

---

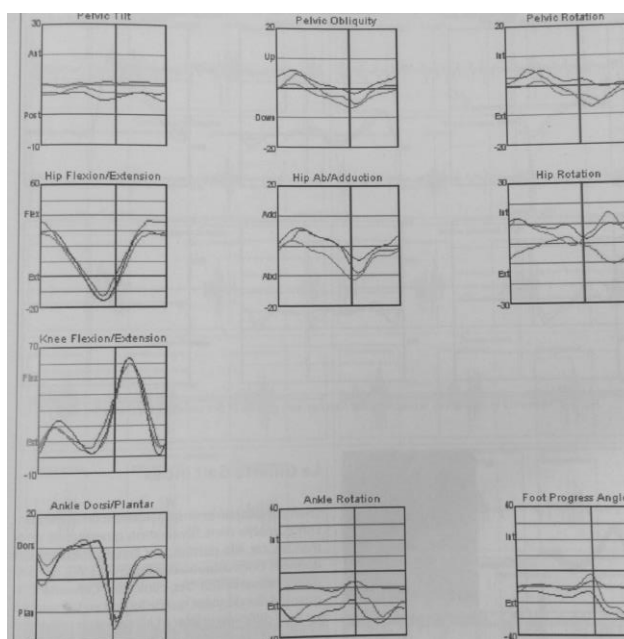
# Analyse cinématique et cinétique de la marche chez l'enfant

## a. Principe de l'analyse de la marche

La marche est un phénomène cyclique, dont le cycle est défini par 2 attaques consécutives du même pied sur le sol. Dans le cas de la marche normale, cela correspond aux attaques du même talon sur le sol. Habituellement le cycle de la marche est divisé en 2 phases : la phase d'appui (60% du cycle) et la phase oscillante (40% du cycle).

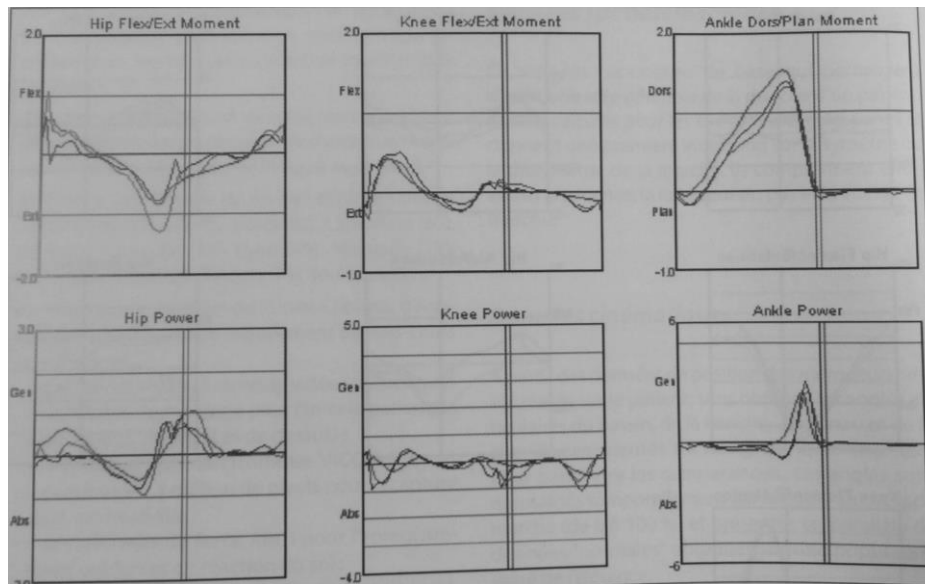
L'AQM donne des données cinématiques et cinétiques.

Les données cinématiques (figure 1.14) sont les angles articulaires du bassin, de la hanche, du genou et de la cheville, présentés sur des graphiques. Ces angles sont normalisés par rapport au cycle de marche (de 0 à 100%) et présentés en parallèle de données « normales » obtenues sur une population saine de référence.



