



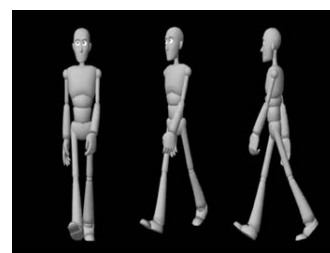
Évaluation clinique et instrumentale de la marche

DES de Médecine Physique et de Réadaptation

Module 3 - Motricité

03/12/2025 – 2h

Pr David GASQ ^{a,b,c}



^a Université de Toulouse, Faculté de Santé, Département Médecine, Maïeutique & Paramédicaux

^b Clinique Universitaire du Mouvement, Physiologie Explorations Fonctionnelles, CHU de Toulouse

^c Univ Toulouse, Inserm, ToNIC, Toulouse gasq.d@chu-toulouse.fr



Déroulé pédagogique

2 / 105

Biomarqueurs et
analyse
instrumentale

Analyse
observationnelle

Anomalies I, II et
compensatrices

Boiteries

- Connaissances du cycle de marche, de ses descripteurs et des outils d'évaluation.
- Être capable de réaliser une analyse observationnelle de la marche systématique et ordonnée, éventuellement basée sur une échelle cotée à partir d'une vidéo.
- Être capable de distinguer les anomalies primaires des anomalies secondaires et compensatrices en cas de boiterie.
- Être capable de reconnaître et caractériser les principales anomalies de la marche en phase d'appui et en phase oscillante.

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025



3 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Analyse de la marche ?



Quel biomarqueur ?

Avec quel outil ?

Quel contexte et quelle population ?



A. Parati et al. 2023. B. Andersson et al. 2024.



4 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Biomarqueurs et outils d'évaluation de la marche



	Description de la marche	Pressions plantaires	Paramètres spatio-temporels	Cinétique	Cinématique 3D	EMG dynamique
Outils						
Échelles cliniques et/ou vidéo sans quantification instrumentale	X					
Vidéo +/- infra-rouge avec quantification			X		X	
Capteurs de pressions (contacteurs plantaires, tapis de marche, semelles embarquées)		X	X			
Stations inertielles			X		X	
Plateformes de force			X	X		
Systèmes optoélectroniques 3D (marqueurs passifs ou actifs)			X		X	
EMG de surface ou implantée						X
Niveaux d'analyse de la marche (outils utilisables pour chaque niveau d'analyse de marche : cf. première partie du tableau)						

Revue systématique de littérature sur les propriétés de mesure des données instrumentales d'évaluation de la locomotion humaine, dans l'objectif de proposer des recommandations métrologiques → en cours



5 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

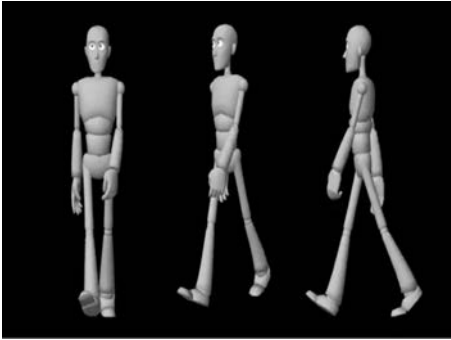
DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Marche

- Mode de locomotion naturel de l'adulte
- Combine maintien de la stabilité et propulsion
- Action combinée et cyclique des deux membres inférieurs





6 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

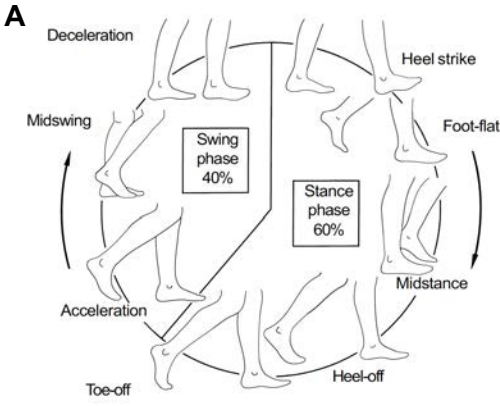
DES MPR – Mod 3

D. GASQ

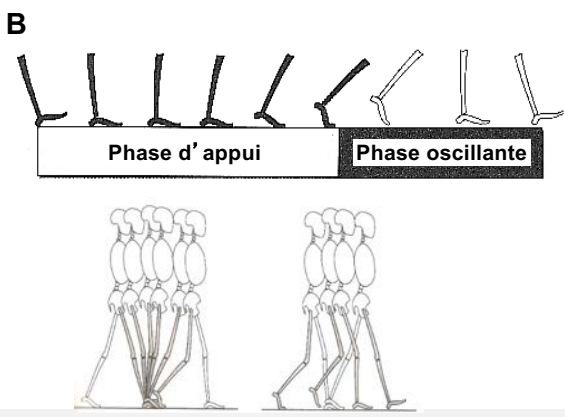
03/12/2025

Le cycle de marche

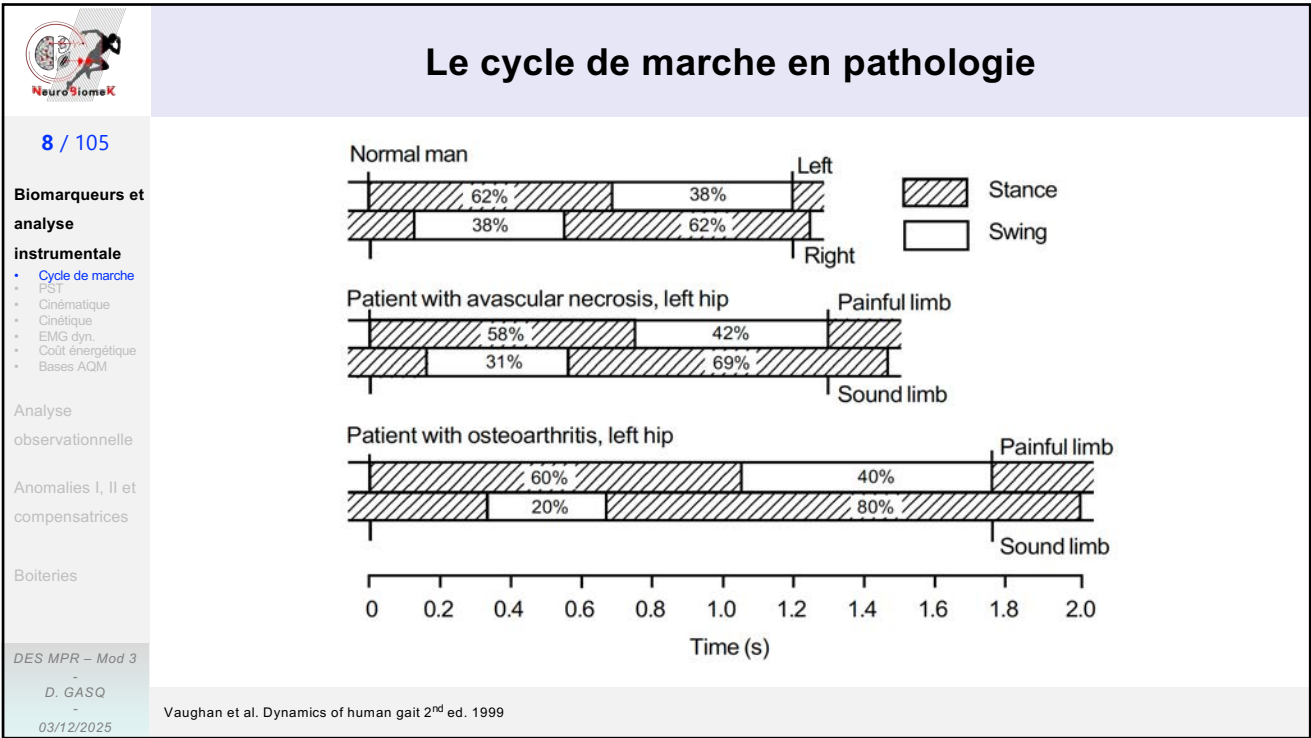
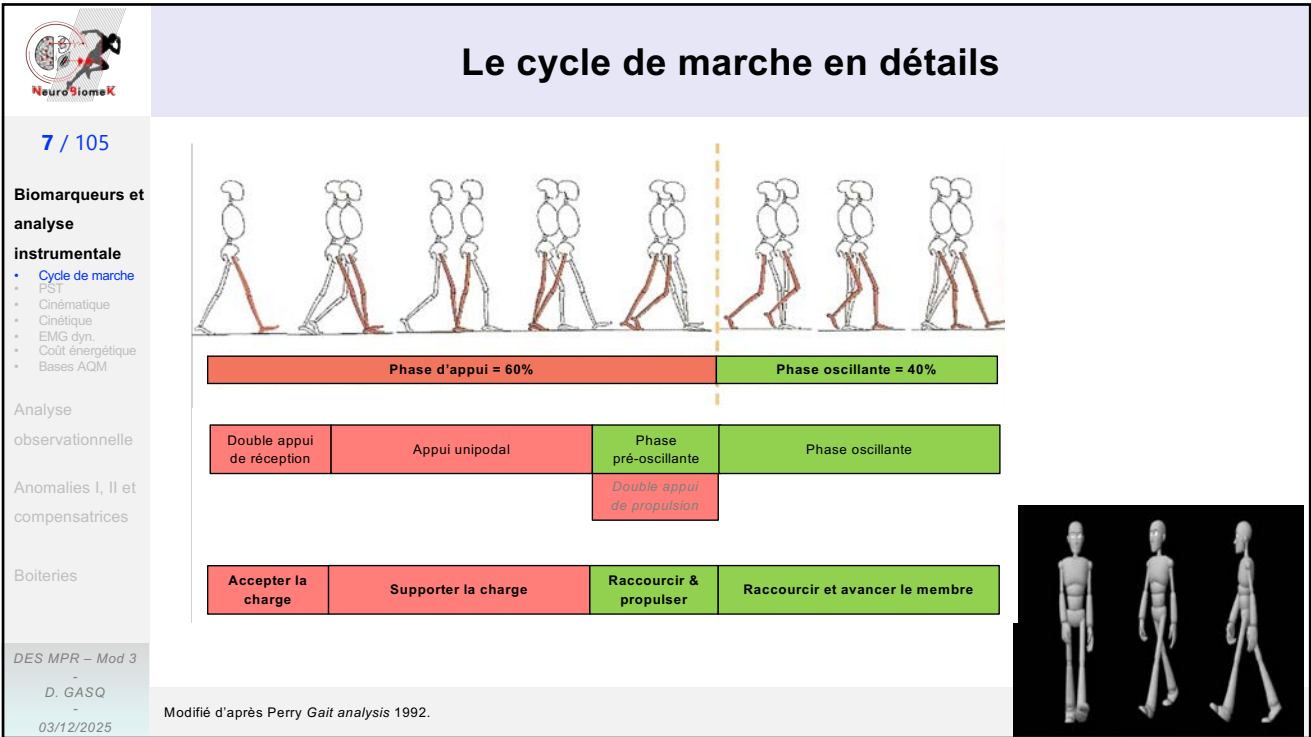
A

