

PHYSIOLOGIE, METHODES D'EXPLORATIONS

ET TROUBLES DE LA MARCHÉ

David GASQ, François MOLINIER, Jean-Michel LAFOSSE

1	Définitions.....	2
1.1	La marche.....	2
1.2	Cycle de marche.....	2
1.3	La course.....	4
2	Bases physiologiques et anatomiques.....	4
2.1	Neurophysiologie de la marche.....	4
2.2	Principales structures anatomiques mises en jeu lors de la marche.....	5
2.2.1	Arthrologie.....	5
2.2.2	Myologie.....	6
3	Explorations de la marche : marche normale.....	7
3.1	Analyse observationnelle de la marche.....	8
3.1.1	Examen clinique.....	8
3.1.2	Analyse vidéographique.....	9
3.2	Paramètres spatio-temporels.....	9
3.2.1	Définitions.....	9
3.2.2	Outils.....	10
3.2.3	Intérêt clinique.....	13
3.3	Analyse quantifiée de la marche.....	14
3.3.1	AQM : paramètres cinématiques.....	14
3.3.2	AQM : paramètres cinétiques.....	14
3.3.3	AQM : électromyographie dynamique de la marche.....	15
3.3.4	Intérêt clinique d'une AQM.....	16
3.4	Les pré-requis d'une marche normale.....	19
4	Troubles de la marche et boiteries.....	20
4.1	Principales boiteries.....	21
4.1.1	Boiterie d'esquive.....	21
4.1.2	Boiterie de Trendelenburg.....	21
4.1.3	Boiterie dite « avec salutation ».....	21
4.1.4	Défaut de raccourcissement du membre inférieur.....	22
4.2	Autres troubles de la marche.....	23
4.2.1	Paraparésie spastique.....	23
4.2.2	Marches instables.....	23
4.2.3	Troubles de la marche du syndrome parkinsonien.....	25
4.2.4	Limitation du périmètre de marche, douloureuse ou non.....	25
4.2.5	Troubles de la marche d'origine psychogène.....	26
4.2.6	Vieillessement de la marche.....	26
5	Conclusion.....	26

1 Définitions

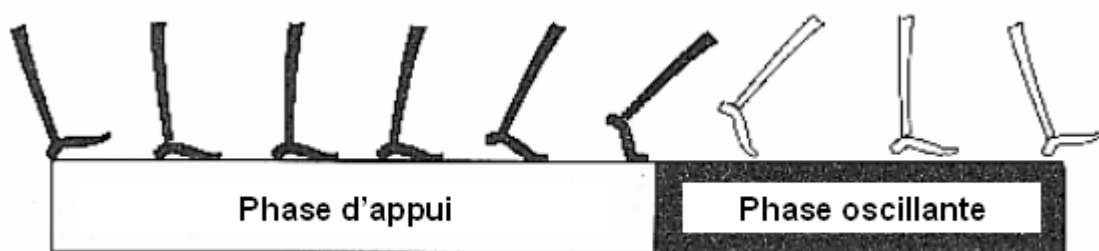
1.1 La marche

La marche est le mode de locomotion naturel de l'être humain adulte, lui permettant de combiner le maintien de l'équilibre debout et la propulsion. Elle met en jeu de manière combinée et alternée les deux membres inférieurs. De manière imagée, la marche consiste à mettre un pied devant l'autre de manière alternée et répétée. La marche est caractérisée par une succession de doubles appuis et d'appuis unipodaux, le corps restant en permanence en contact avec le sol par au moins un appui unilatéral.

1.2 Cycle de marche

La description du cycle de marche est codifiée sur le plan international, et constitue la base de la description d'une marche normale ou pathologique. Le cycle de marche de chaque membre inférieur comprend une phase d'appui et une phase oscillante. Le cycle de marche débute par le contact initial du pied et se termine lors du nouveau contact de ce pied au sol. On distingue deux phases différentes :

- **la phase d'appui** qui 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) et sa fin au décollement des orteils (perte de contact du pied avec le sol). Elle s'étend de 0 à 60% du cycle de marche, soit une durée de 60% du cycle de marche.
- **la phase oscillante** où le pied n'est plus en contact avec le sol et qui permet l'avancée du membre inférieur. Son début correspond au décollement des orteils et sa fin au contact initial suivant du même pied. Elle s'étend de 60 à 100% du cycle de marche, soit une durée de 40% du cycle de marche.



D'après Perry, J. Gait analysis, SLACK Incorporated, USA, 1992

Figure 1 : division du cycle de marche en phase d'appui et phase oscillante

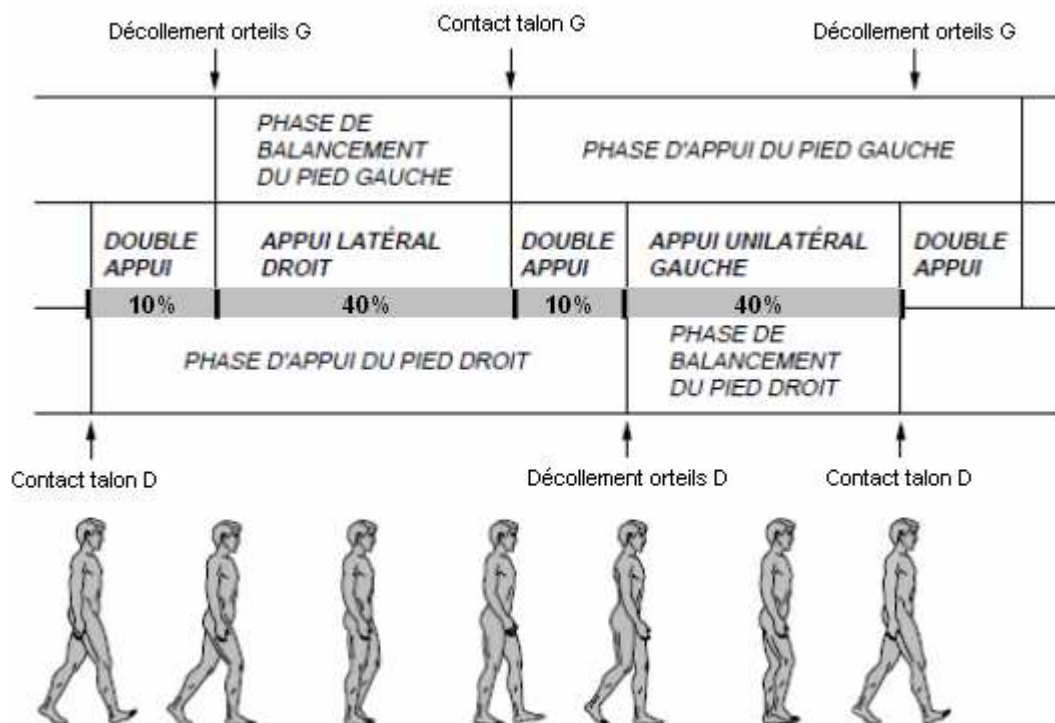
La description du cycle de marche intègre le comportement du pied controlatéral. Si nous décrivons le cycle de marche du pied droit, on distingue :

- **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.

