui de propulsion** qui débute lors du contact initial du pied gauche, alors que le pied droit se prépare à décoller (phase de propulsion). Il y a un transfert du poids du corps sur le membre inférieur gauche. Cette phase s'étend de 50 à 60% du cycle de marche, soit une durée de 10% du cycle de marche.
- **Phase oscillante** qui débute avec la perte de contact du pied droit avec le sol et se termine avec le début d'un nouveau cycle de marche (contact initial du pied droit). Cette phase s'étend de 60 à 100% du cycle de marche, soit une durée de 40% du cycle de marche. Cette phase est concomitante de la phase d'appui unipodal du pied gauche.

Un cycle de marche complet comporte deux phases de double appui (20% du cycle au total), une phase d'appui unipodal (40% du cycle) et une phase oscillante (40% du cycle).



Abréviations: D, droit; G, gauche; DAR, double appui de réception; DAP, double appui de propulsion.

Figure 2 : les différentes phases du cycle de marche (modifié d'après Perry, 1992).

La course est caractérisée par deux périodes de sauts (phases de double lévitation) durant lesquelles aucun pied n'est en contact avec le sol. La disparition des temps de double appui, remplacés par des temps de double lévitation, définit la transition entre la marche et la course. Dans le cycle de la course, la durée de la phase d'appui est généralement inférieure à 50% du cycle.

1.2 Paramètres spatio-temporels de la marche

Pour caractériser de manière globale la marche, c'est à dire son déroulement dans l'espace et dans le temps, un certain nombre de paramètres spatiaux et temporels sont décrits.

Les principaux paramètres spatiaux (**Fig. 3**) sont :

- **Le pas** correspond à la progression vers l'avant du pied oscillant par rapport au pied portant. Le pas permet au marcheur de progresser vers l'avant. **La longueur du pas** est définie par la distance (en mètres) de progression vers l'avant du pied oscillant par rapport à l'autre. Autrement dit, la longueur du pas droit correspond à la distance séparant les deux talons lors du temps du double appui de réception droit. Par abus de langage certains parlent de « pas postérieur » pour la distance entre le décollement du pied oscillant et son passage en regard de l'autre ; ce qui correspond en fait au pas (« antérieur » par définition) controlatéral.
- **L'enjambée** correspond à la succession de deux pas. **La longueur d'enjambée** est définie par la distance (en mètres) correspondant à la somme algébrique des longueurs de deux pas successifs.
- **L'angle du pas** (en degrés) correspond à l'angle ouvert en avant formé entre l'axe de progression et l'axe du pied (talon - deuxième métatarsien).
- **La largeur du pas** (en mètres) correspond à la distance entre la partie médiane des deux talons.

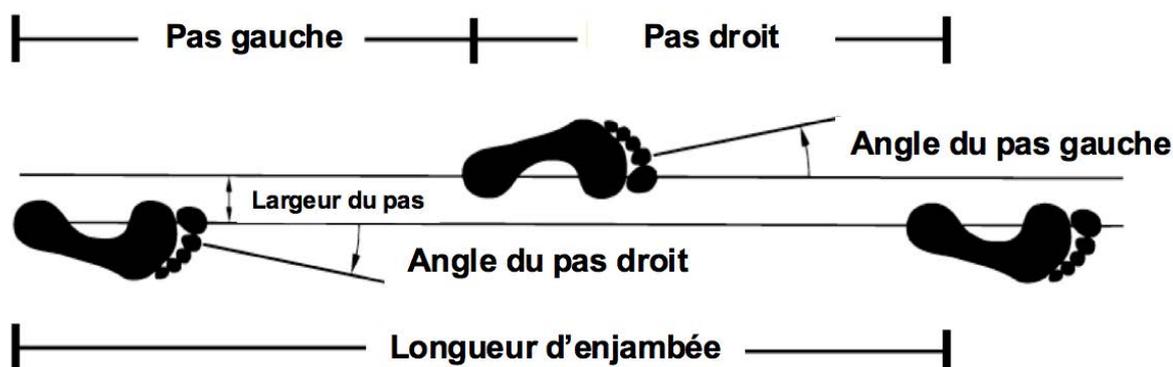


Figure 3 : principaux paramètres spatiaux du cycle de marche (modifié d'après Vaughans, 1999)

Les principaux paramètres temporels sont :

- **La cadence** de marche correspond au nombre de pas par minute.
- **La vitesse de marche**, exprimée en mètres par seconde, est déterminée par une relation mathématique entre la cadence et la longueur d'enjambée :

$$\text{Vitesse de marche (m/s)} = (\text{Longueur d'enjambée} \times \text{Cadence}) / 120$$

Une autre manière de déterminer la vitesse de marche est tout simplement de chronométrer le temps mis par le sujet pour parcourir une distance donnée. **La consigne donnée au sujet est importante puisqu'elle détermine l'allure** : on distingue essentiellement la **vitesse spontanée** (vitesse dite « spontanée ») et la **vitesse maximale**. La connaissance de l'allure est indispensable à l'interprétation de la vitesse de marche.

- **Le temps d'appui bipodal** (en secondes ou en % du cycle de marche) correspond à la durée moyenne des temps de double appui lors d'un cycle de marche.
- **Le temps d'appui unipodal** (en secondes ou en % du cycle de marche) correspond à la durée moyenne du temps d'appui unipodal lors d'un cycle de marche droit ou gauche. Le temps d'appui unipodal d'un côté correspond au **temps oscillant** controlatéral.

Les paramètres spatio-temporels permettent de décrire la marche d'un sujet et de la caractériser en termes d'anomalies spatiales et temporelles. Il est également possible de caractériser une éventuelle asymétrie spatiale (longueur du pas) ou temporelle (temps d'appui unipodal par exemple) du cycle de marche.

Même s'il n'existe pas de norme à proprement parler, la vitesse de marche étant influencée par la taille et l'âge du sujet notamment, nous retiendrons comme ordre de grandeur physiologique :

- Vitesse spontanée : entre 1,2 et 1,6 m/s (soit de 4,3 à 5,8 km/h) ;
- Longueur du pas : autour de 0,8 m ;
- Cadence de marche : entre 100 et 130 pas par minute ;
- Durée d'un cycle de marche : 1 seconde.