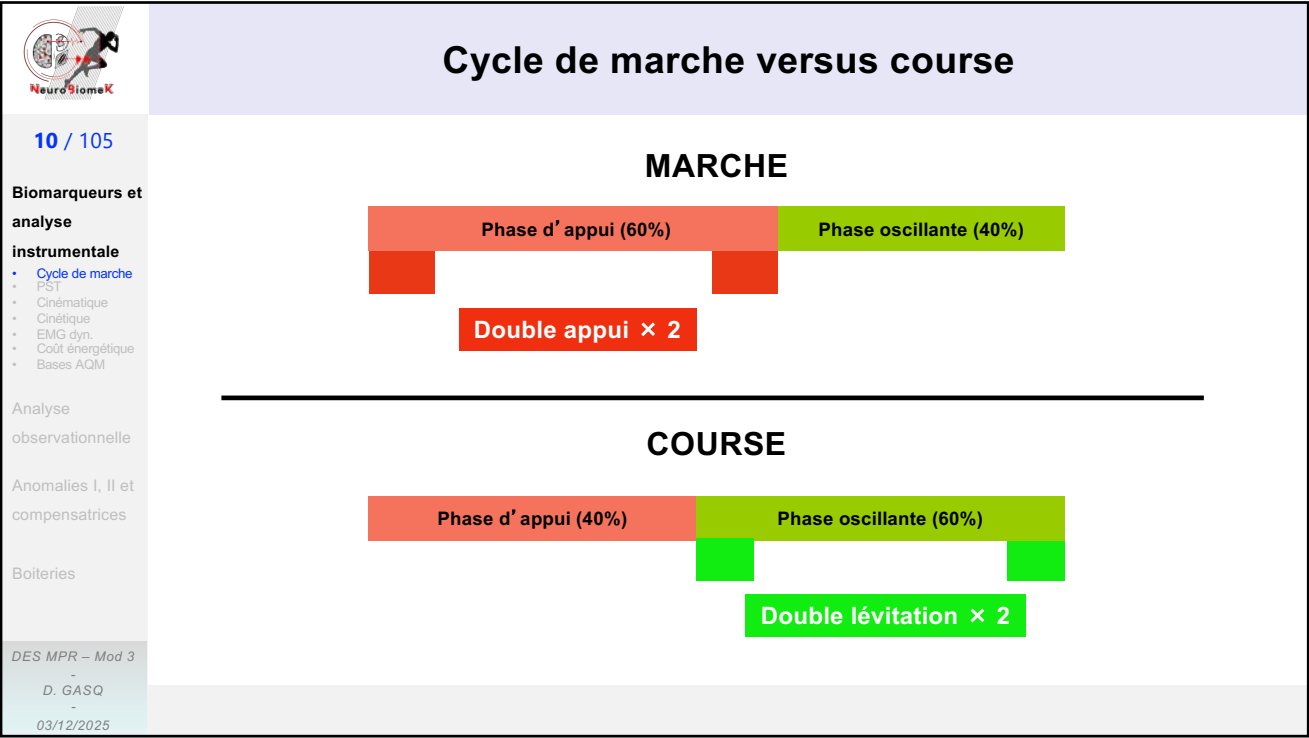
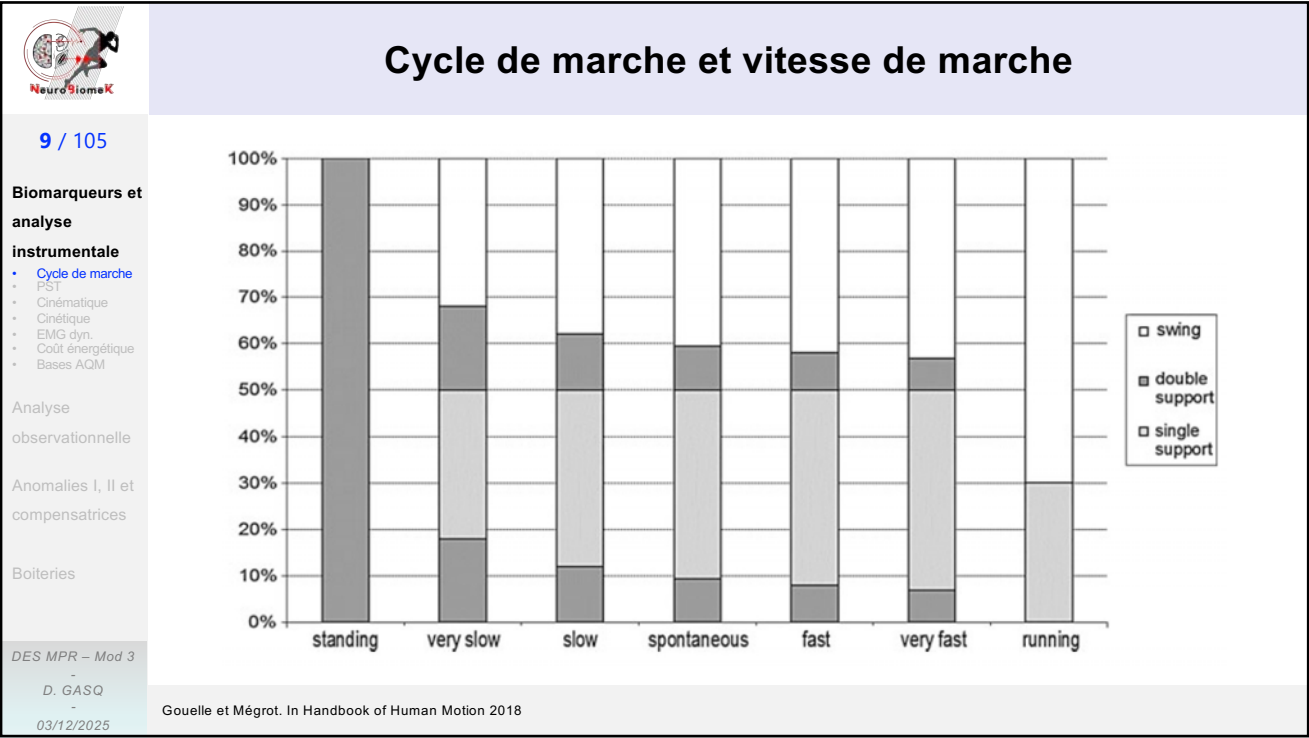


B



A. Vaughan et al. Dynamics of human gait 2nd ed. 1999. B. D'après Perry J. Gait analysis 1992.







11 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3
D. GASQ
03/12/2025

Le télescope et/ou le microscope ?