- **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 correspond à la phase oscillante du pied gauche.
- **phase de double appui de propulsion** qui débute avec le contact initial du pied gauche, alors que le pied droit est en train de décoller. 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 (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 correspond à la phase d'appui unipodal du pied gauche.

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



D'après Gras, P. et al. La marche, BMC 26-013-A-10, Elsevier Masson, 1996

Figure 2 : les différentes phases du cycle de marche

1.3 La course

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 doubles appuis, 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.

2 Bases physiologiques et anatomiques

La marche met en jeu des processus complexes. Il s'agit d'une activité automatique nécessitant d'une part le maintien d'un équilibre dynamique, et d'autre part une organisation motrice hiérarchisée et synchronisée. La compréhension de la physiologie et de la pathologie de la marche nécessite donc un minimum de connaissances neurophysiologiques et anatomiques.

2.1 Neurophysiologie de la marche

La marche correspond à une activation musculaire cyclique, coordonnée et automatique, qui peut être modulée par le contrôle volontaire en particulier lors de situation de changement de direction ou d'augmentation de la vitesse de marche.

La marche suppose un **contrôle postural dynamique efficient** : un sujet incapable de maintenir une position érigée stable ne pourra pas marcher sans aide technique. L'intégrité des structures gérant la stabilisation du sujet est donc nécessaire : système vestibulaire, système proprioceptif, système visuel et système cérébelleux. Leur dysfonctionnement interférera avec le déroulement de la marche.

Les différentes activations musculaires des membres inférieurs sont sous le contrôle du **générateur spinal de marche** (GSM), lui-même contrôlé par les structures supra-segmentaires du système nerveux central. Il correspond à un regroupement de neurones en réseau (inter-neurones), de localisation présumée lombaire, présentant une activité électrique spontanée rythmique. Le GSM assure l'activation cyclique et coordonnée des différents muscles permettant l'obtention d'une marche efficiente. Le GSM n'est pas le seul élément permettant la commande de la marche. On retiendra de manière simplifiée l'implication de :

- Aires locomotrices supra-spinales localisées dans le mésencéphale, le tronc et les noyaux sub-thalamiques, modulant l'activité du GSM.
- Les noyaux de la base, notamment le striatum ventral, ont un rôle important dans l'initiation de la marche et dans son déroulement.
- Le cortex associatif fronto-pariétal joue un rôle dans la planification de l'action et le choix d'un programme moteur.
- Le cervelet, en plus de son rôle important dans la régulation de l'équilibre, participe au contrôle de la marche. Ses efférences sont essentiellement transmises par l'intermédiaire des noyaux

vestibulaires, des faisceaux rubro-spinal et réticulo-spinal.

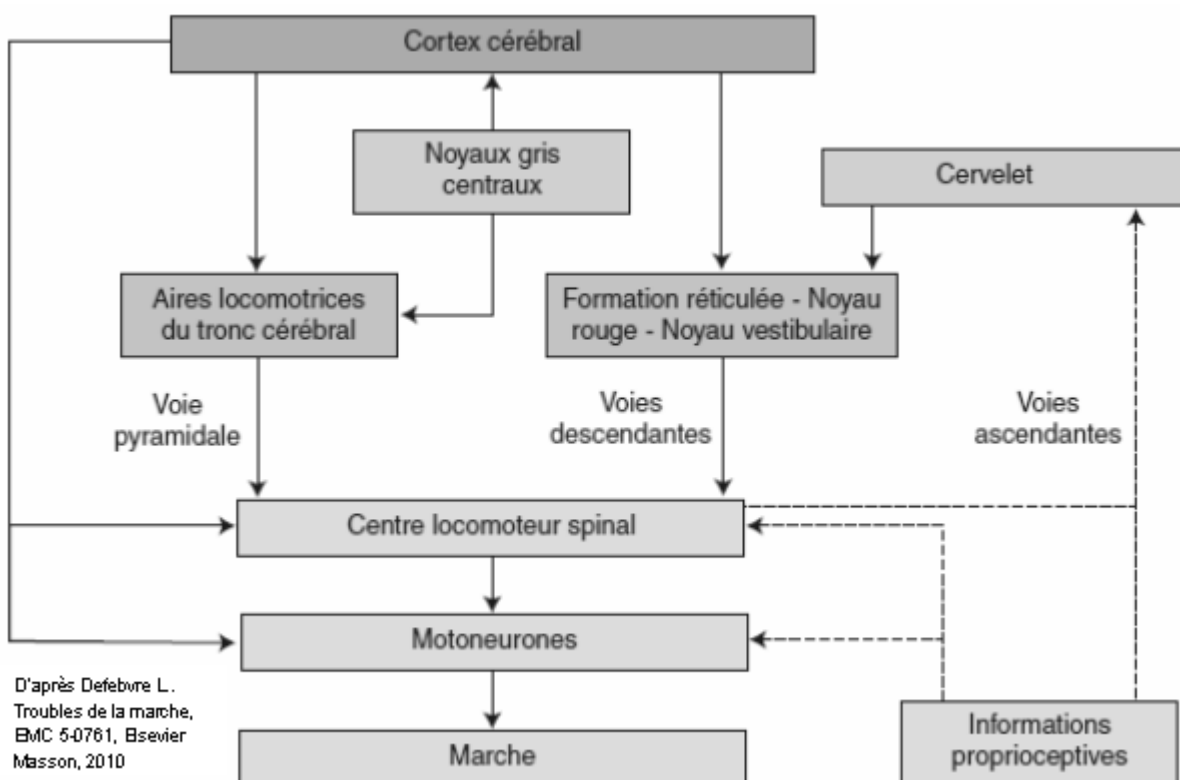


Figure 3 : principales structures impliquées dans l'organisation de la marche

2.2 Principales structures anatomiques mises en jeu lors de la marche

2.2.1 Arthrologie

A Articulation coxo-fémorale (articulation de la hanche)

Il s'agit d'une articulation synoviale sphéroïde à trois degrés de liberté. La tête du fémur orientée en ventral, médial et cranial s'articule avec l'acetabulum au niveau du bassin. L'articulation coxo-fémorale est très stable. A la périphérie de l'acetabulum, le labrum acétabulaire, inséré sur le limbus acétabulaire, permet d'augmenter la congruence et la stabilité articulaire. La flexion est de 120°, l'extension 15°, l'abduction de 45°, l'adduction de 20°, la rotation latérale de 45° et la rotation médiale de 35°.

B Articulation du genou

C'est une articulation synoviale composée de 3 compartiments : l'articulation fémoro-tibiale latérale, l'articulation fémoro-tibiale médiale et l'articulation fémoro-patellaire.

Afin d'augmenter la congruence articulaire, les ménisques (médial et latéral) s'insèrent sur la capsule articulaire. De puissants ligaments s'insèrent entre le fémur et le tibia afin d'augmenter la stabilité de l'articulation :

- en périphérie, le ligament collatéral tibial (oblique en bas et en avant) et le ligament collatéral fibulaire (oblique en bas et en arrière)
- le ligament croisé antérieur (oblique en haut, en arrière et en latéral) stabilise le genou afin d'éviter la translation antérieure.
- le ligament croisé postérieur
- le ligament patellaire en avant, prolongeant le tendon quadricipital et la patella.