1.3 Neurophysiologie de la marche

La marche est une activité motrice automatique nécessitant d'une part le maintien d'un équilibre dynamique, et d'autre part une organisation motrice hiérarchisée et synchronisée. Au cours de la marche il y a des activations musculaires cycliques, coordonnées et automatiques, pouvant être modifiées par le contrôle volontaire, en particulier lors de situations de changement de direction, d'augmentation de la vitesse de marche ou en présence d'obstacles. La marche suppose un **contrôle postural dynamique efficient**, en lien avec une intégrité fonctionnelle des structures gérant le maintien de la stabilisation posturale du sujet : un sujet incapable de maintenir une position érigée stable ne pourra pas marcher de manière indépendante.

De nombreuses structures neurologiques sont impliquées dans la marche (**Fig. 4**). Les muscles des membres inférieurs ont une activité rythmique et synergique sous le contrôle médullaire du **générateur spinal de marche** (GSM). Ce dernier coordonne également l'activité des muscles axiaux au cours de la marche et de la course, responsables de mouvements ondulatoires de la colonne vertébrale. Le GSM est lui-même contrôlé par les structures supra-segmentaires du système nerveux central et son activité est modulée par de nombreux neuromédiateurs aminergiques. Il correspond à un regroupement de neurones en réseau (interneurones), de localisation présumée lombaire (niveau L2), présentant une activité électrique rythmique spontanée. Les principales structures supra-segmentaires impliquées dans le contrôle de la locomotion sont les suivantes :

- Aires locomotrices supra-spinales localisées dans le mésencéphale, le tronc et les noyaux sub-thalamiques, modulant l'activité du GSM ;
- Noyaux gris de la base, notamment le striatum ventral, ayant un rôle important dans l'initiation de la marche et dans son déroulement ;
- Cortex associatif fronto-pariétal jouant un rôle dans la planification de l'action et le choix du programme moteur ;
- Cervelet, qui en plus de son rôle important dans la régulation de la stabilité posturale, participe au contrôle de la marche. Ses efférences sont essentiellement transmises par l'intermédiaire des noyaux vestibulaires, des faisceaux rubro-spinaux et réticulo-spinaux.

Le déclenchement de la marche est sous le contrôle de la volonté en lien avec le cortex cérébral, mais également en lien avec le contexte émotionnel relié au système limbique. Enfin, de nombreuses afférences sensorielles (proprioception périphérique, sensibilité cutanée, afférences vestibulaires, visuelles et auditives) interviennent dans le contrôle de la marche, permettant une adaptation permanente aux contraintes internes (déplacement des membres supérieurs par exemple) et externes (franchissement d'obstacles par exemple).

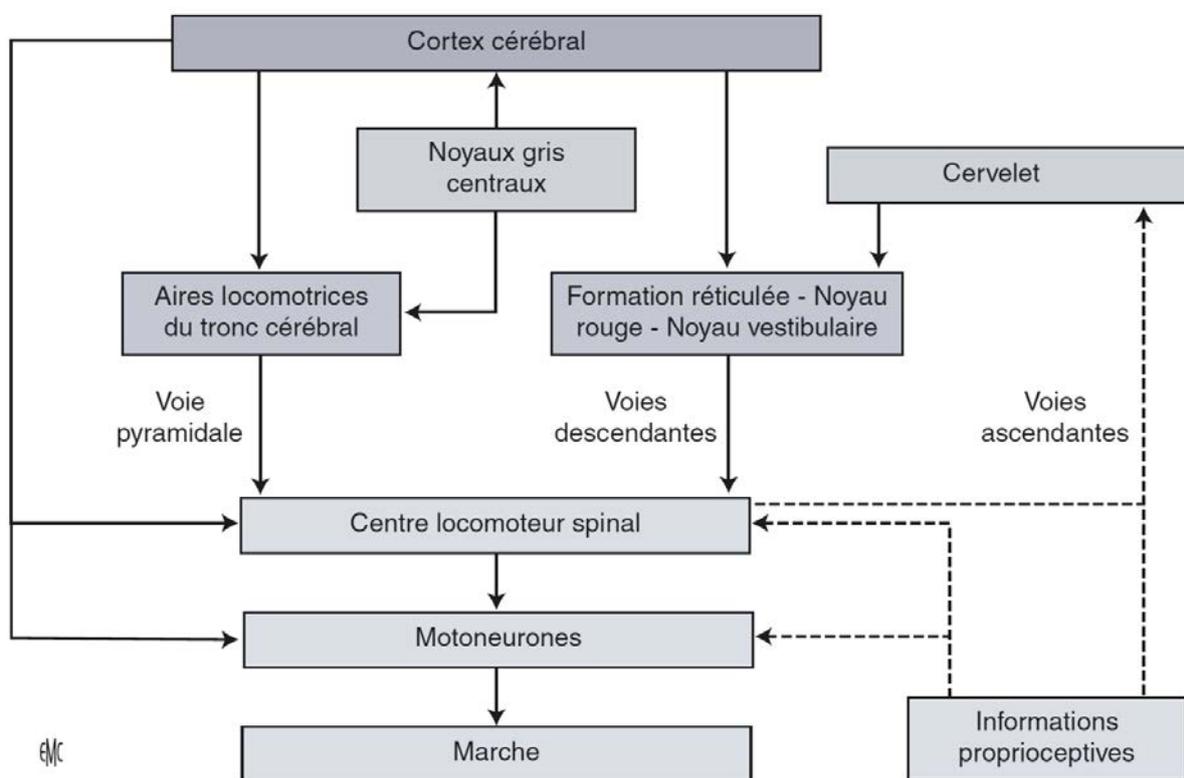


Figure 4 : principales structures neurologiques impliquées dans l'organisation de la marche, d'après Defebvre, 2010.

1.4 Rappels d'anatomie fonctionnelle de la marche

Sur le plan anatomique, quelques muscles sont indispensables à connaître pour comprendre la physiopathologie de la marche. Leur fonction diffère selon qu'ils agissent en chaîne cinétique ouverte ou fermée. La **Fig. 5** et le **tableau II** (chapitre suivant) illustrent le rôle des principaux muscles au cours du cycle de marche.