Évaluer la fonction





Approche globale

Décryptage de la boiterie



12 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- **PST**
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3
D. GASQ
03/12/2025

Aspects généraux

- Données indispensables à relever
 - Allure : lente, spontanée, rapide, maximale ?
 - Utilisation d'une aide de marche : canne, déambulateur, orthèse, chaussage ?
 - Stabilité du sujet : polygone de sustentation, embardées, ...
- Est-ce qu'il y a une boiterie ?
 - *Marche d'allure anormale, le plus souvent irrégulière, à l'observation et éventuellement à l'audition*




D'après Murray et al. 1969



Paramètres spatio-temporels

13 / 105

Biomarqueurs et analyse

instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse

observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtieres

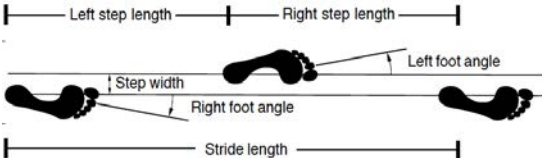
DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Paramètres spatiaux

- Longueur du pas (step) $\rightarrow 0,6 \text{ à } 0,8m$
- Longueur d'enjambée (stride) $\rightarrow pas D + G$
- Largeur du pas $\rightarrow 6 \text{ à } 8 \text{ cm}$
- Angle du pas $\rightarrow 10 \text{ à } 15^\circ$
- Hauteur / clairance du pas $\rightarrow 1 \text{ à } 2 \text{ cm}$
- Asymétrie spatiale de longueur du pas



The diagram shows a top-down view of a gait cycle. It labels the 'Left step length' and 'Right step length' as the distance from the heel of one foot to the heel of the other. 'Step width' is the lateral distance between the feet. 'Left foot angle' and 'Right foot angle' are the angles of the feet relative to the direction of travel. 'Stride length' is the total distance covered by one full cycle of two steps.

Paramètres temporels

- Cadence $\rightarrow 100 \text{ à } 130 \text{ pas/min}$
- Vitesse de marche (m/s) : spontanée, maximale?
 - Durée d'un cycle de marche $\sim 1 \text{ seconde}$
 - Cadence $\times (\text{Long. Enjambée} / 2) / 60 \rightarrow 1,2 \text{ à } 1,4 \text{ m/s}$
- Temps d'appui unipodal et bipodal (% du cycle)
- Asymétrie temporelle d'appui unipodal
 - $[(G - D) / (D + G)] \times 100$

DAR G	AU G	DAP G / PPO G	PO G
DAP D / PPO D	PO D	DAR D	AU D

Vaughan et al. Dynamics of human gait 2nd ed. 1999



NeuroBiomeK

Paramètres spatio-temporels



14 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

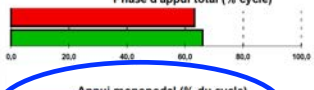
Boîteries

	Stat	Moyenne	Ecart type	CV (%)	% Norme	Normes
Vitesse de marche (m/s)		0,85	0,03	3,5	-35 / D	1.31 +/- 0.09
Cadence (pas/mn)		107,4	2,47	2,3	-18 / D	131 +/- 10
Longueur d'enjambée (m)		0,95	0,02	2,3	-30 / D	1.4 +/- 0.1
Longueur du pas (m)		0,57	0,01	2,4	-16 / N	0.68 +/- 0.07
		0,38	0,01	3,8	-45 / D	
Phase d'appui (% cycle)		63,4	1,1	1,8	7 / A	59.2 +/- 1.4
		66,1	1,2	1,9	12 / A	
Appui monopodal (% cycle)		34,6	1,0	3,0	-17 / D	41.8 +/- 1.4
		37,1	1,6	4,3	-11 / D	
Doubles appuis (% cycle)		28,9	1,4	4,8	66 / A	17.4 +/- 1.4
Double appui réception (% cycle)		13,9	1,0	7,4	59 / A	8.7 +/- 1.4
		14,7	0,8	5,6	69 / A	
Double appui propulsion (% cycle)		14,7	0,8	5,6	69 / A	8.7 +/- 1.4
		13,9	1,0	7,4	59 / A	
Index d'asymétrie spatiale (de -100 à +100; + si Gauche > Droite)		20,5			A	0 +/- 3.1
Index d'asymétrie temporelle (de -100 à +100; + si Gauche > Droite)		-3,4			N	0 +/- 2.1
Largeur d'enjambée moyenne (cm)		7,1	1,8	25,6	-12 / N	8 +/- 3.5
Décollage du pied opposé (% du cycle)		13,9	1,0	7,4	39 / N	10 +/- 2
		14,7	0,8	5,6	47 / A	
Contact du pied opposé (% du cycle)		48,5	1,2	2,6	-3 / N	50 +/- 2
		51,8	1,5	2,9	4 / N	

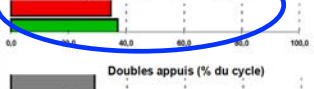
Longueur du pas (m)



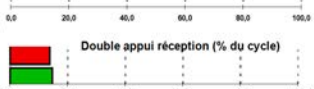
Phase d'appui total (% cycle)



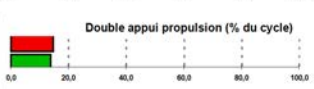
Appui monopodal (% du cycle)



Doubles appuis (% du cycle)



Double appui réception (% du cycle)



Double appui propulsion (% du cycle)



Index Asymétrie Spatiale = 100*(Lg pas G ou Lésé-D ou Sain)/(Lg Pas G + D)

Index Asymétrie Temporelle = 100*(AppuiUnpG ou Lésé-D ou Sain)/(AppuiUnpG + D)

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

 15 / 105 Biomarqueurs et analyse instrumentale • Cycle de marche • PST • Cinématique • Cinétique • EMG dyn. • Coût énergétique • Bases AQIM Analyse observationnelle Anomalies I, II et compensatrices Boîtiers DES MPR – Mod 3 D. GASQ 03/12/2025	Intérêt de l'analyse spatio-temporelle • Normes variables selon – Âge et taille (genre ...) – Déterminants de la vitesse : cadence et longueur d'enjambée • La connaissance des PST permet une analyse pertinente des anomalies de la marche ➔ Tous les paramètres cinématiques, cinétiques et EMG sont vitesse-dépendants • Intérêt évaluatif : caractériser la marche au cours de la récupération, avant/après intervention thérapeutique – Vitesse spontanée et maximale – Asymétries temporelle et spatiale ++ – Étude de la variabilité et de sa complexité (théories de la dynamique)
---	--