La flexion est de 140° et l'extension de 0°.

C Articulatio talo-crurale (articulation de la cheville)

La fibula, le tibia et le talus constituent cette articulation. Cette articulation a un rôle primordial lors de la marche.

C'est une articulation synoviale de type ginglyme. Les surfaces tibio-fibulaires forment une mortaise solide plus large en avant qu'en arrière, dans laquelle s'encastre la trochlée du talus. Le ligament médial (ou deltoïde) est un ligament solide composé de deux faisceaux (superficiel et profond) qui stabilise l'articulation en médial. Les ligaments latéraux (talo-fibulaire antérieur, calcanéofibulaire et talo-fibulaire postérieur) stabilisent l'articulation en latéral. L'articulation talo-crurale est très stable car la station érigée exige une stabilité parfaite du talus.

La flexion est de 20° à 30° et l'extension de 30° à 60°.

D Articulations du tarse

L'articulation subtalaire (entre le talus et le calcaneum) et l'articulation transverse du tarse (articulation talo-naviculaire et articulation calcanéocuboidienne) sont indissociables et complexes. Elles sont le siège de faibles mouvements de glissements qui démultiplient les contraintes subies par le pied lors de son contact avec le sol au cours de la course et du saut ; elles assurent la souplesse du pied.

2.2.2 Myologie

Cinq muscles ou groupes musculaires sont à connaître pour comprendre le fonctionnement de la marche. En cas de lésion, leur dysfonction aura une répercussion sur la marche à l'origine d'une boiterie caractéristique.

A Gluteus Medius (Moyen Fessier)

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, empêchant la chute du bassin vers le membre inférieur oscillant.

B 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'insère sur la tubérosité tibiale antérieure au niveau du tibia. Le quadriceps est innervé par le nerf fémoral. Sa fonction principale est l'extension du genou.

C Ischio-jambiers

Ils sont au nombre de trois : le biceps fémoral, le muscle semi-tendineux et le muscle semi-membraneux. Ils sont innervés par le nerf sciatique. Ils sont fléchisseurs de la jambe.

D 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 du pied et participe à l'inversion. C'est le muscle releveur du pied. Sa paralysie entraîne la chute du pied (absence de relevé de la pointe du pied) lors de la phase oscillante, responsable d'une boiterie nommée steppage.

E Triceps Sural

Le triceps sural est situé dans la loge postérieure de jambe. Il est 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 le nerf tibial. Il est extenseur de la cheville 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.

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

3 Explorations de la marche : marche normale

La compréhension de la marche normale 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 utilisés actuellement.

Le schéma ci-après (**figure 4**) montre qu'il est possible de distinguer trois méthodes d'analyse de la marche. La plus intuitive et naturelle correspond à l'observation visuelle, avantagusement 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 avec l'AQM.

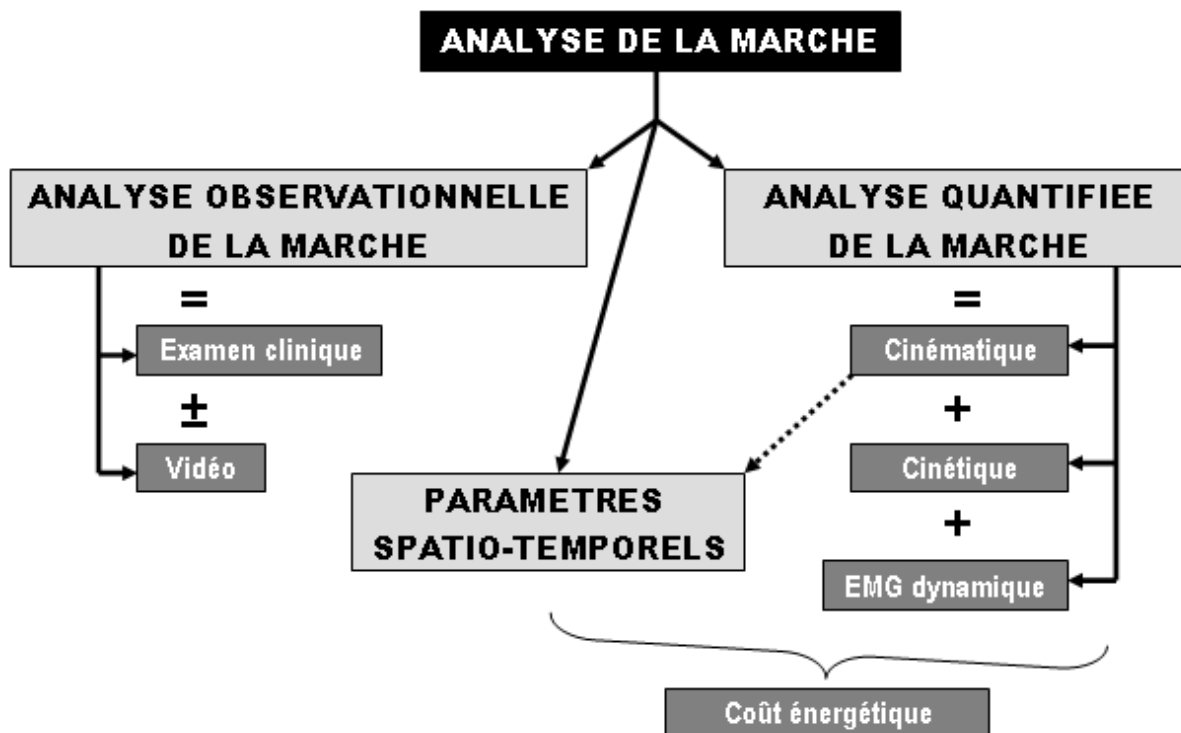


Figure 4 : les trois principales méthodes d'analyse de la marche

3.1 Analyse observationnelle de la marche

3.1.1 Examen clinique

L'examen clinique est incontournable pour caractériser un trouble de la marche. Les points principaux sont :

- présence de douleurs lors de la marche : préciser leur localisation et leur moment de survenue dans le cycle de marche
- examen des capacités d'équilibration (recherche d'une ataxie)
- examen des amplitudes articulaires des membres inférieurs
- examen de la force musculaire des membres inférieurs
- examen de la sensibilité des membres inférieurs
- examen du tonus musculaire (spasticité, paralysie flasque, rigidité extra-pyramidale)
- compléter l'examen neurologique avec la recherche d'autres signes d'atteinte du système nerveux central ou périphérique

3.1.2 Analyse vidéographique

L'analyse vidéographique de face et de profil reste le moyen le plus simple d'analyser la marche. L'analyse de mouvements trop rapides ou d'amplitude trop petite pour être correctement appréhendés par notre système visuel devient possible, et constitue un véritable prolongement de l'examen clinique. L'analyse vidéographique se développe car il s'agit d'une instrumentation très mobile et d'un coût abordable. Elle permet de s'arrêter sur les moments clés du cycle de marche pour caractériser les anomalies de la marche. A partir des images vidéos, il est possible d'effectuer une analyse cinématique (cf définition dans le chapitre suivant) du mouvement, en 2 ou 3 dimensions. Le principe des logiciels effectuant cette analyse est de repérer, puis de suivre un ou plusieurs points définis de l'image, et de décrire leurs coordonnées dans le temps, dans un référentiel donné. Cette technique est le plus souvent utilisée en positionnant des repères sur le sujet, pour faciliter la détection (amélioration du contraste) et le suivi de ces points particuliers, ou plus simplement par une reconnaissance directe des formes par le logiciel.