**Figure 1.14 :** Cinématique du bassin des hanches des genoux et des chevilles chez un sujet sain. (In : *Marche pathologique de l'enfant paralysé cérébral*, Sauramps médical 2009)

Les données cinétiques (figure 1.15) se fondent sur les forces de réaction sont recueillies lors du passage sur les plateformes de force qui calculent la direction et l'intensité du vecteur de réaction du sol dans les 3 plans de l'espace. L'étude des moments permet de comprendre l'origine du mouvement observé à l'articulation. La puissance articulaire renseigne sur le type de contraction d'un groupe musculaire. Il peut générer ou absorber de l'énergie. La puissance est nulle si aucun mouvement n'est enregistré à l'articulation.



**Figure 1.15 :** Moments et puissances articulaires des hanches, genoux et cheville chez un sujet sain (In : *Marche pathologique de l'enfant paralysé cérébral*, Sauramps médical 2009)

## b. Le pied dans l'analyse de la marche

Le pied en analyse de la marche pose le problème particulier de la difficulté de placement des repères, en raison de son volume restreint. En effet, le nombre élevé de marqueurs nécessaires pour définir les paramètres d'intérêt et créer les segments nécessaires pour étudier le mouvement à l'intérieur du pied pendant la marche rend ce problème particulièrement aigu chez l'enfant. La faible distance entre les marqueurs augmente l'erreur associée à la détection de position sur le système de capture de mouvement. Dans l'analyse de la marche standard, les modèles cliniques représentent habituellement le pied comme un seul vecteur rigide permettant seulement un angle de progression du pas et la détermination de la flexion dorsale ou plantaire.

Dans la littérature, plusieurs modèles sont proposés pour analyser le pied en plusieurs segments afin de calculer les mouvements entre ces différents segments. Parmi les modèles multi segments proposés dans la littérature, celui qui nous a paru le plus pertinent pour la suite du travail est celui proposé par Learnidi *et al.*, connu comme le « Rizzoli Multi segment foot model ».

Ce modèle a été conçu pour étudier au cours de la marche un nombre maximal de segments. Il considère le pied comme un complexe rigide en 3 Dimensions, formé du calcanéum, du médio pied et des métatarsiens. Cela permet donc d'évaluer les mouvements se situant entre le calcanéum et le médio pied, le calcanéum et les métatarsiens, et le médio pied et les métatarsiens.

## Chapitre 2 : Revue de littérature

## **1. Description des membres inférieurs**

### **a. Clinique**

Ainsi qu'énoncé dans le début de l'exposé, de nombreux moyens existent quand il s'agit d'évaluer et de décrire les membres inférieurs en statique.

L'analyse clinique observationnelle simple est la plus anciennement décrite, et a fait l'objet de plusieurs publications, concernant les membres inférieurs et le pied. Le tableau ci-dessous rappelle les principaux éléments de ces études cliniques.

Auteur	Nombre de patients	Age	Membre inférieur	Pied	Paramètres	Valeur des paramètres
Staheli <i>et al.</i> , (1985)	1000	1 à 70 ans	X	X	Angle progression du pas	-3° à 20°
					Rotation interne hanche	25-60°
					Rotation externe hanche	25-65°
					Angle pied cuisse	-5° à 30°
					Angle bimalléolaire	0-45°
Fabry (2010)	Série non décrite	X	X	Pied plat / creux	Plat jusqu'à 4 ans	
				Genu varum / valgum	Valgus après 4 ans, se corrige vers 7 ans	
Lösel <i>et al.</i> , (1996)	400	4-16	X	X	Angle du pas	-8° à 16°
Lerat (1982)	Série non décrite	X	non	Torsion fémorale	7-21°	
				Torsion tibiale	26-42°	
				Angle de torsion malléoles - pied	9°	
Mudge <i>et al.</i> , (2013)	53	4-16	X	X	Antéversion fémorale	7-46°
					Torsion tibiale	3-32°
					Varus/valgus	2-9°

**Tableau 2.1 :** revue de littérature : évaluation clinique des membres inférieurs en pratique médicale, segment de membre et paramètres étudiés.