 16 / 105 Biomarqueurs et analyse instrumentale • Cycle de marche • PST • Cinématique • Cinétique • EMG dyn. • Coût énergétique • Bases AQIM Analyse observationnelle Anomalies I, II et compensatrices Boîtiers DES MPR – Mod 3 D. GASQ 03/12/2025	 HAUTE AUTORITÉ DE SANTÉ 2006 ANALYSE MÉTROLOGIQUE DE LA POSTURE, DE LA LOCOMOTION ET/OU DES GESTUELLES CHEZ UN PATIENT POLYDÉFICIENT <i>Rachimétrie informatisée, paramètres temporo-spatiaux informatisés de la marche chez un patient polydéficient</i> <i>À l'exclusion des libellés NKGP003, NKGP002 et CEQP005</i> Classement CCAM : 15.01.05 – code : PEQP002 Indications Cet examen est indiqué afin de quantifier des troubles complexes de la marche, chez l'adulte et l'enfant ; il permet de rechercher la cause du trouble, les effets secondaires sur la marche et la compensation conséquente. Chez l'enfant, l'analyse a un intérêt diagnostique reconnu. Place dans la stratégie thérapeutique ou diagnostique L'analyse métrologique de la locomotion, de la posture et/ou des gestuelles vient en complément de l'examen clinique et des autres méthodes manuelles ou instrumentales d'évaluation motrice et/ou morphostatique (radiographie, électromyographie). Cette analyse établit un « diagnostic fonctionnel » en permettant de qualifier et quantifier le déficit. Elle permet ainsi d'orienter le choix des alternatives thérapeutiques (appareillage, médicament, chirurgie) et des procédures de rééducation, et d'assurer le suivi de leur efficacité. Conditions d'exécution <u>Formation nécessaire</u> : soit 3^{ème} cycle formation initiale médecine physique et réadaptation, soit formation complémentaire acquise avec un DIU spécifique (analyse du mouvement). Au-delà de la réalisation de l'acte, c'est son interprétation qui exige aussi des compétences. Ainsi, un rapport précis, avec l'interprétation des données et l'élaboration de propositions thérapeutiques, doit être rédigé.
---	--



17 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- **PST**
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Évaluation spatio-temporelle instrumentale

- **Capteurs de pression**
 - Tous PST (écartement des pieds)
 - Caractérisation de l'appui au sol
- **Dispositifs embarqués**
 - Acélero / Gyro / Magnétomètres



Marche linéaire lancée
Marche en 8
Time Up & Go
Initiation de la marche
Tour complet
Test de Fukuda
etc...






- **Systèmes basés sur la vidéo +/- IR**
- *L'ancêtre = Locomètre (tous PST sagittaux)*





Review
Validity of the Kinect for Gait Assessment: A Focused Review
Shmuel Springer^{1,*} and Galit Yegor Seligmann^{2,3}



REVIEW Open Access

Validity and reliability of wearable inertial sensors in healthy adult walking: a systematic review and meta-analysis
Oylan Kodral^{1,2}, Jesse M. Charlton^{3,3}, Calvin TF. Tse^{1,3}, Jean-François Esculier^{1,4,5}, Angelo Gratton^{1,3}, Natasha M. Kowchuk⁶, Daniel Thatcher⁶ and Michael A. Hunt^{1,6}



18 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- **Cinématique**
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

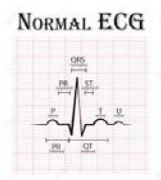
03/12/2025

Analyse cinématique

- **Caractériser les positions des segments et les angles articulaires au cours du temps**



La cinématique c'est systématique !





19 / 105

Biomarqueurs et analyse

instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

La cinématique c'est systématique !

- Caractériser les positions des segments et les angles articulaires au cours du temps
- Analyse « 3D »
 - Plan sagittal +++
 - Plans frontal et horizontal
- 4 temps clés
- Démarche **SYSTEMATIQUE**

MBRE SUP

TRONC

BASSIN

HANCHE

GENOU

CHEVILLE



20 / 105

Biomarqueurs et analyse

instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Données cinématiques

Angles articulaires

FLEX

EXT

Ankle Dorsi/Plantar

0% 100%

CYCLE DE MARCHÉ

Pelvic Tilt

Pelvic Obliquity

Pelvic Rotation

Hip Flex/Extension

Hip Ab/Adduction

Hip Rotation

Knee Flex/Extension

Knee Valgus/Varus

Knee Rotation

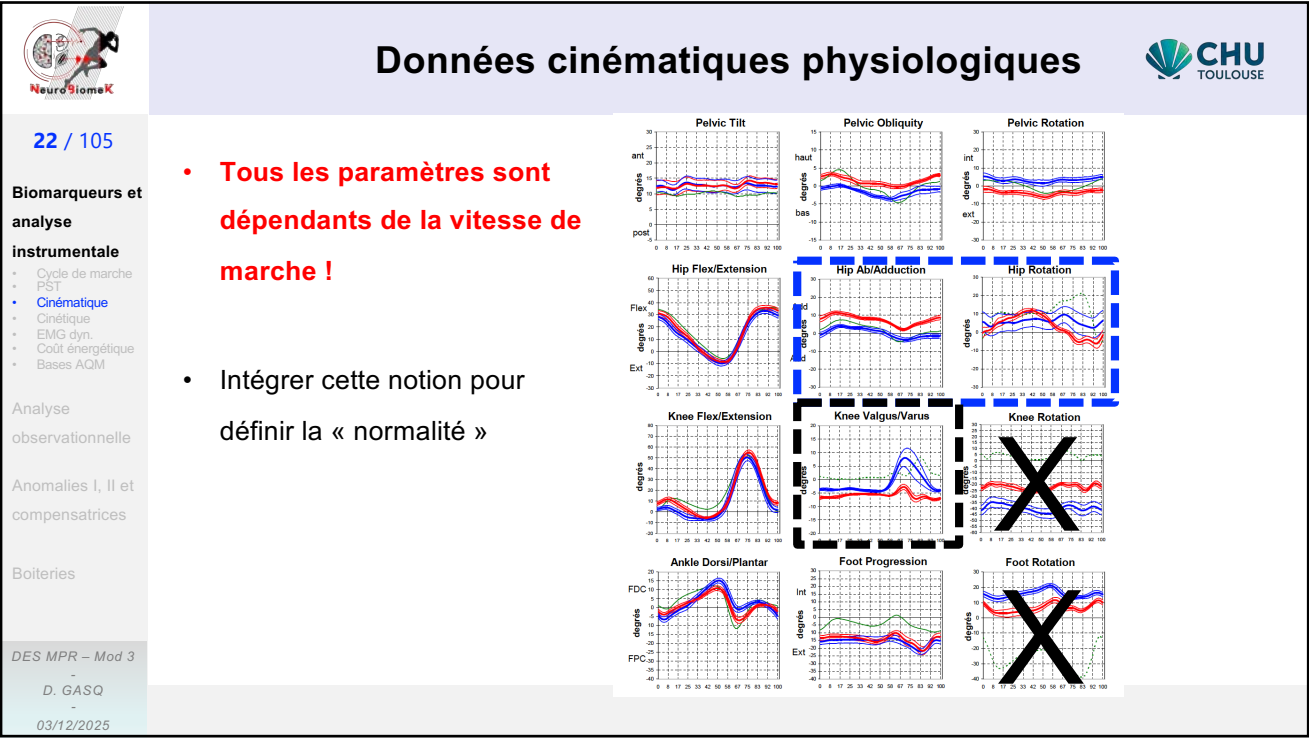
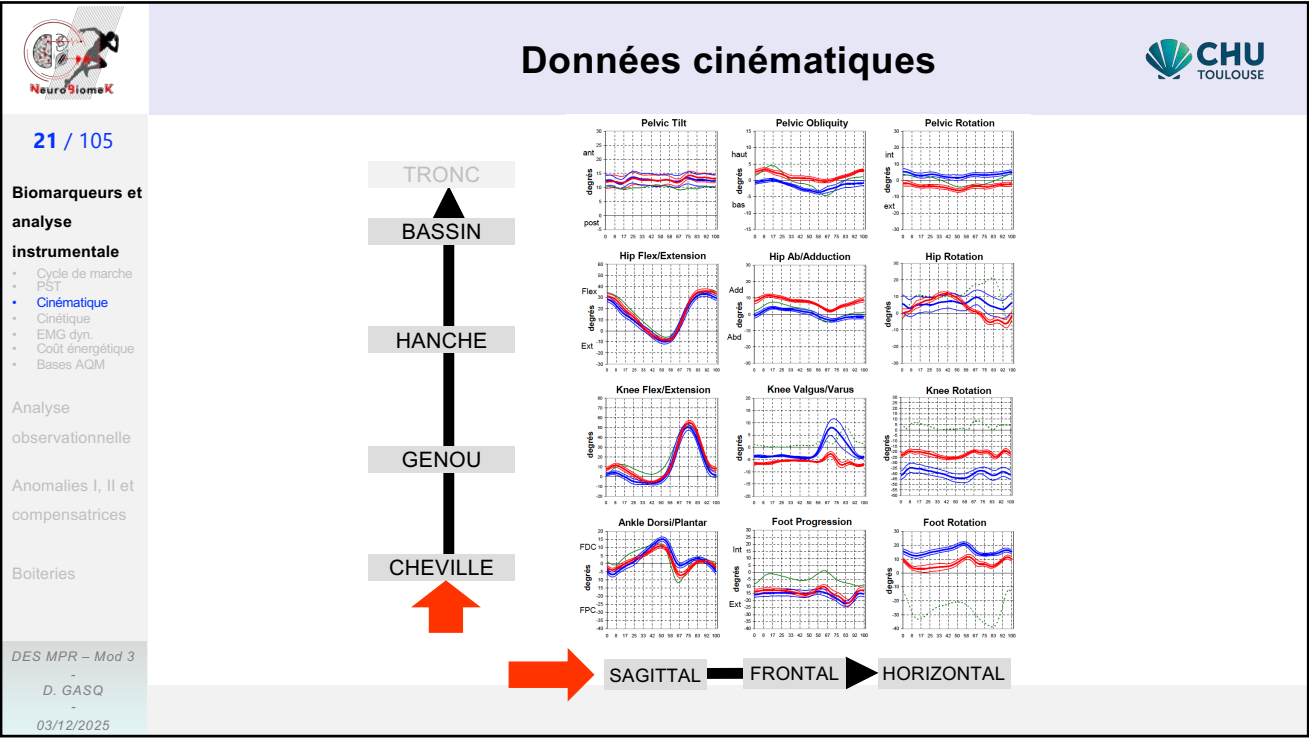
Ankle Dorsi/Plantar