L'utilisation de l'analyse vidéographique est très largement répandue, et a le mérite de pouvoir être archivée pour comparer l'évolution des caractéristiques de la marche d'un sujet, avant et après traitement par exemple.

3.2 Paramètres spatio-temporels

3.2.1 Définitions

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 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 défini 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 l'axe de progression et la partie médiane du talon
- **La largeur d'enjambée** (en mètres) correspond à la somme algébrique de la largeur de deux pas successifs.

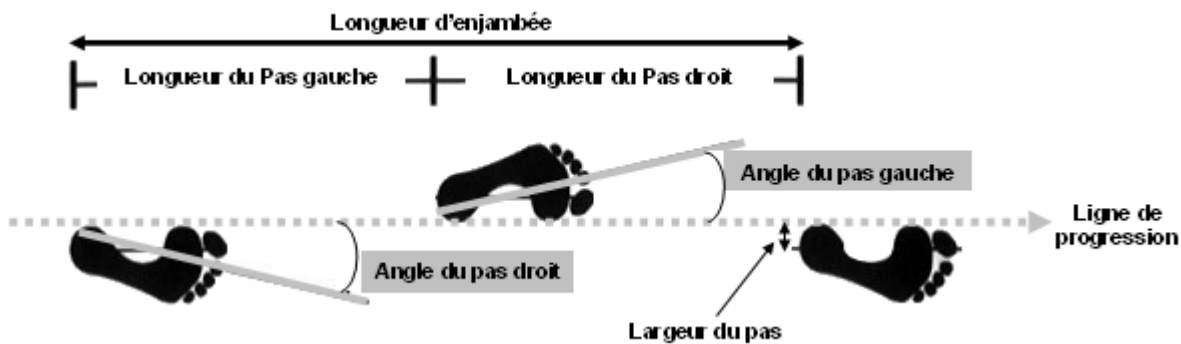


Figure 5 : principaux paramètres spatiaux du cycle de marche

Les principaux paramètres temporels sont :

- **La cadence** 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 (enjambées/min) et la longueur d'enjambée (mètre). Celle-ci est la suivante :

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

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.

- **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.

3.2.2 Outils

Plusieurs outils permettent d'obtenir certains ou l'ensemble des paramètres spatio-temporels du cycle de marche.

A Chronométrage du sujet

Le chronométrage du sujet sur une distance donnée permet d'obtenir la vitesse de marche. **La consigne donnée au sujet est importante puisqu'elle détermine l'allure :** on distingue

essentiellement la **vitesse spontanée ou vitesse de confort** et la **vitesse maximale**. La connaissance de l'allure est indispensable à l'interprétation d'une vitesse de marche, car les normes se réfèrent soit à une allure spontanée, soit à une allure maximale.

B Le Locomètre

Le Locomètre (**figure 6**), décrit et mis au point par l'équipe de Paul Bessou dans les années 80 au laboratoire de physiologie de la Faculté de Médecine de Toulouse, est un dispositif permettant de recueillir des données graphiques et numériques des principaux paramètres spatio-temporels de la marche. Le principe technique, inspiré de la machine de Jules Etienne Marey, est simple : grâce à un câble inextensible enroulé autour d'une poulie, les pieds du sujet sont reliés à un potentiomètre. Le fil est maintenu en tension par un moteur électrique qui exerce une force de rappel dont la tension mécanique est rendue constante par asservissement électronique. Ainsi, les variations d'intensité du circuit de mesure sont proportionnelles aux déplacements sagittaux de chacun des deux pieds. Les mouvements de chaque pied sont enregistrés par un codeur optique avec une résolution spatiale inférieure au millimètre et une résolution temporelle de l'ordre de quelques millisecondes.

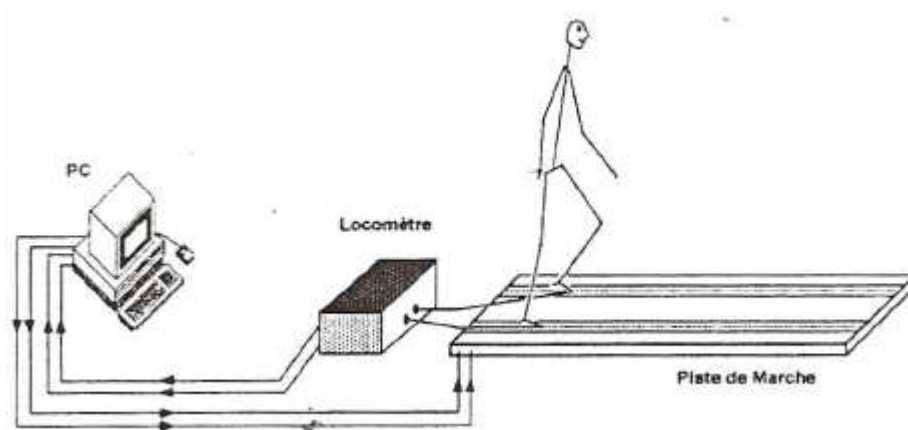


Figure 6 : schéma du Locomètre, d'après Bessou P., Dupui P., Montoya R., Pagès B., J Physiol (Paris), 1988.

Le Locomètre permet d'obtenir l'ensemble des paramètres spatio-temporels liés à la progression dans le plan sagittal. Il ne permet donc pas de mesurer l'angle et la largeur du pas.