- **Grand glutéal** : il s'insère sur la partie dorsale de la crête iliaque jusqu'au versant postéro-latéral du sacrum et du coccyx, pour se terminer sur le grand trochanter et le tractus ilio-tibial. Il est innervé par le nerf glutéal inférieur. Ses fonctions principales sont de contrôler la flexion de hanche au contact initial, et de réaliser l'extension de hanche lors de la phase d'appui jusqu'en phase de propulsion.
- **Glutéal moyen** : il s'insère sur la face latérale de l'ilion et sur la face latérale du grand trochanter. Il est innervé par le nerf glutéal supérieur. Sa fonction principale n'est pas l'abduction de la hanche qui a un intérêt limité lors de la marche, mais le verrouillage de la hanche et du bassin lors de l'appui unipodal. Le muscle stabilise le bassin et donc le tronc lors de l'appui unipodal, contrôlant la chute du bassin vers le membre inférieur oscillant.
- **Ilio-psoas** : en proximal, le psoas s'insère sur les vertèbres et les processus transverses de T12 à L4 alors que l'iliaque s'insère dans la fosse iliaque. En distalité, il a une terminaison commune sur le petit trochanter. Il est innervé par des branches collatérales du plexus lombaire et le nerf fémoral. Sa fonction principale est de fléchir la hanche lors de la phase de double appui de propulsion et le début de la phase oscillante.
- **Quadriceps** : c'est un muscle volumineux situé à la face antérieure de la cuisse. Il est composé de 4 chefs (le droit fémoral, le vaste latéral, le vaste intermédiaire et le vaste médial) se terminant par le tendon quadricipital. Le tendon quadricipital s'insère sur la base de la patella qui est prolongée par le ligament patellaire, ce dernier s'insérant sur la tubérosité tibiale antérieure au niveau du tibia. Le quadriceps est innervé par le nerf fémoral. Sa fonction principale est le maintien de l'extension du genou au contact initial et en début de phase d'appui.
- **Ischio-jambiers**, au nombre de trois : biceps fémoral, semi-tendineux et semi-membraneux. Ils sont innervés par le nerf sciatique. Au cours de la marche, ils n'ont pas de rôle dans la flexion du genou, mais au contraire un rôle dans le contrôle de l'extension du genou en fin de phase oscillante (activité excentrique). Si ces muscles

sont hyperactifs ils sont responsables d'une impossibilité d'étendre correctement les genoux au contact initial et en phase d'appui.

- **Tibial antérieur** : il s'insère sur le versant latéral de la tubérosité tibiale, les deux tiers proximaux de la face latérale du tibia et sur la partie adjacente de la membrane interosseuse. Il se termine sur le bord médial de l'os cunéiforme médial et la base du premier métatarsien. Il est innervé par le nerf fibulaire profond. Le tibial antérieur est fléchisseur de cheville et participe à l'inversion : c'est le muscle releveur du pied. Sa paralysie entraîne une flexion plantaire précoce lors du contact initial (perte de l'activité excentrique) et l'absence de dorsiflexion lors de la phase oscillante (perte de l'activité concentrique).
- **Triceps Sural**, composé de 3 chefs musculaires : les gastrocnémiens (latéral et médial) qui s'insèrent sur les tubercules supra-condyliques des condyles fémoraux et le muscle soléaire qui s'insère sur la face dorsale du tibia (ligne du muscle soléaire) et la face dorsale de la fibula. Le muscle se termine par le tendon calcanéen sur la tubérosité du calcaneus. Il est innervé par le nerf tibial. Il est fléchisseur plantaire et participe à la stabilisation de la jambe sur le pied lors de la station debout. Il joue un rôle important lors de la propulsion (activité concentrique), mais également dans le contrôle de l'avancée du tibia sur le dôme talien en phase d'appui (activité excentrique).

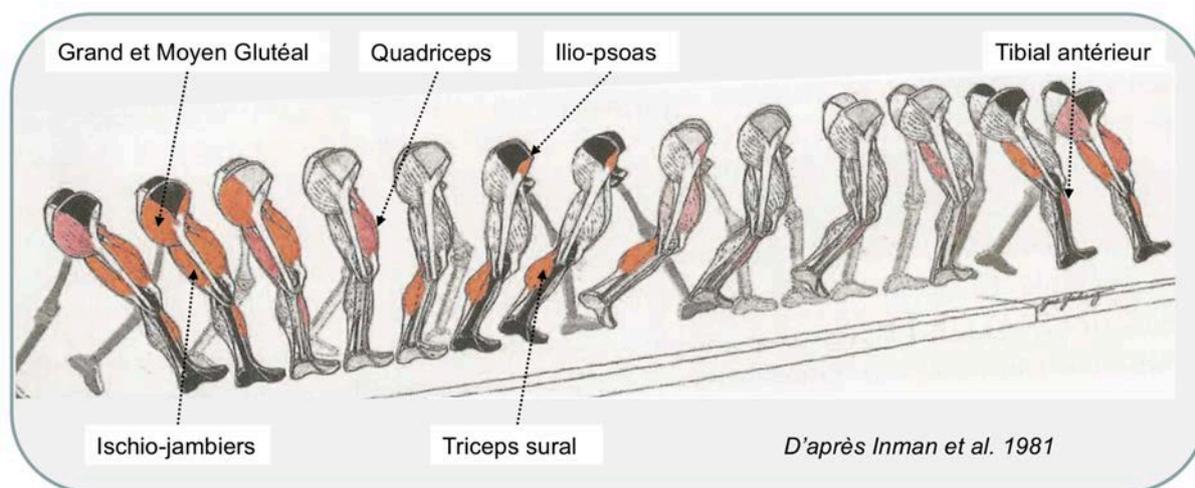


Figure 5 : Activations musculaires (muscles profonds en noir et muscles superficiels colorés en rose ou rouge) au niveau du membre inférieur droit au cours d'un cycle de marche droit.

En synthèse, on retiendra que toute altération ou dysfonctionnement d'une ou plusieurs structures neurologiques et/ou anatomiques sont susceptibles de modifier les caractéristiques de la marche.