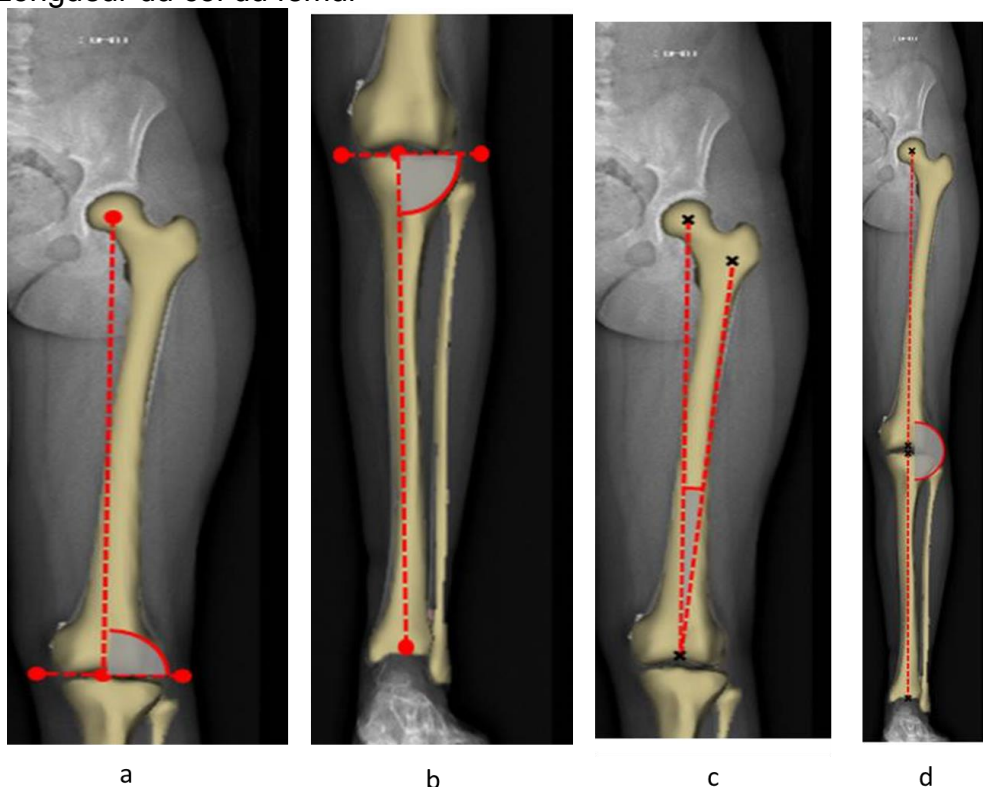
Sur le plan clinique, malgré le grand nombre de patients inclus dans les séries, l'évaluation des valeurs des angles articulaires reste assez approximative, avec une évaluation se fondant sur un examen clinique dont la reproductibilité n'est pas établie.

## b. Radiologie 2 dimensions

Outre les évaluations cliniques, dans la littérature, plusieurs auteurs ont publié des travaux rapportant les résultats de radiologie en 2 dimensions (radiologie standard) afin d'établir des valeurs de référence de différents paramètres de pangonométrie et de mesures du pied.

Les principales mesures de pangonométrie utilisées couramment sont les suivantes (figure 2.16):

- Angle fémoral mécanique (figure 2.16a) = MFA = Angle entre axe mécanique du fémur et tangente à la partie distale des condyles fémoraux
- Angle tibial mécanique (figure 2.16b) = MTA = Angle entre axe mécanique du tibia et tangente aux plateaux tibiaux projetés
- Angle HKS (figure 2.16c) = Angle entre axe mécanique et anatomique du fémur
- Angle fémoro-tibial (figure 2.16d) = AFT = Angle entre axe mécanique du fémur et axe mécanique du tibia
- Angle cervico diaphysaire= ACD= Angle entre l'axe anatomique du fémur et axe du col du fémur
- Longueur du fémur et du tibia
- Diamètre de la tête fémorale
- Longueur du col du fémur



**Figure 2.16** : Pangonométrie

**Figure 2.16a** : Angle Femoral mécanique : Angle entre axe mécanique du fémur et tangente à la partie distale des condyles fémoraux

**Figure 2.16b** : angle tibial mécanique : Angle entre axe mécanique du tibia et tangente aux plateaux tibiaux projetés

**Figure 16c** : HKS : Angle entre axe mécanique et anatomique du fémur

**Figure 16d** : angle fémoro tibial : Angle entre axe mécanique du fémur et axe mécanique du tibia

En ce qui concerne le pied, les angles radiologiques utilisés quotidiennement par les cliniciens sont les suivants (figure 2.17) :