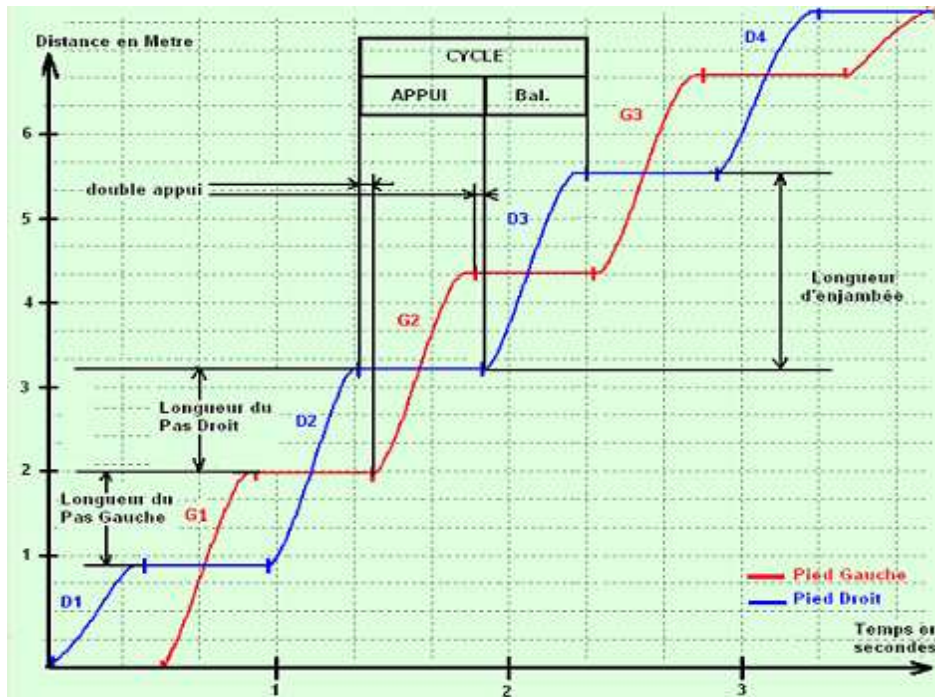


Figure 7 : paramètres spatio-temporels illustrés à partir des courbes obtenues avec le Locomètre.

C Mesure des pressions plantaires

La mesure des pressions plantaires est basée sur l'utilisation de revêtements munis de petits capteurs de pression. Ces nappes de capteurs de pression sont souvent présentées sous la forme de tapis sur lequel le sujet va se déplacer, ou alors disposées dans les chaussures. L'intérêt de ces dispositifs réside dans l'obtention d'une donnée supplémentaire : la pression exercée par le pied sur le sol. Cette donnée permet d'étudier les **caractéristiques du déroulement du pas au sol**, et de déterminer d'éventuelles zones d'hyper-appuis.

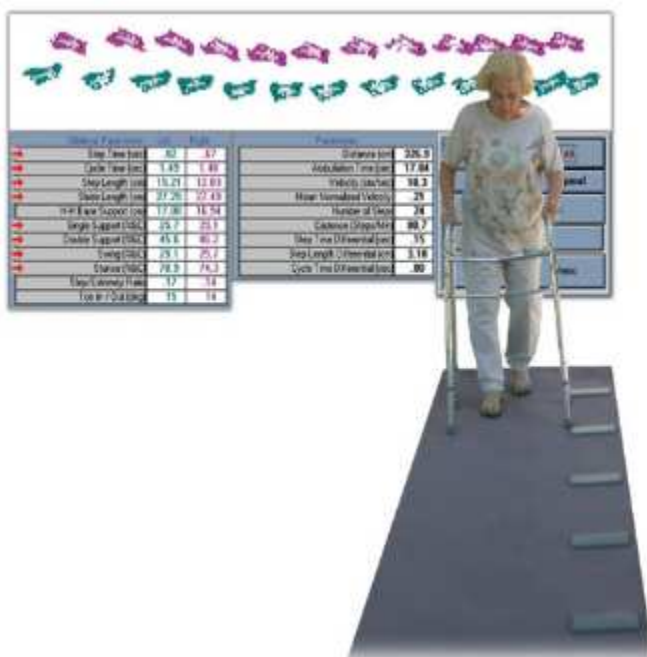


Figure 8 : exemple du système Gait-Rite qui correspond à un tapis de marche dans lequel sont disposés de très nombreux capteurs de force, ce qui permet d'obtenir l'ensemble des paramètres

spatio-temporels du cycle de marche.

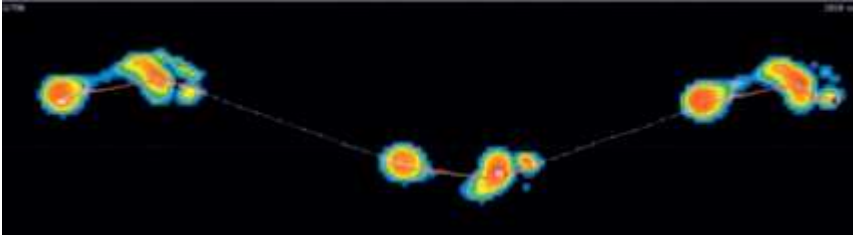


Figure 9 : exemple du système Win-Track permettant d'obtenir les caractéristiques du déroulé du pas, ainsi que l'ensemble des paramètres spatio-temporels du cycle de marche.

D Accélérométrie

Cette méthode d'évaluation est basée sur l'utilisation d'accéléromètres, éventuellement couplés à des gyroscopes ou des inclinomètres, pour détecter respectivement les accélérations linéaires, angulaires et les inclinaisons, en différents points du corps. A partir d'un ou plusieurs boîtiers disposés sur le bassin et les membres inférieurs, il est possible de déterminer par des algorithmes mathématiques complexes un certains nombres de paramètres spatio-temporels : nombre de pas, cadence, vitesse de marche, type de terrain (terrain plat, escaliers par exemple), avec une précision qui progresse sans cesse. Il s'agit d'un moyen de mesure portable, ce qui permet une utilisation en situation écologique pour monitorer l'activité physique des personnes en situation de vie quotidienne par exemple. Il s'agit véritablement **d'une méthode de Holter appliquée à la marche.**

3.2.3 Intérêt clinique

Les paramètres spatio-temporels sont des descripteurs de la marche validés. Leur mesure permet d'objectiver les performances du sujet en terme de vitesse de marche, cadence, longueur du pas et temps d'appui. Il est également possible de dépister une éventuelle asymétrie entre les deux membres inférieurs (temps d'appui plus important d'un côté, longueur du pas asymétrique).

Ces dispositifs sont adaptés à une évaluation de routine pour caractériser de manière globale la marche, car l'examen est aisé et rapidement réalisé, avec obtention immédiate des résultats. Il est possible d'effectuer ces examens avec ou sans aide technique, avec ou sans chaussure, ce qui permet de réaliser une évaluation relativement écologique.

Nous retiendrons comme ordre de grandeur de « normalité » chez un sujet jeune pour les principaux paramètres spatio-temporels :

- Vitesse spontanée : autour de 1,6 m/s (soit 5,8 km/h)
- Longueur du pas : autour de 80 cm
- Cadence de marche : entre 100 et 130 pas par minute

3.3 Analyse quantifiée de la marche

L'analyse quantifiée de la marche est le terme consacré désignant l'examen qui combine l'acquisition synchronisée des données cinématiques, cinétiques (plates-formes de force) et électromyographiques du sujet en train de marcher, en général associées à un examen vidéographique. Cet examen nécessite des outils onéreux et un traitement informatique conséquent, et n'est réalisé qu'au sein de plateaux techniques d'analyse du mouvement spécialisés (une dizaine en France). Nous allons brièvement décrire ces différents paramètres, pour comprendre l'intérêt d'une telle analyse.

3.3.1 AQM : paramètres cinématiques

A Définitions

En pratique pour l'étude de la marche, la cinématique correspond à l'étude des angles articulaires au cours du cycle de marche. L'observation visuelle simple de la marche permet souvent d'appréhender les principales anomalies, mais il s'agit d'une analyse difficile en raison de la rapidité des mouvements, qui de plus n'est pas quantifiée. 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 de la technique de référence.