1.5 Évaluation de la marche

La compréhension de la marche physiologique est un préalable nécessaire à l'étude de la marche pathologique. Nous étudierons les caractéristiques de la marche normale à travers les principaux outils d'exploration de la marche actuellement utilisés.

Le schéma ci-après (**Fig. 6**) distingue trois méthodes d'évaluation de la marche. La plus intuitive et naturelle correspond à l'observation visuelle clinique, avantageusement complétée par l'analyse vidéographique. La seconde méthode permet de quantifier les paramètres spatio-temporels de la marche. La troisième méthode nommée Analyse Quantifiée de la Marche ou AQM, est beaucoup plus exhaustive. L'AQM correspond à l'acquisition synchronisée de données cinématiques, cinétiques (plates-formes de force) et électromyographiques du sujet en train de marcher, ce qui permet de quantifier les angles articulaires, les forces de réaction du sol et les activations musculaires. Les paramètres spatio-temporels sont également obtenus lors d'une AQM.

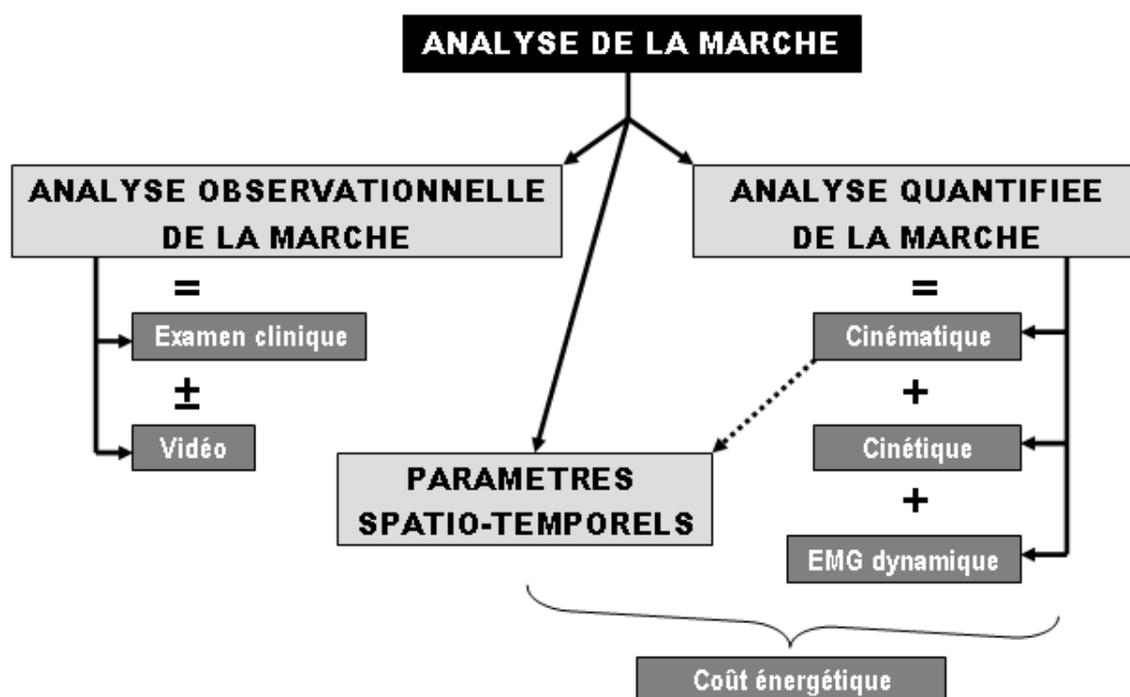


Figure 6 : les différentes méthodes d'évaluation de la marche.

L'examen clinique est incontournable pour caractériser un trouble de la marche. Il doit au minimum comporter un examen orthopédique (douleurs, mobilités articulaires et extensibilité tendino-musculaire) et neurologique des membres inférieurs, en n'omettant pas l'évaluation des capacités de stabilisation posturale (recherche d'une ataxie).

L'observation visuelle simple de la marche permet souvent d'appréhender les principales anomalies de mouvement, mais il s'agit d'une analyse qualitative. **L'analyse vidéographique** de face et de profil reste le moyen le plus simple d'analyser les mouvements trop rapides ou d'amplitude trop faible pour être correctement appréhendés par notre système visuel et constitue un véritable prolongement de l'examen clinique. L'analyse vidéographique se développe car il s'agit d'une instrumentation mobile et d'un coût abordable. Elle permet de figer l'image sur les moments clés du cycle de marche pour mieux caractériser les anomalies de la marche. L'utilisation de l'analyse vidéographique permet de quantifier les anomalies de la marche en s'appuyant sur des échelles dédiées. Elle a l'intérêt de pouvoir être archivée pour comparer l'évolution des caractéristiques de la marche d'un sujet, avant et après traitement par exemple.

Le recueil des **paramètres spatio-temporels** de la marche relève d'une procédure assez simple, qu'il est possible de réaliser avec ou sans aide technique (chaussage, canne). Le chronométrage du sujet sur une distance donnée permet d'obtenir la vitesse de marche. Différents outils permettent d'assurer le recueil des données : dispositif filaire (Locomètre), stations inertielles embarquées ou nappes de capteurs de pression. La tendance est d'utiliser des capteurs embarqués permettant une étude de la marche en situation écologique pour monitorer l'activité physique des personnes en situation de vie quotidienne (holter de marche).