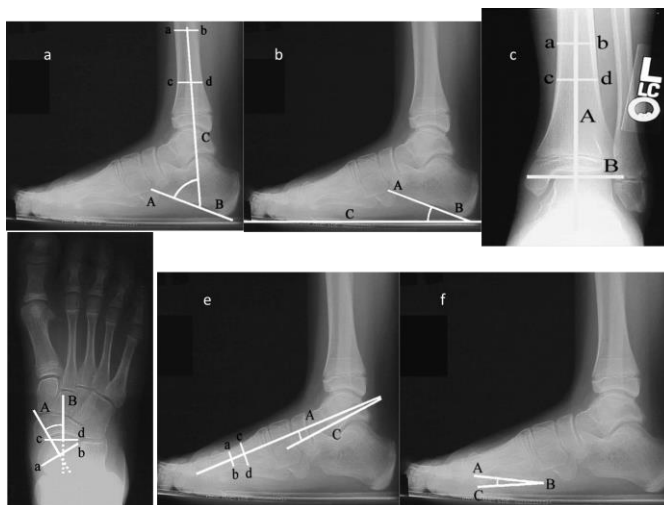
- **Arrière pied**

- angle tibio calcanéen : angle formé sur une radiographie de profil du pied par l'axe du calcanéum et celui du tibia
- angle d'incidence du calcaneum : angle formé sur une radiographie de profil du pied par l'axe du calcanéum et le sol
- angle d'inclinaison du talus : angle formé sur une radiographie de face de la cheville entre l'axe du tibia et celui de la tangente au dôme du talus
- divergence talocalcanéenne

- **Médio pied** : angle de couverture talo naviculaire : angle formé sur une radiographie dorso plantaire du pied par l'axe du talus et celui de l'os naviculaire

- **Avant pied**

- angle talus 1<sup>er</sup> métatarsien de Méary : angle formé sur une radiographie de profil du pied par l'axe du 1<sup>er</sup> métatarsien et celui du talus
- angle d'incidence du 1<sup>er</sup> métatarsien : angle formé sur une radiographie de profil du pied par l'axe du 1<sup>er</sup> métatarsien et le sol



**Figure 2.17:** angles du pied

**Figure 2.17a :** angle tibio calcanéen : angle formé sur une radiographie de profil du pied par l'axe du calcanéum et celui du tibia

**Figure 2.17b :** angle d'incidence du calcaneum : angle formé sur une radiographie de profil du pied par l'axe du calcanéum et le sol

**Figure 2.17c :** angle d'inclinaison du talus : angle formé sur une radiographie de face de la cheville entre l'axe du tibia et celui de la tangente au dôme du talus

**Figure 2.17d :** angle de couverture talo naviculaire : angle formé sur une radiographie dorso plantaire du pied par l'axe du talus et celui de l'os naviculaire

**Figure 2.17e :** angle talus 1<sup>er</sup> métatarsien de Méary : angle formé sur une radiographie de profil du pied par l'axe du 1<sup>er</sup> métatarsien et celui du talus

**Figure 2.17f :** angle d'incidence du 1<sup>er</sup> métatarsien : angle formé sur une radiographie de profil du pied par l'axe du 1<sup>er</sup> métatarsien et le sol

Le pied et les membres inférieurs ont fait l'objet de nombreuses publications visant à décrire les angles les caractérisant, et à en publier des valeurs de références.

Le tableau ci-dessous est la revue de littérature des principaux articles concernant cette description radiologique des membres inférieurs et du pied.



Auteur	N patient	Age	Membre inférieur	Pied	Paramètres	Valeurs paramètres	Reproductibilité
Sabarwal <i>et al.</i> , (2008)	354	1-18	X	non	AFT	5,3°- 7,6°	Non
					AFM	87,7-88,3°	Non
					ATM	87,7-90°	Non
Nowicki <i>et al.</i> , (2012)	32	10-18	X	non	AFT	N/A	Oui
					AFM	N/A	oui
					ATM	N/A	Oui
Salenius <i>et al.</i> , (1975)	1480	1-13	X	non	AFT	15° varus à la naissance valgus autour de 5°	Non
Saini <i>et al.</i> , (2010)	215	2-15	X	non	AFT	4,6-7,9°	Non
Bourdet <i>et al.</i> , (2013)	65	7-18	Non	X	DTC	35-50°	Non
					IC	20-30°	Non
					Angle de Méary	2-14°	Non
					Angle M1 sol	1°-20°	Non
Davids <i>et al.</i> , (2005)	60	5-17	Non	X	Angle tibio calcanéen	65-75	Non
					DTC	36-61	Non
					IC	5-32	Non
					Inclinaison du talus	-9° 12°	Non
					Angle de couverture talo naviculaire	5-39	Non
					Angle de Méary	1-35	Non
					Angle M1 sol	1-13	Non
Roth <i>et al.</i> , (2013)	121	8-15	Non	X	DTC	35-50°	Non
					Angle de Méary	2-14°	Non