B Outils : systèmes opto-électroniques

Les systèmes optoélectroniques restent actuellement la référence pour obtenir les coordonnées spatiales tridimensionnelles d'un point donné au cours du temps. Il en existe plusieurs sur le marché, tous constitués d'un système de détection tridimensionnel de la position de marqueurs au cours du temps. Le principe est de modéliser les articulations du sujet à partir de marqueurs disposés sur la peau.

Cet examen permet d'obtenir les angles articulaires des différentes articulations des membres inférieurs au cours de la marche, dans les trois plans de l'espace. Les paramètres spatio-temporels sont également calculés à partir des données cinématiques et cinétiques.

3.3.2 AQM : paramètres cinétiques

A Définitions

La cinétique correspond à l'étude des forces et moments de force qui s'exercent sur un objet. Une force est représentée par un vecteur. Elle est définie par un point d'application, une direction, un sens et une intensité exprimée en Newtons. Une force a tendance à déplacer l'objet selon un mouvement de translation, ou à le déformer. Le moment de force en un point est la tendance qu'à cette force à provoquer une rotation de l'objet autour du point. Le moment de force est modulé par l'intensité de la force appliquée et par la longueur du bras de levier.

Pour l'AQM, la force qui est analysée est la force de réaction du sol. Celle-ci est mesurée durant toute la phase d'appui. Elle matérialisée par un vecteur dirigée vers la haut, dont la longueur (intensité) est proportionnelle au poids du sujet.

B Outils : plates-formes de force

Les plates-formes de force permettent de mesurer les trois composantes de la force de réaction du support et les trois composantes du moment de force résultant, à partir de jauges de contraintes situées entre la plate-forme et le sol. Ces plates-formes de force sont intégrées dans le plancher du laboratoire de marche. Pour pouvoir exploiter les données de ces plates-formes il est bien entendu nécessaire que le sujet pose le pied dans sa totalité sur celle-ci lors de son cycle de marche.

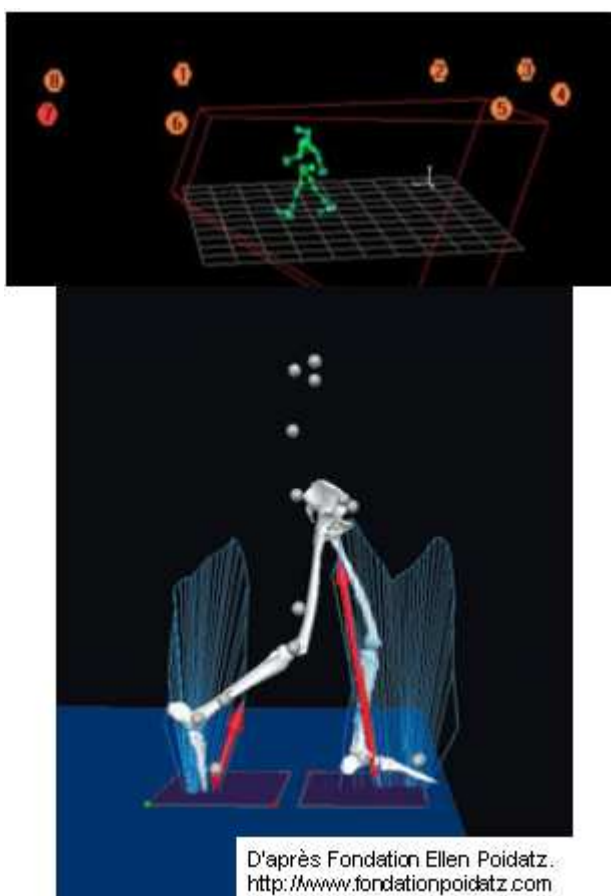


Figure 10 : illustration d'une analyse cinématique et cinétique de la marche par un système opto-électronique 3D et deux plates-formes de force.

3.3.3 AQM : électromyographie dynamique de la marche

A Définitions

Dans le cadre d'une analyse de la marche, on parle d'électromyographie dynamique de la marche. Le principe est d'enregistrer l'activité électrique produite par la contraction des muscles.

B Outils

Il y a deux techniques d'EMG dynamique de la marche :

- L'électromyographie de surface utilise des électrodes qui enregistrent les variations de potentiels électriques à la surface de la peau, au dessus du muscle étudié. L'avantage est qu'il s'agit d'une méthode non invasive. Les inconvénients sont la présence d'un ratio signal/bruit peu favorable, et un risque de diaphonie important. Cette technique n'est par ailleurs pas utilisable pour les muscles profonds.
- L'électromyographie intramusculaire correspond à la mise en place d'une électrode-fil dans le corps du muscle, par voie trans-cutanée. Il s'agit d'une technique plus invasive mais qui permet d'être sélectif du muscle étudié, d'autant plus qu'il est situé en profondeur, avec une moindre sensibilité au bruit.

L'objectif de l'enregistrement EMG est uniquement **d'observer la séquence temporelle d'activation du muscle**. 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, d'activité en inversion de phase si elle est inversée, et d'activité permanente si le muscle est activé en permanence.

3.3.4 Intérêt clinique d'une AQM

Pour les patients qui présentent un trouble de la marche complexe, souvent dans le cadre d'une pathologie neurologique (paralysie cérébrale, hémiplégie) ou orthopédique complexe (amputation, cals vicieux, lésions neurologiques associées), l'utilisation d'une AQM est généralement requise.

Le temps de réalisation de cet examen est relativement élevé car il y a plusieurs étapes à respecter :

- Préparation du sujet : mise en place de plus de 15 marqueurs superficiels sur des repères anatomiques très précis, ainsi que des électrodes pour l'EMG.
- Acquisition : nécessite plusieurs passages du sujet pour pouvoir obtenir des données moyennées, avec appui sur la plate-forme de force.
- Traitement des données : l'obtention des résultats nécessite un traitement des données parfois lourd, afin de sélectionner les cycles de marche les plus reproductibles.
- Interprétation des données : celle-ci est en général effectuée de manière pluridisciplinaire (ingénieur, médecin et chirurgien, kinésithérapeute).

Cette procédure est donc relativement coûteuse sur le plan matériel et humain, mais elle se justifie dans le cadre de l'utilisation de thérapeutiques médicales invasives et onéreuses (toxine botulinique par exemple) ou de prises en charges chirurgicales.

L'AQM 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, et les anomalies secondaires ou compensatoires qu'il faut respecter.

Les données cinématiques et électromyographiques clefs à retenir pour comprendre les boiteries sont présentées dans les tableaux ci-après.