L'analyse vidéographique tend à se développer pour permettre de faire de l'analyse cinématique 2D voire 3D, mais il ne s'agit pas encore d'une technique de référence. **L'analyse quantifiée de la marche (AQM)** désigne un examen combinant l'acquisition synchronisée des données cinématiques, cinétiques et électromyographiques d'un sujet en train de marcher. La **cinématique** correspond à l'étude des angles articulaires au cours du cycle de marche. Les systèmes optoélectroniques restent actuellement la référence pour obtenir les coordonnées spatiales tridimensionnelles d'un point donné au cours du temps. Le

principe est de modéliser les segments et les articulations à partir de marqueurs disposés sur la peau, pour calculer les mouvements des différents segments et articulations dans les trois plans de l'espace. **La cinétique** correspond à l'étude des forces et moments de force qui s'exercent sur un objet. Pour l'AQM, la force étudiée correspond à la force de réaction du sol, enregistrée par des plateformes de force intégrées dans le plancher du laboratoire de marche. Dans le cadre d'une analyse de la marche, **l'électromyographie (EMG) dynamique** permet de déterminer les séquences d'activation des différents muscles au cours du cycle de marche. L'EMG dynamique peut être réalisée par des enregistrements de surface avec des électrodes collées sur la peau en regard des muscles étudiés, ou par des enregistrements intramusculaires (électrodes-fils) permettant d'accéder aux muscles profonds. On parle d'activité prématurée si un muscle se contracte trop tôt dans le cycle de marche par rapport à la normale, d'activité prolongée si celle-ci dure plus longtemps que la normale et d'activité permanente si le muscle est actif tout au long du cycle de marche.

L'AQM est un examen long et complexe à mettre en œuvre, indiqué uniquement chez des patients présentant un trouble de la marche complexe, souvent dans le cadre d'une pathologie neurologique centrale avant un traitement chirurgical. Cet examen permet de mieux comprendre les anomalies de la marche, l'objectif étant de distinguer les anomalies primaires qu'il convient de traiter dans la mesure du possible, des anomalies secondaires ou compensatoires qu'il faut respecter.

Les données cinématiques et électromyographiques clefs à retenir pour comprendre les boîtiers sont présentées dans les **tableaux I et II** ci-après.

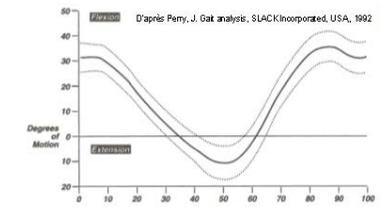
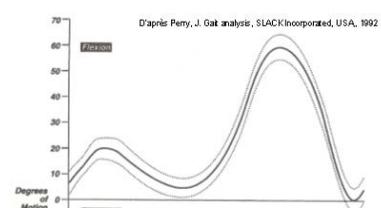
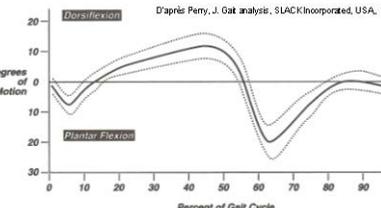
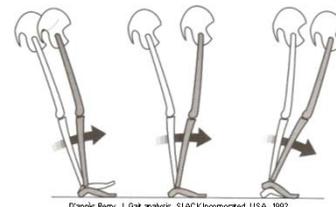
Tableau II : schématisation des principales activations musculaires des membres inférieurs lors d'un cycle de marche.

Groupes musculaires	Phase APPUI	Phase OSCILLANTE
Stabilisateurs du bassin → <i>Glutéal (grand et moyen)</i>	+	-
Fléchisseurs de hanche → <i>Ilio-psoas</i>	-	+
Extenseurs de genou → <i>Quadriceps</i>	+	-
Releveurs du pied → <i>Tibial antérieur</i>	-	+
Extenseurs du pied → <i>Triceps sural</i>	+	-

Au cours de la marche, les muscles présentent majoritairement une activité excentrique frédatrice. Gage (1991) a décrit cinq prérequis pour une marche physiologique :

1. **Pré-positionnement adéquat à l'attaque du pas** : cheville en position neutre, contact par le talon avec le genou en extension quasi-complète.
2. **Stabilité en phase d'appui** : appui plantigrade, cheville et genou stables.
3. **Liberté de passage du pied pendant la phase oscillante** : implique une flexion des articulations du membre inférieur.
4. **Longueur du pas adéquate** : elle est nécessaire à la progression vers l'avant. Elle nécessite une extension de hanche et de genou correctes, une propulsion suffisante ainsi qu'un appui stable du côté controlatéral.
5. **Conservation de l'énergie permettant une marche efficiente** : en conditions physiologiques, la marche est un processus conçu pour être peu coûteux sur le plan énergétique avec une utilisation importante de l'énergie cinétique, notamment pour assurer le déplacement du membre oscillant. Tout processus modifiant la vitesse ou altérant le déroulement de la marche génère un surcoût énergétique.

Tableau I : Principales données de cinématique articulaire des membres inférieurs dans le plan sagittal lors de la marche.

	Contact initial et double appui réception	Phase d'appui unipodal	Double appui propulsion = phase pré-oscillante	Phase oscillante	Courbes types
HANCHE	Flexion de 30°	Passage vers une extension de 10°	Retour en position neutre	Flexion de 30°	
GENOU	Extension 0° puis flexion de 20° (amortissement)	Retour en extension complète	Flexion de 0 à 30°	Flexion de 30 à 60° Puis retour vers l'extension	
CHEVILLE	Position neutre à 0°	Dorsiflexion de 0 à 15°	Extension de 0 à 20°	Retour à 0°	
PIED	Contact taligrade 1 ^{er} pivot autour du talon	Appui plantigrade (plante du pied) 2 ^{ème} pivot autour du talus	Appui digitigrade (avant-pied et orteils) 3 ^{ème} pivot au niveau de l'avant-pied	-	
Fonction	Mise en charge et amortissement.	Supporter la charge. Avancée du tibia.	Propulsion. Préparer le membre à avancer.	Raccourcir le membre pour passer le pas	

1.6 Troubles de la marche et boiteries

La boiterie qualifie une marche qui est irrégulière à l'observation, et éventuellement à l'audition. Cependant, certaines marches sont régulières d'apparence mais ne sont pas pour autant physiologiques. **Les troubles de la marche** sont nombreux et dépassent la simple définition de la boiterie. Un certain nombre de troubles de la marche sont stéréotypés, et correspondent en général à une ou quelques causes bien identifiées.