**Tableau 2.2** : revue de littérature : évaluation radiologique des membres inférieurs en pratique médicale, segment de membre et paramètres étudiés. (AFT : angle fémoro tibial, AFM : angle fémoral mécanique, ATM : angle tibia mécanique ; DTC : divergence talo calcanéenne ; IC : incidence calcanéenne )

Une étude a montré une bonne corrélation dans la mesure de l'angle fémorotibial clinique et radiologique (Kraus et al. 2005, ICC 0,94).

Ces différents articles utilisent des données issues de populations adultes ou pédiatriques, et ont l'inconvénient principal de ne donner que des valeurs de

paramètres mesurés en 2 dimensions, alors qu'il s'agit d'un objet en 3 dimensions, dont l'étude du comportement dans les 3 plans de l'espace est capitale. De plus, l'étude du pied ou du membre inférieur n'est jamais réalisée de manière conjointe dans ces articles, qui s'en tiennent à la description de l'une ou de l'autre des structures.

En ce qui concerne le scanner, nous n'avons pas retrouvé d'article étudiant les paramètres longitudinaux des membres inférieurs de l'enfant par scanner, ni de travaux décrivant le pied de l'enfant en charge par le scanner.

### **c. Radiologie biplane et reconstructions en 3 dimensions**

L'étude de la littérature permet de colliger de nombreux articles concernant les membres inférieurs.

Auteur	sujet	Sain / patho	Age	Moyen	Membre inférieur	Pied	Para- paramètres	Repr o
Szuper <i>et al.</i> , (2015)	508	sains	4-16	EOS-3D clinique	X	non	DTF	oui
							LC	
							ACD	
							TF	
							TT	
Quijano <i>et al.</i> , (2013)	11	sains	adultes	EOS-3D recherche	X	Non	LF	Oui
							LT	
							DTF	
							ACD	
							HKS	
							AFT	
							AFM	
							ATM	
							TF	
							TT	
Thepaut <i>et al.</i> , (2016)	38	PC		EOS-3D recherche	X	Non	AF	Oui
Schlegl <i>et al.</i> , (2015)	523	sains	2-16	EOS-3D clinique	X	non	AFT	Oui
							AFM	
							ATM	
							HKS	
Guenoun <i>et al.</i> , (2012)	25	Arthrose hanche	Adultes	EOS-3D clinique	X	Non	DTF	Oui
							LC	
							ACD	
							HKS	
							LF	
LT								
Assi <i>et al.</i> , (2013)	10	PC	5-15	EOS-3D recherche	X	non	AFT	Oui
							AFM	
							ATM	
							HKS	
							ACD	
							TF	
							TT	
Than <i>et al.</i> , (2012)	197	Sains ou arthrose	Adultes	EOS-3D Clinique	X	non	DTF	Non
							LC	
							AFT	
							HKS	
Gaume tou <i>et al.</i> , (2014)	114	sains	6-30	EOS-3D Recherche	X	non	TF	Oui
							TT	

**Tableau 2.3 :** revue de littérature : évaluation par radiographies biplanes et reconstructions 3D des membres inférieurs en pratique médicale, segment de membre et paramètres étudiée. (TF : torsion fémorale, TT : torsion tibiale, LF : longueur fémur, LT : longueur tibia, DTF : diamètre tête fémorale, ACD : angle cervico diaphysaire, AFT : angle fémoro tibial, AFM : angle fémoral mécanique, AFT : angle tibia mécanique, AF : antéversion fémorale ; LC : longueur du col fémoral ; PC : paralysés cérébraux)

Ces articles concernent tous les reconstructions basées sur radiographies biplanes de membres inférieurs, le pied n'y est jamais abordé.