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°	<p>D'après Perry, J. Gait analysis, SLACK Incorporated, USA, 1992</p>
GENOU	Extension à 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	<p>D'après Perry, J. Gait analysis, SLACK Incorporated, USA, 1992</p>
CHEVILLE	Position neutre à 0°	Dorsiflexion de 0 à 15°	Extension de 0 à 20°	Retour à 0°	<p>D'après Perry, J. Gait analysis, SLACK Incorporated, USA, 1992</p>
PIED	Contact taligrade (talon)	Appui plantigrade (plante)	Appui digitigrade (avant-pied et orteils)	-	<p>D'après Perry, J. Gait analysis, SLACK Incorporated, USA, 1992</p>
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	

Schématisation des activations musculaires des membres inférieurs lors d'un cycle de marche

Groupes musculaires	Phase APPUI	Phase OSCILLANTE
Stabilisateurs du bassin → <i>Moyen fessier</i>	+	-
Fléchisseurs de hanche → <i>Psoas iliaque</i>	-	+
Extenseurs de genou → <i>Quadriceps</i>	+	-
Fléchisseurs de genou → <i>Ischio-jambiers</i>	-	+
Releveurs du pied → <i>Tibial antérieur</i>	-	+
Extenseurs du pied → <i>Triceps sural</i>	+	-

Noter qu'au cours de la marche, les muscles présentent majoritairement une activité excentrique freinatrice.

3.4 Les pré-requis d'une marche normale

Gage J.R. a décrit en 2004 cinq pré-requis pour une marche normale :

1. **Pré-positionnement adéquat à l'attaque du pas** : cheville neutre, attaque par le talon avec le genou en extension quasi-complète.
2. **Stabilité en phase d'appui** : appui plantigrade et genou stable.
3. **Liberté de passage du pied pendant la phase oscillante** : implique une flexion des articulations du membre inférieur. Ce pré-requis est souvent altéré et responsable de boiteries.
4. **Longueur du pas adéquate** : elle est nécessaire à la progression vers l'avant. Elle nécessite une extension de hanche et de genou correctes, ainsi qu'un appui stable du côté controlatéral.
5. **Conservation de l'énergie permettant une marche efficiente** : la marche est un processus conçu pour être peu coûteux sur le plan énergétique en conditions physiologiques, 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. Six déterminants nécessaires à l'obtention d'une marche optimisée sur le plan énergétique ont été proposés par Saunders et al. en 1953, puis repris et modifiés par Inman et al. en 1981 et Whittle en 1991. Le concept de base est le suivant : pour qu'une marche soit la plus économique possible sur le plan énergétique, les mouvements du centre de gravité (CG) du sujet doivent être minimisés.
 - a. La rotation du bassin autour d'un axe vertical permet de limiter les mouvements de flexion et extension de hanche, ce qui diminue les excursions verticales du CG.
 - b. L'inclinaison du bassin dans le plan frontal du côté oscillant permet également de réduire les mouvements verticaux du CG.

- c. Les trois mécanismes suivants permettent à l'unité cuisse-jambe-pied de présenter une longueur adaptée à chaque instant en phase d'appui, permettant de minimiser et lisser les variations de distance entre le CG et le sol.
- Attaque du pas par le talon qui allonge fonctionnellement le membre
 - Flexion du genou qui compense le passage d'une flexion à une extension de hanche
 - Décollement du talon en phase pré-oscillante qui allonge fonctionnellement le membre
- d. Le valgus physiologique de genou permet de limiter les excursions latérales du CG

4 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 normales. **Les troubles de la marche** sont nombreux, et dépassent donc 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 de troubles de la marche sont en général des lésions du système nerveux central ou périphérique, ou des pathologies du système musculo-squelettique.

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 la vidéo de la marche sont effectuées chez un sujet déshabillé et pieds nus sur une dizaine de mètres. Hormis l'étude du lever de la chaise, on distingue trois temps à l'observation :

- **Initiation de la marche**
- **Marche stabilisée (vitesse constante)**
- **Demi-tour**

L'analyse quantifiée est en général effectuée sur une marche stabilisée, afin d'éviter de fausser les résultats avec les phases d'accélération initiale et de ralentissement final.

On relève l'utilisation éventuelle d'aides techniques (cane simple ou tripode, béquille, déambulateur, releveur de pied, chaussage orthopédique). **La recherche d'une cause au trouble de la marche nécessite toujours l'examen du patient, parfois complété par les différents examens que nous venons de voir.** La quantification du trouble de la marche fait appel aux divers examens disponibles, en fonction des informations qu'il est nécessaire de recueillir. Nous allons présenter les principaux troubles de la marche qu'il est nécessaire de connaître, avec leurs principales étiologies.

4.1 Principales boiteries

4.1.1 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 et de la force d'appui. 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 étrangers plantaire, pathologie podale, 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 d'appui bipodale de propulsion altérée pour une pathologie douloureuse de l'hallux par exemple. Le traitement correspond au traitement de 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.

4.1.2 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 l'insuffisance du muscle moyen fessier du côté de l'appui, qu'elle soit d'origine neurologique (déficit radiculaire L5), musculaire (myopathie, rupture du tendon) ou antalgique (coxarthrose). Cette boiterie est également appelée boiterie de Duchenne car classique dans la myopathie de Duchenne responsable d'un déficit musculaire des ceintures. 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**.

4.1.3 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'anteflexion du tronc :

- Le défaut d'extension de hanche, souvent en rapport avec une rétraction des fléchisseurs de hanche ou une coxopathie, qui nécessite une anteflexion du tronc sur la phase de double appui de propulsion afin de pouvoir effectuer un pas controlatéral. Le pas controlatéral est d'ailleurs souvent diminué du fait de la perte d'extension de hanche.

- La perte de force du quadriceps, qui ne peut plus contrôler l'extension active du genou. L'inclinaison antérieure du tronc place le centre de gravité du sujet en avant de l'appui et permet de placer le genou en extension de manière passive.

4.1.4 Défaut de raccourcissement du membre inférieur

Le défaut de raccourcissement du membre inférieur oscillant, au niveau de la cheville, du genou ou de la hanche, nécessite des stratégies compensatoires pour pouvoir passer le pas. L'élévation du bassin dans le plan frontal ou la présence d'une extension de cheville (flexion plantaire, correspondant au 'vaulting' des anglo-saxons) du côté portant sont des mécanismes de compensation aspécifiques. Deux tableaux sont extrêmement fréquents et doivent être connus : le steppage et le fauchage.

A Steppage

Le steppage correspond à un défaut de dorsiflexion du pied lors de la phase oscillante en rapport avec un déficit des muscles releveurs et éverseurs du pied. On observe une majoration de la flexion de hanche et de genou compensatoires pour assurer un raccourcissement suffisant du membre oscillant. Il s'agit le plus souvent d'une boiterie secondaire à une atteinte neurologique périphérique par atteinte radiculaire L5, atteinte du nerf fibulaire commun ou maladies de Charcot-Marie-Tooth. L'atteinte neurologique peut également être centrale, avec en général un déficit très distal relativement flasque qui permet la flexion compensatoire du genou et de la hanche. Enfin, cette boiterie est également classique dans certaines myopathies avec atteinte motrice distale. 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 de réanimation de la dorsiflexion de cheville est possible par transfert du muscle tibial postérieur ou court fibulaire sur le dos du pied. Une arthrodèse talo-crurale est parfois envisagée.