Les causes des troubles de la marche sont en général des lésions du système nerveux central ou périphérique, ou des pathologies du système musculo-squelettique, qui sont parfois associées. La connaissance des impératifs des différentes phases de la marche normale facilite la description et l'analyse d'un trouble de la marche. L'observation ou l'analyse d'une vidéo de la marche sont effectuées chez un sujet déshabillé et pieds-nus sur une dizaine de mètres. On relève l'utilisation éventuelle d'aides techniques (canne simple ou tripode, béquille, déambulateur, releveur de pied, chaussage orthopédique).

La recherche d'une cause au trouble de la marche nécessite toujours un examen clinique complet du sujet, parfois complété par les différents examens présentés précédemment et d'autres examens complémentaires (imagerie par exemple).

De manière didactique, nous proposons de classifier les anomalies de la marche en plusieurs grandes catégories :

- Boiteries de phase d'appui = esquive d'appui, instabilité articulaire ou instabilité posturale ;
- Boiteries de phase oscillante = défaut de raccourcissement ou de progression ;
- Marche hypokinétique à petits pas du syndrome parkinsonien ;
- Troubles de marche psychogènes ;
- Autres anomalies de la marche.

1.6.1 Boiteries de phase d'appui

Les boiteries de phase d'appui sont généralement liées à une douleur lors de la mise en charge du membre inférieur, un défaut de stabilisation d'une ou plusieurs articulations ou à une instabilité du sujet (ataxie).

Boiterie d'esquive

La boiterie d'esquive correspond à un évitement de l'appui du côté douloureux, qui se manifeste par une nette diminution du temps d'appui unipodal. Elle est liée à la présence d'une douleur à la mise en charge du membre inférieur. La cause de la douleur peut être extrêmement variée : verrue ou corps étranger plantaire, pathologie podale (névrome de Morton), pathologie osseuse (tumeur, fracture de fatigue), gonarthrose et coxarthrose. Si la douleur est podo-surale, sa localisation peut occasionner la perturbation de certains temps du cycle de marche uniquement : phase de double appui de propulsion altérée par une pathologie douloureuse de l'hallux par exemple. Le traitement correspond à supprimer la cause de la douleur. Les patients sont améliorés par le port d'une canne controlatérale en général, qui permet de diminuer les contraintes sur l'articulation douloureuse lors de l'appui unipodal.

Boiterie de Trendelenburg

Le signe de Trendelenburg correspond à la majoration de l'abaissement du bassin du côté oscillant, associée à une inclinaison compensatrice du tronc du côté de l'appui. La cause principale de cette boiterie correspond à une insuffisance fonctionnelle du muscle glutéal moyen du côté de l'appui, qu'elle soit d'origine neurologique (déficit radiculaire L5), musculaire (myopathie, rupture du tendon) ou antalgique (coxarthrose). Ce type de boiterie peut également se voir lorsque le sujet présente une largeur excessive du pas ou en présence d'une anisomélie (asymétrie de longueur) des membres inférieurs importante.

Lorsque cette boiterie est bilatérale (en cas de myopathie par exemple), on parle de **démarche dandinante**. Cette boiterie est parfois appelée boiterie de Duchenne car classique dans la myopathie de Duchenne responsable d'un déficit musculaire bilatéral des ceintures.

Boiterie dite « avec salutation »

Cette boiterie s'analyse de profil. Lors de l'avancée du tibia du membre portant, le patient réalise une flexion antérieure du tronc, comme pour saluer. Deux causes principales expliquent l'antéflexion du tronc :

- (1) Le défaut d'extension de hanche, souvent en rapport avec une rétraction des fléchisseurs de hanche ou une coxopathie, nécessite une antéflexion compensatrice du tronc lors de la phase de double appui de propulsion afin de pouvoir effectuer un pas controlatéral. Le pas controlatéral est d'ailleurs souvent raccourci du fait de la perte d'extension de hanche.
- (2) La perte de force du quadriceps, qui ne peut plus assurer le contrôle de l'extension du genou. L'inclinaison antérieure du tronc place la projection du centre de masse du sujet en avant du centre articulaire de genou, ce qui positionne le genou en extension de manière passive.

Marches ataxiques

Ataxie proprioceptive

La marche ataxique est consécutive à **une ataxie sensitive** (proprioceptive en général). La marche est caractérisée par un élargissement du polygone de sustentation, une attitude éventuelle en balancier des membres supérieurs, ainsi que par une augmentation des temps de double appui au prorata des phases d'appui unipodal. Le patient avance souvent en regardant ses pieds et le sol. La marche est parfois **talonnante**, ce qui correspond à un contact plus brutal que la normale (audible le plus souvent) entre le talon et le sol lié à l'hypoesthésie. L'instabilité du sujet est souvent responsable de chutes, notamment en condition de privation visuelle (dans l'obscurité). La prescription d'une aide technique telle qu'un déambulateur permet souvent de stabiliser les sujets.

Ataxie cérébelleuse

La marche du sujet cérébelleux est également nommée « **pseudo-ébrieuse** ». Elle est caractérisée par une démarche **festonnante** (qui ne se fait pas en ligne droite) avec des embardées latérales plus ou moins amples. Il y a un élargissement du polygone de sustentation (impossibilité de marcher sur une ligne, dite « marche du funambule »), une attitude éventuelle en balancier des membres supérieurs, ainsi qu'une augmentation des temps de double appui au prorata des phases d'appui unipodal. La prescription d'une aide technique telle qu'un déambulateur lesté permet parfois de stabiliser les sujets.

Ataxie vestibulaire

Le sujet qui présente un syndrome vestibulaire périphérique a généralement une marche déviée du côté lésé, notamment les yeux fermés. Des chutes sont possibles, surtout les yeux fermés. En cas d'origine centrale le sujet est surtout gêné par une instabilité sans déviation latéralisée.

Formes associées

L'association d'une ataxie proprioceptive et d'un syndrome cérébelleux peut se voir dans la maladie de Friedreich (ataxie spinocérébelleuse) ou la sclérose en plaques par exemple. Une marche ataxique peut être associée à une raideur des membres inférieurs secondaire à une atteinte pyramidale (démarche cérébello-spasmodique) dans certaines pathologies comme la sclérose en plaques par exemple.