Foot Progression

Foot Rotation

D. Gasq - Toulouse

10



23 / 105

Biomarqueurs et analyse

instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Données cinématiques : pivots de la marche

A B C D

Heel Rocker Ankle Rocker Forefoot Rocker

A. Mayich et al. 2014. B. Perry et al. 1992. C. Wong et al. 2023.

24 / 105

Biomarqueurs et analyse

instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

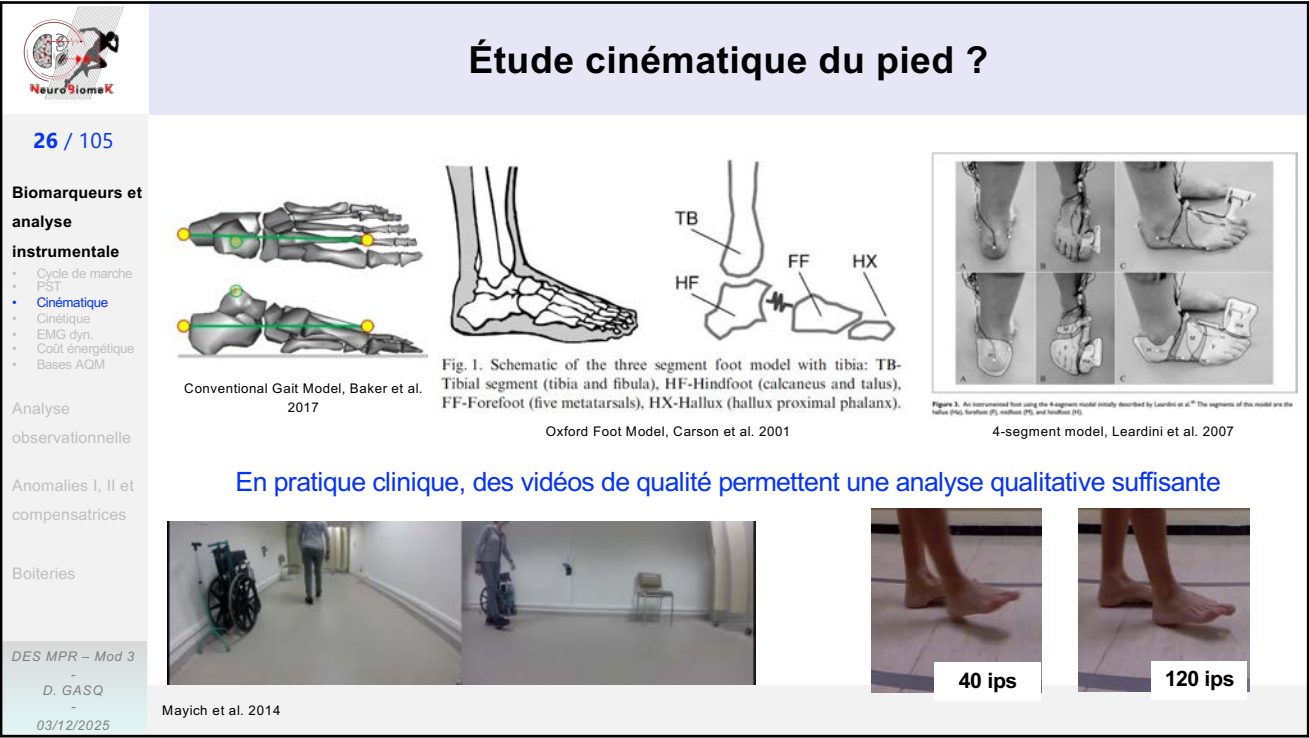
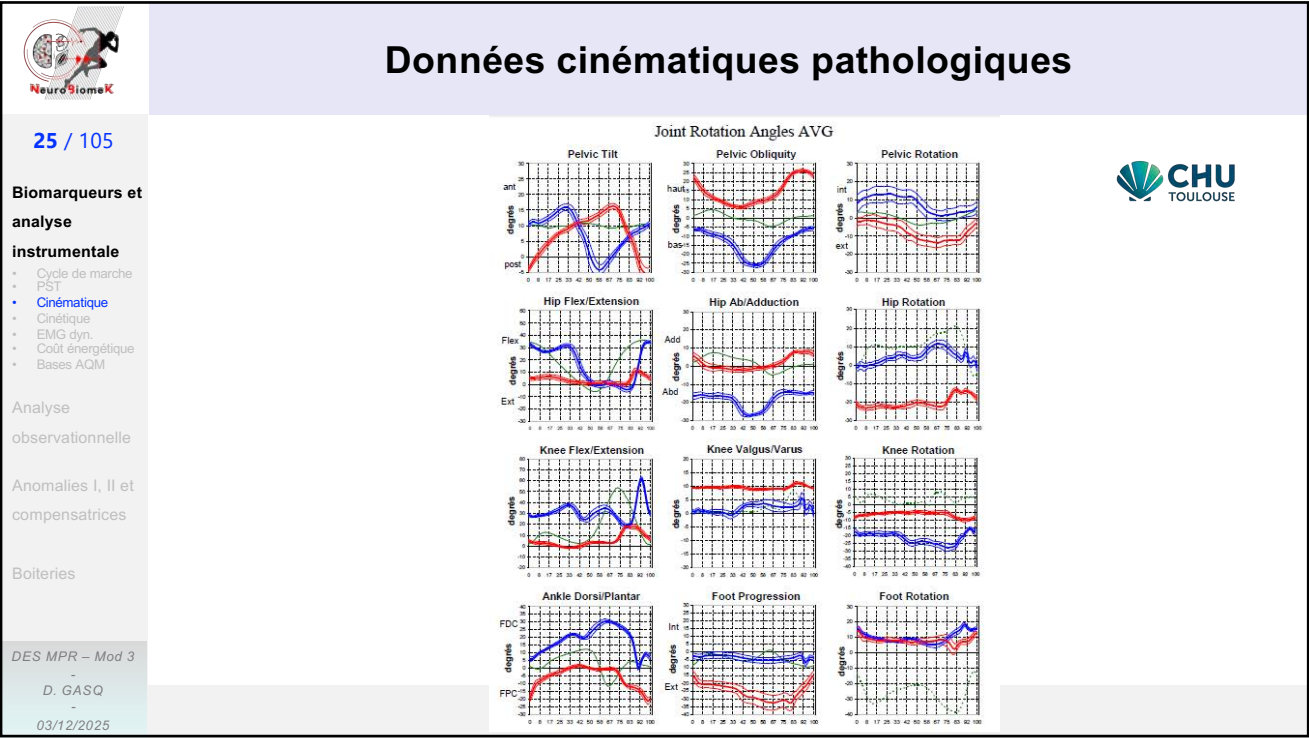
03/12/2025