B Fauchage

Le fauchage est caractérisé par un genou restant raide lors de la phase oscillante, avec un membre inférieur décrivant un demi-cercle au sol, imitant le mouvement circulaire d'une faux. Il y a en général une attitude en varus-equin du pied et de la cheville associée à un défaut de flexion du genou. Le varus-equin correspond à une flexion plantaire de cheville et à un varus de l'arrière-pied secondaires à l'hypertonie spastique du triceps sural, qui est réductible dans un premier temps puis évolue vers une rétraction musculo-tendineuse. La présence de l'equin est responsable d'une attaque du pas digitigrade, alors que le varus est responsable d'une attaque du pas sur le bord latéral du pied. Le défaut de flexion du genou est en général lié à une hypertonie spastique du muscle quadriceps.

Le passage du pas est donc permis par un mouvement compensatoire d'abduction de hanche et une élévation homolatérale du bassin lors de la phase oscillante. Cette boiterie est classique chez les

patients présentant une hémiplégie spastique, où elle est associée à une position du membre supérieur en flexion de coude et pronation de l'avant-bras.

4.2 Autres troubles de la marche

4.2.1 Paraparésie spastique

En cas de paraparésie spastique (ou spasmodique), il y a un défaut de raccourcissement des deux membres inférieurs fixés en extension. Le membre inférieur est avancé par la combinaison d'une inclinaison du tronc controlatérale et une rotation horizontale antérieure homolatérale du bassin. Le terme de **démarche de gallinacé** est parfois employé pour désigner cette démarche.

Si une adduction des cuisses trop importante entraîne un croisement des cuisses on parle de **démarche « en ciseaux »**.

Lorsque le sujet paraplégique utilise deux cannes pour se déplacer en projetant le bassin et les membres inférieurs de manière concomitante, on parle de **marche pendulaire**.

4.2.2 Marches instables

A Marche ataxique

La démarche ataxique est consécutive à **une ataxie sensitive** (proprioceptive en général). Le sujet se déplace comme un « pantin désarticulé », avec des mouvements brusques et désordonnés des membres inférieurs. Elle 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 doubles appuis au prorata des phases d'appuis unipodales. Le patient avance souvent en regardant le sol. La marche est parfois **talonnante**, ce qui correspond à un contact plus brutal que la normale entre le talon et le sol lié à l'hypoesthésie. L'instabilité du sujet est souvent responsable de chutes, notamment dans le noir. La prescription d'une aide technique telle qu'un déambulateur permet de stabiliser les sujets.

B Marche cérébelleuse

La démarche du cérébelleux est également nommée « **pseudo-ébrioise** ». 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, une attitude éventuelle en balancier des membres supérieurs, ainsi qu'une augmentation des temps de doubles appuis au prorata des phases d'appuis unipodales. Ce trouble n'est pas aggravé en cas de privation visuelle. La prescription d'une aide technique telle qu'un déambulateur permet de stabiliser les sujets.

C Marche labyrinthique

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

D Marches instables non systématisées

D.1 Formes associées

L'association d'une ataxie proprioceptive et d'un syndrome cérébelleux, comme dans la maladie de Friedreich (dégénérescence spinocérébelleuse) ou la sclérose en plaques, montre un malade qui titube et talonne.

La démarche cérébellospasmodique se voit également dans la sclérose en plaques, parfois associée à une ataxie.

D.2 Astasie-Abasie

L'**astisie** correspond à l'instabilité de la 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**.

D.3 Démarche apraxique

Dans la démarche apraxique le sujet a un polygone de sustentation élargi, avec une attitude en flexion. 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, d'hématomes sous-duraux chroniques voire de maladie d'Alzheimer.

D.4 Formes choréo-athétosiques

Les sujets présentent des mouvements involontaires (y compris des membres supérieurs) et une relative hypotonie, responsables d'une marche festonnante, et d'une grande instabilité.

D.5 Formes iatrogènes

Certains médicaments psychotropes (effet sédatif) peuvent donner une marche dite « chancelante » avec un sujet hypotonique et peu vigile.

4.2.3 Troubles de la marche du syndrome parkinsonien

Le syndrome parkinsonien est associé à des perturbations relativement stéréotypées de la marche, souvent associées à des troubles de l'équilibre :

- **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 de seuils par exemple).
- Perte du balancement d'un ou des membres supérieurs
- Demi-tour décomposé

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

4.2.4 Limitation du périmètre de marche, douloureuse ou non

La marche est parfois associée à des douleurs qui ne provoquent pas à proprement parler une boiterie, mais qui limitent le périmètre de marche. On parle de claudication intermittente quand la marche est douloureuse (avec ou sans boiterie) et/ou limitée. Le traitement est étiologique.

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 anteflexion rachidienne. Elle le plus souvent liée à un canal lombaire rétréci dégénératif, et est associée à une raideur lombaire douloureuse.

La claudication artérielle est en rapport avec une artériopathie 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 : abolition d'un pouls du membre inférieur (fémoral, poplité, tibial postérieur, pédieux), souffle artériel (aortique, iliaque, fémoral ou poplité), index de pression systolique diminué (P. syst. cheville / P. syst. Bras), et des signes d'ischémie cutanée (pâleur, température cutanée abaissée, ulcère artériel, nécrose cutanée).

La claudication rhumatologique est secondaire à une douleur liée aux articulations (coxarthrose et gonarthrose) ou tendons 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.

4.2.5 Troubles de la marche d'origine psychogène

La marche précautionneuse est caractérisée par un équilibre précaire, 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. Il s'agit d'une démarche prudente liée à une anxiété apparue secondairement à des chutes et pouvant conduire à une véritable staso-basophobie. Cette marche est rencontrée dans le syndrome post-chute.

Des troubles de la marche d'origine hystérique existent. Le diagnostic est évoqué devant la présence des éléments suivants : début brutal suite à un choc psychologique, trouble de la marche ne répondant pas aux schémas classiques, variabilité des troubles dans le temps.

4.2.6 Vieillesse de la marche

La marche sénile correspond au vieillissement « physiologique » de la marche. Elle est caractérisée par une vitesse diminuée, un raccourcissement du pas par diminution des mouvements du bassin et de la hanche, une diminution de la hauteur du pas (pas rasants voire trainants), une augmentation de la largeur du pas, ainsi que par une augmentation des temps d'appuis. Il y a globalement une réduction des amplitudes de 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 la survenue de chutes.

5 Conclusion

La connaissance des caractéristiques d'une marche normale est essentielle du fait de la fréquence des troubles de la marche. La description d'un trouble de la marche doit être méthodique. Les anomalies sont décrites aux différents niveaux articulaires en fonction des différentes phases du cycle de marche. Divers outils paracliniques sont disponibles pour caractériser et quantifier la marche d'un sujet, ce qui permet de suivre l'évolution des caractéristiques de la marche après une intervention thérapeutique médicale, rééducative ou chirurgicale. Des explorations complexes sont parfois nécessaires afin d'identifier les causes primaires de la boiterie qu'il faut traiter, et les anomalies compensatoires qu'il faut respecter.