Astasie-Abasie

L'**astasie** correspond à l'instabilité en station debout avec rétroimpulsion spontanée générant des chutes. L'**abasie** correspond à l'impossibilité de marcher en dehors de la présence de tout syndrome parkinsonien ou pyramidal. Ce trouble de la marche s'observe essentiellement chez le sujet âgé suite à une chute ou un alitement prolongé. Dans sa forme la plus sévère s'y associe une phobie de la marche confinant le sujet au fauteuil : on parle alors de **staso-basophobie**.

1.6.2 Boiteries de phase oscillante

Les boiteries de phase oscillante sont généralement liées à un défaut de raccourcissement du membre inférieur gênant le passage du pas en début et milieu de phase oscillante et/ou à un défaut de motricité assurant la progression du membre inférieur oscillant.

Étiologies du défaut de raccourcissement

Le défaut de raccourcissement concerne le plus souvent la cheville, le genou et/ou la hanche. Il s'agit de l'anomalie de la marche la plus fréquente en présence d'un syndrome pyramidal.

Au niveau de la cheville, le défaut de relevé du pied en phase oscillante peut être lié à une parésie des releveurs de pied et/ou à une cocontraction pathologique des muscles de la loge postérieure de jambe, parfois associé à une rétraction musculo-tendineuse du triceps sural ou à une raideur articulaire de cheville. La déformation résultante correspond en général à une attitude en équin plus ou moins associée à un varus (équin-varus). En pathologie neurologique périphérique, il y a généralement essentiellement un pied tombant (équin), alors qu'en cas de pathologie neurologique centrale il y a souvent un équin-varus en partie secondaire à une hypertonie pathologique de la loge postérieure de jambe en phase oscillante. Cette déformation est généralement réductible dans un premier temps, puis évolue parfois vers une rétraction musculo-tendineuse. La présence d'un équin est responsable d'un contact initial sur l'avant-pied ou les orteils (digitigrade) alors que le varus est responsable d'un contact initial sur le bord latéral du pied.

Le défaut de flexion du genou est souvent polyfactoriel, favorisé par un défaut de flexion active de hanche, une vitesse de marche faible, un défaut de propulsion et des troubles sensitifs. Il est parfois favorisé par une hyperactivité du quadriceps ou des ischio-jambiers en double appui de propulsion ou lors de la phase oscillante, et plus rarement secondaire à une raideur articulaire. Cette boiterie est classique chez les patients présentant une hémiplégie spastique après un accident vasculaire cérébral.

Le défaut de flexion de hanche est le plus souvent lié à une parésie des muscles fléchisseurs de hanche ou à une cocontraction pathologique des extenseurs de hanche, et plus rarement à une raideur articulaire. Il est généralement accompagné d'un défaut de flexion de genou secondaire.

Plus rarement, le défaut de raccourcissement peut être lié à une majoration de l'abaissement du bassin du côté oscillant secondaire à un défaut de verrouillage par le muscle glutéal moyen controlatéral ou à une inégalité de longueur des membres inférieurs significative.

En cas d'atteinte motrice des deux membres inférieurs (paraparésie ou tétraparésie), il peut y avoir un défaut de raccourcissement bilatéral. Le membre inférieur est avancé par la combinaison d'une inclinaison latérale du tronc controlatérale et une rotation horizontale antérieure homolatérale du bassin. Lorsque le sujet utilise deux cannes pour se déplacer en projetant le bassin et les membres inférieurs de manière concomitante, on parle de **marche pendulaire**. Si une adduction des cuisses trop importante entraîne un croisement des cuisses au contact initial, on parle de **démarche « en ciseaux »**.

Compensations du défaut de raccourcissement

Le défaut de raccourcissement du membre inférieur en phase oscillante nécessite la mise en place de stratégies compensatoires pour pouvoir passer le pas et avancer le membre inférieur. On peut retenir comme principales stratégies de compensation :

- Élévation du bassin dans le plan frontal en début de phase oscillante, éventuellement associée à une inclinaison controlatérale du tronc, souvent associée à une rotation postérieure du bassin.
- Le fauchage est caractérisé par un mouvement de circumduction du membre inférieur décrivant un demi-cercle au sol (imitant le mouvement circulaire d'une faux), lié à un mouvement d'abduction de hanche. Le fauchage est souvent associé à une majoration de la rotation postérieure du bassin, de la rotation latérale du membre inférieur et à une élévation homolatérale du bassin lors de la phase oscillante.
- Volte controlatérale correspondant au passage en flexion plantaire avec appui sur l'avant pied en phase d'appui du côté controlatéral au défaut de raccourcissement.

- **Steppage** correspondant à une majoration de la flexion de hanche (et souvent du genou de manière secondaire) compensant un défaut de relevé du pied. Il s'agit d'une compensation survenant classiquement en cas d'atteinte du nerf fibulaire. La prise en charge consiste à mettre en place un releveur de pied qui se substitue aux muscles releveurs déficitaires. Une prise en charge chirurgicale est possible pour réanimer la dorsiflexion de cheville par transfert tendineux ou par une arthrolyse talocrurale.

Difficultés de progression du membre inférieur

En présence d'un défaut de propulsion distal (triceps sural et fléchisseurs des orteils), d'une parésie des fléchisseurs de hanche et/ou d'une vitesse de marche faible (perte de l'énergie cinétique et de l'effet pendulaire), la progression du membre inférieur vers l'avant est souvent limitée, expliquant le raccourcissement du pas. Des stratégies compensatoires sont souvent mises en jeu par les sujets pour allonger au maximum le pas : rétroversion du bassin et/ou rotation antérieure du bassin pour compenser le défaut de flexion de hanche et favoriser l'avancée du membre inférieur en phase oscillante.

1.6.3 Marche hypokinétique à petits pas

Dans le cadre de la maladie de Parkinson et des autres syndromes parkinsoniens, les anomalies de la marche sont relativement stéréotypées, souvent associées à des troubles posturaux :

- **Difficultés à l'initiation de la marche ;**
- **Raccourcissement des pas ;**
- Cadence irrégulière : **la festination** correspond à l'accélération soudaine de la cadence de marche, comme si le sujet courait après son centre de gravité, avec un risque de chute ;
- **Le freezing ou enrayage cinétique** de la marche correspond à une interruption brutale de la marche avec piétinement, de survenue spontanée ou provoquée par un stimulus visuel (vision d'un obstacle, franchissement d'un seuil de porte par exemple) ;
- Perte du balancement d'un ou des deux membres supérieurs ;
- Demi-tour décomposé.