Données cinématiques physiologiques

	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 taligade 1 ^{er} pivot autour du talon	Appui plantigade (plante du pied) 2 ^{ème} pivot autour du talus	Appui digitigade (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	

D. Gasq - Toulouse

12





27 / 105

Biomarqueurs et analyse

instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse

observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîteries

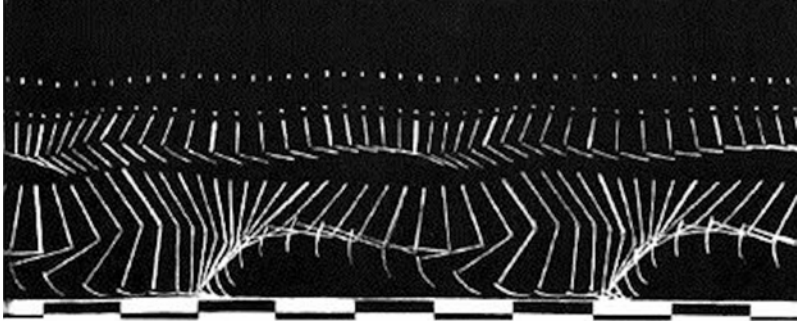
DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Coordination inter-articulaire

- Phase d'appui = extension → stabilité
- Phase oscillante = flexion → raccourcissement



Marey E.J. 1880



28 / 105

Biomarqueurs et analyse

instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse

observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîteries

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Coordination inter-articulaire

- Cyclogrammes inter-articulaires bi ou tridimensionnels

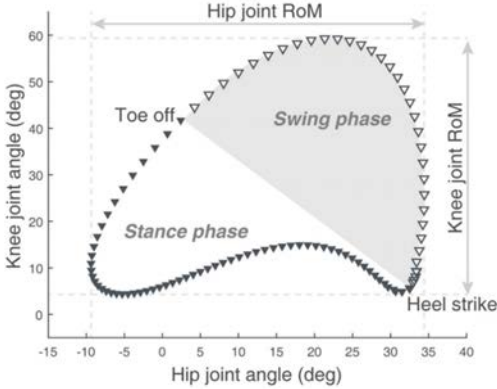


Figure 2. A representative sagittal plane hip-knee cyclogram.

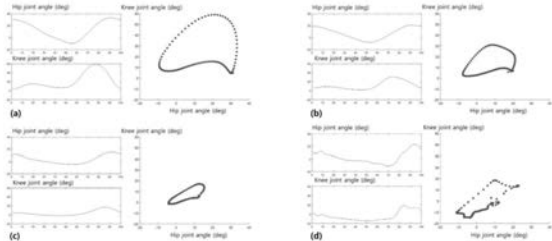


Figure 4. Representative hip-knee cyclograms of three groups according to the hip and knee joint ROM. (a) Representative from control group; (b) Representative from mild stroke group; (c) Representative from moderate stroke group; (d) Representative from moderate stroke group, describing hyperextension of the knee joint through the stance phase.

Lee et al. 2021

D. Gasq - Toulouse

14



29 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

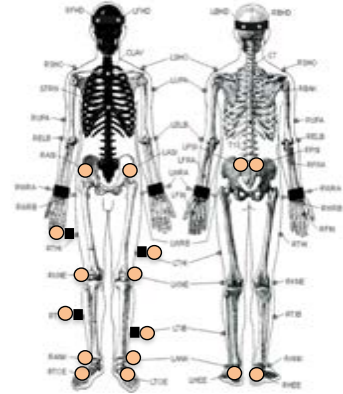
Évaluation cinématique instrumentale

Système optoélectronique → modélisation du sujet à partir de marqueurs externes passifs réfléchissants les infra-rouges
→ Outil de référence



Marqueurs anatomiques, techniques et virtuels

Conventional Gait Model



ASIS-MM / Knee width / Ankle width



30 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

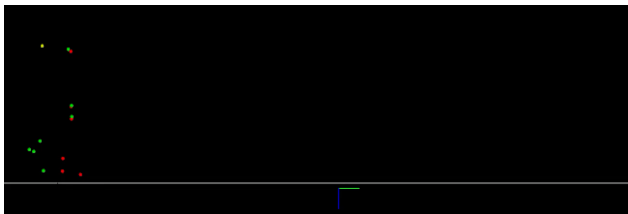
Boîtiers

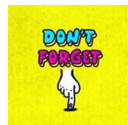
DES MPR – Mod 3

D. GASQ

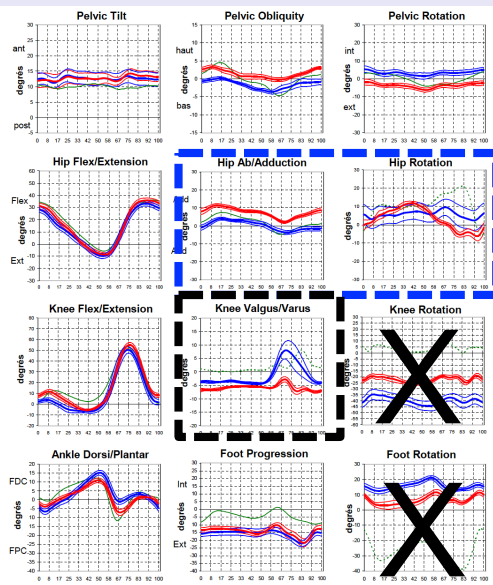
03/12/2025

Évaluation cinématique : les outils





Pas d'interprétation de courbes sans avoir examiné et vu marcher le sujet !



D. Gasq - Toulouse

15



Évaluation cinématique instrumentale

31 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- **Cinématique**
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

- Cinématique tridimensionnelle
 - **Modélisation** du sujet en 3D
- Outils multiples
 - **Systèmes optoélectroniques = système de référence**
 - Vidéo + infra-rouge
 - Stations inertielles (accéléromètres + gyroscopes)







Gasq & Morel 2016



Évaluation cinématique instrumentale

32 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- **Cinématique**
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Outils embarqués, écologiques, à bas coût, simple d'utilisation ?
→ Vont-ils remplacer l'outil de référence ?



published: 03 February 2022
doi: 10.3389/fnhum.2022.768575



Review—Emerging Portable Technologies for Gait Analysis in Neurological Disorders

Christina Salchow-Hömmen^{1*}, Matej Skrobot¹, Magdalena C. E. Jochner¹, Thomas Schauer², Andrea A. Kühn^{1,3,4,5} and Nikolaus Wenger¹



33 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

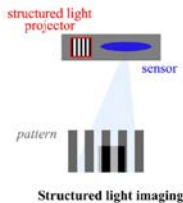
DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Évaluation cinématique instrumentale

Outils basés sur la vidéo +/- IR

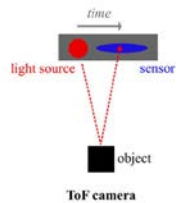


structured light projector

sensor

pattern

Structured light imaging



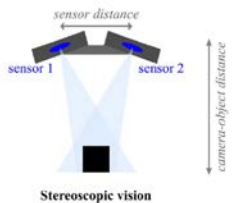
time

light source

sensor

object

ToF camera



sensor distance

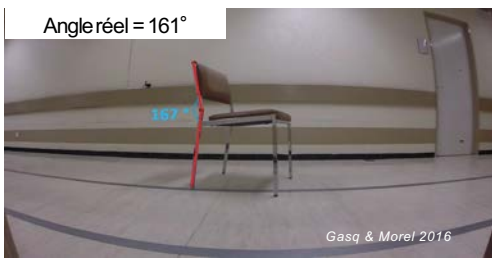
sensor 1

sensor 2

camera-object distance

Stereoscopic vision

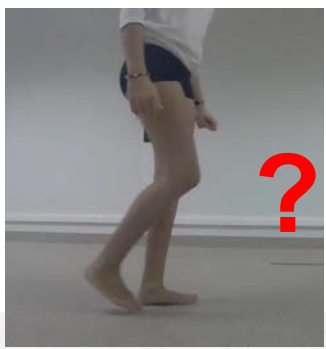
FIGURE 4 | Illustration of different camera technologies for in-depth measurements.