De plus, les membres inférieurs considérés sont soit sains, Soit issus de patients arthrosiques. Pour les populations pédiatriques, le seul groupe de patient non sain considéré consiste en des enfants paralysés cérébraux. Les autres anomalies, par exemple le pied bot varus équin congénital idiopathique n'a jamais été étudié.

Enfin, quelques articles concernent la comparaison des données issues d'EOS et celle issues du CT-Scan chez l'enfant, mais concernent uniquement des paramètres de torsion des membres inférieurs (comme indiqué dans le tableau ci-dessous).

Auteur	Nombre patients	Age	Moyen	Membre inférieur	Pied	Para-mètres	Compa- raison avec CT- Scanner
Roskopf <i>et al.</i> , (2014)	50	5-15	EOS-3D	X	non	TF	Oui
						TT	
Meyrignac <i>et al.</i> , (2014)	30	8-18	EOS-3D	X	non	TF	oui
						TT	
Folinais <i>et al.</i> , (2013)	43	Adultes	EOS-3D	X	non	TF	Oui
						TT	
Quijano <i>et al.</i> , (2013)	11	Adultes	EOS-3D recherche	X	Non	LF	Oui
						LT	
						DTF	
						ACD	
						HKS	
						AFT	
						AFM	
						ATM	
						TF	
						TT	
Thepaut <i>et al.</i> , (2016)	38		EOS-3D	X	Non	AF	Oui

**Tableau 2.4:** revue de littérature : comparaison résultats EOS 3D et scanner (TF : torsion fémorale, TT : torsion tibiale, LF : longueur fémur, LT : longueur tibia, DTF : diamètre tête fémorale, ACD : angle cervico diaphysaire, AFT : angle fémoro tibial, AFM : angle fémoral mécanique, ATM : angle tibia mécanique, AF : antéversion fémorale)

De cette revue de littérature, on peut donc conclure que pour l'instant, l'évaluation des paramètres cliniques du MI par radiographies biplanaires d'enfant a principalement porté sur les différences entre les mesures 2D et 3D, ou la comparaison des valeurs de torsion par rapport au scanner.

Les publications concernant la faisabilité des reconstructions issues d'EOS® dans la littérature concernent essentiellement l'adulte (Chaibi *et al.*, 2012, Quijano *et al.* 2013) ou en ce qui concerne l'enfant sont des publications de recherche strictes (Assi *et al.* 2013). Ceci implique plusieurs biais : tout d'abord, les patients inclus dans les études sont sélectionnés en amont, lors d'une consultation, et sont ensuite adressés vers le laboratoire afin de réaliser l'acquisition de l'imagerie, qui se fait de manière programmée et dédiée. Ensuite, les reconstructions sont réalisées par des opérateurs experts, ayant une connaissance approfondie du logiciel de reconstruction. Cela n'est donc pas révélateur des conditions de routine clinique, dans lesquelles les patients ne sont pas sélectionnés en fonction de leurs éventuelles capacités, et au cours desquelles les reconstitutions sont réalisées par des manipulateurs de radiologie ayant eu un entraînement standard de routine au système. Pour corroborer ce point, une revue de littérature (McKenna *et al.* 2012), conclut que les études existantes se limitent principalement en l'établissement de l'intérêt technique de base du système et que des études cliniques sont nécessaires.

De plus, puisqu'il s'agit d'un nouveau moyen d'évaluation des membres inférieurs, il est indispensable d'avoir des valeurs de références des paramètres considérés quand ils sont mesurés par ce système, afin de pouvoir utiliser les résultats obtenus en clinique courante.

## 2. Influence du pied sur le membre inférieur

L'influence relative de l'anatomie du pied sur celle du membre inférieur est controversée dans la littérature, même si une influence en terme de posture et de fonction a été décrite.

Pour 3 auteurs (Lerat 1982, Bollini *et al.*, 1988, Guichet *et al.*, 2003), il existe un lien entre anatomie morphologique du pied et du membre inférieur.

En revanche, Bleck *et al.*, 1983 et Craxford *et al.*, 1984 ne mettent en évidence aucune relation entre torsion tibiale et position du pied au sol lors de la marche dans une population d'une centaine d'enfants âgés de moins de 13 ans.