Les autres causes de marche à petits pas sont l'hydrocéphalie à pression normale (classiquement en association avec une incontinence urinaire et des chutes), les états lacunaires avec syndrome pseudo-bulbaire. La marche à petits pas fait également partie de la marche sénile.

1.6.4 Troubles de la marche d'origine fonctionnelle

Leur diagnostic est parfois difficile, évoqué devant la présence des éléments suivants : début souvent brutal, troubles de la marche ne répondant pas aux schémas classiques de boiterie et impossibles à caractériser avec des discordances, variabilité des troubles dans le temps, antécédents de traumatismes physiques ou psychiques. Souvent, la boiterie disparaît lorsqu'il est demandé au patient des tâches spécifiques (marcher sur les pointes de pieds, sur les talons, à reculons ou courir par exemple). On notera parfois des troubles apparents de la stabilité posturale impressionnants alors que le patient ne chute pas. Ils peuvent être traités en associant une prise en charge kinésithérapique adaptée à une psychothérapie et un suivi régulier.

1.6.5 Autres situations

Dans la **démarche apraxique** le sujet a un polygone de sustentation élargi, avec une attitude en flexion des membres inférieurs. Les pieds semblent collés au sol avec des pas raccourcis et ralentis, les membres inférieurs s'entrecroisant. Le sujet a tendance à chuter en arrière. Une telle démarche peut se voir en cas de leucoencéphalopathie vasculaire, de tumeur frontale, d'hydrocéphalie à pression normale évoluée, d'hématomes sous-duraux chroniques voire de maladie d'Alzheimer. Cette anomalie de la marche est parfois confondue avec la staso-basophobie.

La marche **hyperkinétique** concerne les sujets présentant des **mouvements involontaires** (dystonie, chorée, athétose, tremblements). La marche est souvent irrégulière et festonnante avec des mouvements non contrôlés et une grande instabilité.

Il existe des anomalies de la marche qui sont secondaires à la prise de médicaments psychotropes avec effet sédatif, pouvant donner une **marche dite « chancelante »** avec un sujet hypotonique et peu vigile.

Parfois, il y a **une limitation du périmètre de marche sans boiterie**, avec ou sans douleur. Lorsque la marche est associée à des douleurs qui ne provoquent pas de boiterie mais qui limitent le périmètre de marche, on parle de **claudication intermittente douloureuse** :

- **La claudication radiculaire** est typiquement une douleur systématisée et centrifuge (proximo-distale) apparaissant à la marche et s'améliorant avec la position assise ou une position en délordose rachidienne. Elle est le plus souvent liée à un canal lombaire étroit ou rétréci.
- **La claudication artérielle** est en rapport avec une artériopathie oblitérante des membres inférieurs. Elle est responsable d'une douleur plutôt centripète (disto-proximale). Elle doit être évoquée devant des signes d'atteinte du réseau artériel des membres inférieurs.

- **La claudication rhumatologique** est secondaire à des douleurs articulaires (coxarthrose et gonarthrose) ou tendineuses des membres inférieurs. Si la douleur est unilatérale il y a souvent une boiterie d'esquive.

La claudication médullaire n'est pas douloureuse, et correspond à l'apparition d'une faiblesse des membres inférieurs à la marche (fatigabilité importante) parfois associée à des troubles sphinctériens. Elle est liée à une compression de la moelle épinière.

Le périmètre de marche peut être limité par d'autres causes, notamment musculaires ou cardio-respiratoires.

Enfin, **la marche sénile** correspond au vieillissement « physiologique » de la marche. Elle est caractérisée par une vitesse diminuée, un raccourcissement du pas, une diminution de la hauteur du pas (pas rasants voire trainants), une augmentation de la largeur du pas et des temps d'appui bipodaux. Il y a globalement une réduction des amplitudes des mouvements de cheville, genoux et hanches, ainsi qu'une moindre dissociation des ceintures. La cadence est longtemps stable et régulière. La perte de la capacité de gestion d'une tâche cognitive alors que le sujet est en train de marcher (« *Stop walking when talking* ») est associée à une plus grande fréquence de survenue de chutes.

La marche précautionneuse est caractérisée par un discret élargissement du polygone de sustentation, un raccourcissement des pas et un ralentissement de la vitesse de marche. La marche précautionneuse est fréquemment rencontrée chez les personnes âgées dans le cadre du syndrome post-chute. Il s'agit d'une démarche prudente liée à une anxiété apparue secondairement à des chutes, qui peut conduire à une véritable staso-basophobie. Le sujet a besoin de réassurance et parfois de la présence d'une tierce personne.

1.7 Documents de référence

- Beyaert C, Vasa R, Frykberg GE (2015). Gait post-stroke: Pathophysiology and rehabilitation strategies. *Neurophysiol Clin*, 45(4-5): 335-55. doi: 10.1016/j.neucli.2015.09.005.
- Devebvre L (2010). *Troubles de la marche*. EMC (Elsevier Masson SAS, Paris), Traité de médecine Akos, 5-0761.
- Ducroquet R (1965). *La Marche et Les Boiteries*. Paris: Masson.
- Gage JR, Scharthw MH, Koop SE and Novacheck TF (2009). *The Identification and Treatment of Gait Problems in Cerebral Palsy* (2nd ed.). London: Mac Keith Press.
- Kandel ER, Schwartz JH and Jessell TM (2000). *Principles of Neural Science*. (4th ed.). McGraw-Hill.
- Kirtley C (2006). *Clinical Gait Analysis: Theory and Practice* (1st ed.). Edinburgh; New York: Elsevier.
- Perry J and Burnfield J (1992). *Gait Analysis: Normal and Pathological Function* (1st ed.). New Jersey: SLACK Incorporated.
- Vaughans CL, Davis BL and O'Connor JC (1999). *Dynamics of Human Gait* (2nd ed.). Cape Town, South Africa: Kiboho Publishers.