Angle réel = 161°

167°

Gasq & Morel 2016



Salchow-Hömmen et al. 2022



34 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

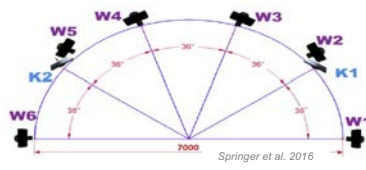
DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Évaluation cinématique instrumentale

Outils basés sur la vidéo +/- IR



W5

W4

W3

W2

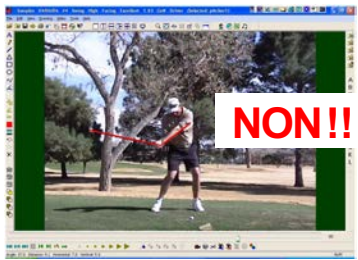
W1

K2

K1

7000

Springer et al. 2016



NON!!



170°

NON!!



Sandau et al. 2014

35 / 105

Biomarqueurs et analyse

instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse

observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Évaluation cinématique instrumentale

Outils basés sur la vidéo +/- IR

Springer et al. 2016

Sandau et al. 2014

Gait & Posture 48 (2019) 193–200

Contents lists available at ScienceDirect

Gait & Posture

journal homepage: www.elsevier.com/locate/gaitpost

Three-dimensional cameras and skeleton pose tracking for physical function assessment: A review of uses, validity, current developments and Kinect alternatives

Ross A. Clark^{a,*}, Benjamin F. Mentiplay^b, Emma Hough^a, Yong Hao Pua^a

Original Article

Journal of Mechanical Engineering

Comparison of depth cameras for three-dimensional reconstruction in medicine

Chuang-Yuan Chiu^a, Michael Thelwell^a, Terry Senior^a, Simon Choppin^a, John Hart^a and Jon Wheat^a

Gait & Posture 96 (2022) 101–116

Contents lists available at ScienceDirect

Gait & Posture

journal homepage: www.elsevier.com/locate/gaitpost

Comparison of Azure Kinect overground gait spatiotemporal parameters to marker based optical motion capture

Trent M. Guess^{a,b,*}, Rebecca Bliss^a, Jamie B. Hall^a, Andrew M. Kiselica^a

36 / 105

Biomarqueurs et analyse

instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse

observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Évaluation cinématique instrumentale

Outils basés sur les stations inertielles

raw sensor data (3D acc, 3D gyr, 3D mag) → gait phases → spatiotemporal parameters → sensor fusion → orientation → kinematic parameters → biomechanical model

FIGURE 3 | Methods overview for instrumented gait analysis with inertial sensors in commonly used positions on pelvis and lower limbs. acc., accelerometer readings; G, Global coordinate system; gyr, gyroscope readings; mag, magnetometer readings.

Salchow-Hömmen et al. 2022

Position (red), Vitesse (blue), Accélération (green)

Accéléromètre → Rotation → Position
Gyroscope → Estimation de l'orientation → Vitesse

Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation

Validity and reliability of wearable inertial sensors in healthy adult walking: a systematic review and meta-analysis

Journal of Sports Medicine - Open Access

Validity and Reliability of Inertial Measurement Units on Lower Extremity Kinematics During Running: A Systematic Review and Meta-Analysis

D. Gasq - Toulouse

18

37 / 105

Biomarqueurs et analyse

instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Données cinétiques

- Cinétique = étude des forces et moments de force s'exerçant sur un objet
- Mesure de la force de réaction du sol avec une plateforme de force
 - Calcul des moments de force
 - Intérêt = connaître effet du moment externe sur articulations
 - Nécessite de poser un seul pied sur la plateforme
 - Pb de la canne ou des pas très courts

Fig. 2.20 Lateral, fore-aft and vertical components of the ground reaction force, in newtons, for right foot (solid line) and left (dashed). Whittle Gait Analysis 2006

38 / 105

Biomarqueurs et analyse

instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Données cinétiques

Calcul des moments de force et des puissances développés au niveau des articulations (dynamique inverse)

→ Vitesse-dépendance !

Joint Angles, Powers & Moments in sagittal plane

Hip Flex/Extension, Knee Flex/Extension, Ankle Dorsi/Plantar

Hip Flex/Ext Moment, Knee Flex/Ext Moment, Dorsi/Plantar Moment

Hip Power, Knee Power, Ankle Power

Kirtley 2006

D. Gasq - Toulouse

19

39 / 105

Biomarqueurs et analyse

instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Étude des pressions plantaires

Mesure relative ou $N \cdot cm^{-2}$? ^a

Pressure-time integral ($N/cm^2 \cdot s$)

Pressure (N/cm^2)

Stance phase of gait cycle (s)

Coefficient of variation of of pressure–time integral in healthy / foot ulcers / foot ulcers + neuropathy

0.000 25 % N312 36 %

23 % 48 % 16 % 52 %

0.000 N312

Fernando et al. 2018. ^a $0.1 N/cm^2 = 1 kPa$

40 / 105

Biomarqueurs et analyse

instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Étude des pressions plantaires

- Gaitline = trajectoire du centre des pressions

A

1 2 3

C

A pattern I

B pattern II

C pattern III

D pattern IV

unaffected affected

unaffected affected

unaffected affected

unaffected affected

Fig 2. Cycligram classification from the bipedal phases into 4 patterns. (A) Pattern 1: symmetric butterfly shape, with center located at the midpoint or less than 2 squares of coordinate from the midpoint. (B) Pattern 2: asymmetric butterfly shape, with the center located more than 2 squares from the midpoint of the coordinate system. (C) Pattern 3: rectangular shape. (D) Pattern 4: triangular shape.

Wong et al. 2004; Wong et al. 2023



41 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- **Cinétique**
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

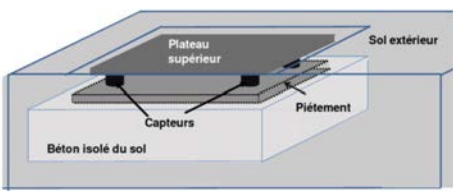
DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Analyse cinétique

- Plateforme(s) de force
 - n = 1, 2, 3 ...
- Un outil très spécifique
 - Un plateau rigide
 - Capteurs de force
 - *Uni-axiaux* → effort vertical en Z
 - Plateformes peu onéreuses, utilisées en posturologie clinique ++
 - *Tri-axiaux* → moments de force et forces selon 3 axes XYZ
 - Plateformes plus onéreuses, plus résistantes et plus précises
 - Utilisées si nécessité de supporter des charges imp

Lacouture 2014



42 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- **Cinétique**
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

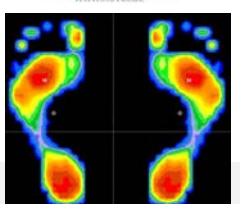
03/12/2025

Analyse cinétique : mesure des pressions

- Capteurs capacitifs ou résistifs
- « Tapis de marche » / baropodométrie
 - Mesure des pressions plantaires ($P = F / S$)
- Systèmes embarqués










43 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- **EMG dyn.**
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

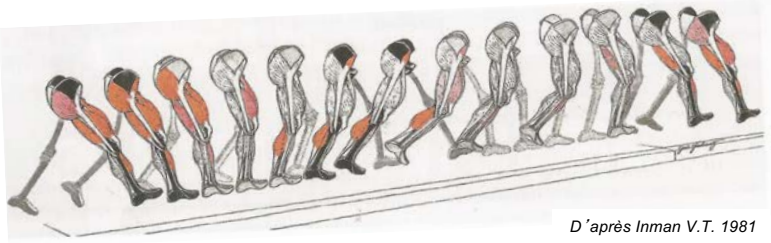
DES MPR – Mod 3

D. GASQ

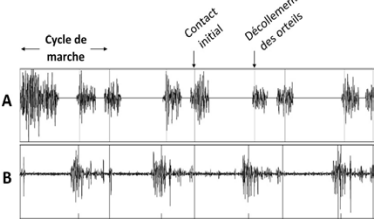
03/12/2025

Activations musculaires physiologiques

Séquence temporelle des activations musculaires



D'après Inman V.T. 1981



© MMV Auckland Bioengineering Institute



44 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- **EMG dyn.**
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

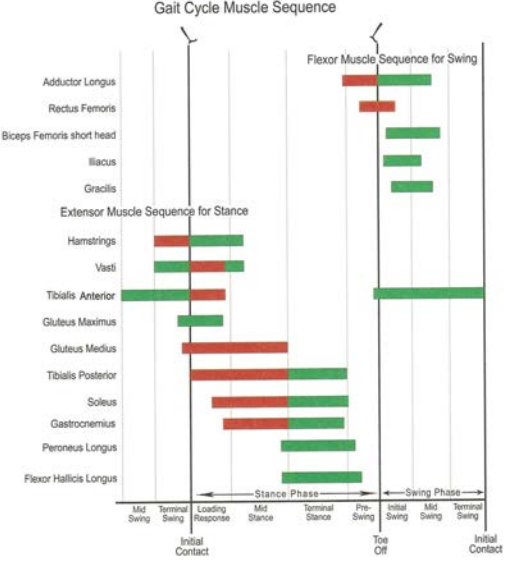
DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Activations musculaires physiologiques

- Action en CCO / CCF
- Action concentrique ou excentrique
 - Exc. puis conc. ++
- Rôles :
 - Supporter la charge
 - Passage du pas (raccourcissement)
 - Assurer la progression
- **Interpréter par rapport aux phases du cycle de marche et à la vitesse**



D'après Gage J.R. 2009



45 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- **EMG dyn.**
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

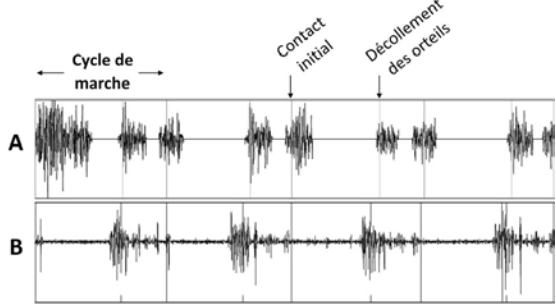
03/12/2025

Activations musculaires pathologiques

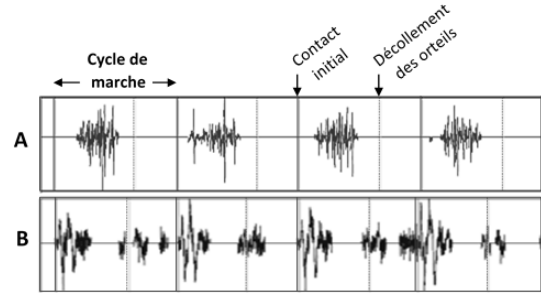
Pattern d'activation musculaire pathologique

- Limite = pas d'estimation de la force développée

Tibial antérieur → défaut d'activation (B)



Triceps sural → hyperactivité (B)





46 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- **EMG dyn.**
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

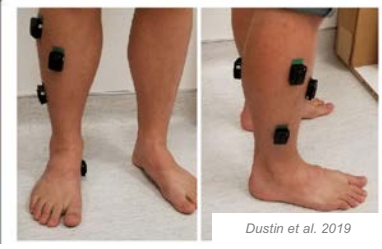
DES MPR – Mod 3

D. GASQ

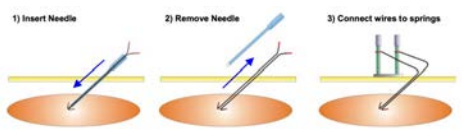
03/12/2025

Électromyographie dynamique

- EMG de surface ou intramusculaire
 - <http://www.seniam.org/>



Dustin et al. 2019




Konrad. The ABC of EMG 2006.



47 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- **EMG dyn.**
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

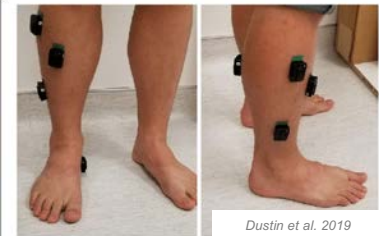
DES MPR – Mod 3

D. GASQ

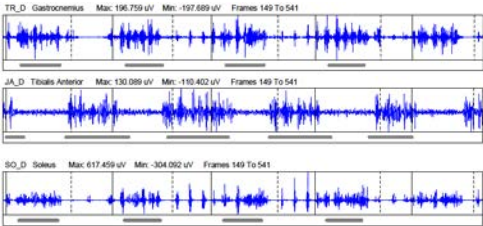
03/12/2025

Électromyographie dynamique

- EMG de surface ou intramusculaire
 - <http://www.seniam.org/>
- Séquence temporelle des activations musculaires
 - Pas d'évaluation de la force !
- Limites
 - Diaphonie ou *cross-talk*
 - Qualité du signal



Dustin et al. 2019





48 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- **Coût énergétique**
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

La marche : un modèle d'économie énergétique

Coût énergétique de la marche à vitesse spontanée ~ 2 à 3 MET ^a

2.5 MET	Walking from house to car or bus, from car or bus to go places, from car or bus to and from the worksite
---------	--



A

Equivalent métabolique ou MET (Metabolic Equivalent of Task)

1 MET = 3,5 mL O₂/kg/min



^a 2024 Compendium of Physical Activities <https://pacompendium.com/> A. Novacheck 1998.



49 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- **Coût énergétique**
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

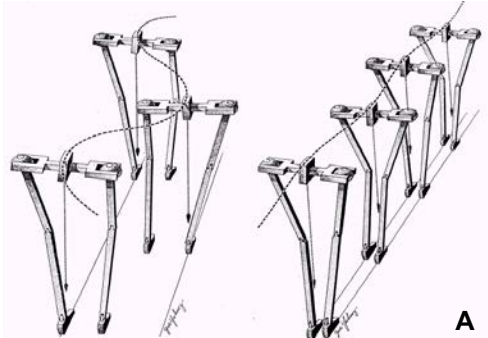
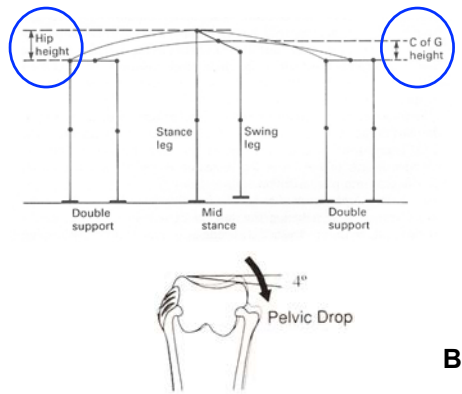
D. GASQ

03/12/2025

Facteurs biomécaniques d'une marche économique

Limiter les déplacements du centre de masse (CM)

- Ecartement réduit des pieds liée au genu-valgum → réduit excursions horizontales du CM
- Inclinaisons latérales du bassin → réduit les excursions verticales du CM

A. D'après Inman 1981. B. D'après Whittle 2006 et Perry 1992.



50 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- **Coût énergétique**
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

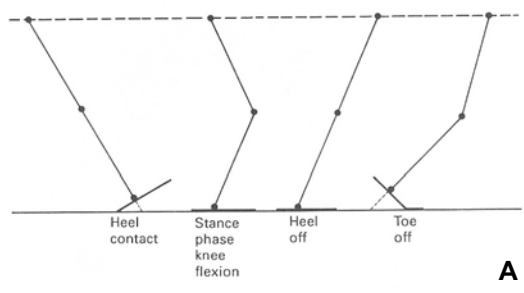
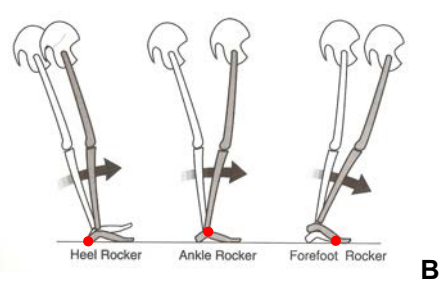
D. GASQ

03/12/2025

Facteurs biomécaniques d'une marche économique

Limiter les déplacements du centre de masse (CM)

- Ecartement réduit des pieds liée au genu-valgum → réduit excursions horizontales du CM
- Inclinaisons latérales du bassin → réduit les excursions verticales du CM
- Variations minimales longueur totale du mbre inf. → réduit excursions verticales du CM
- Vitesse suffisante + conservation de l'énergie cinétique (pivots de la marche)

A. D'après Whittle 2006. B. D'après Perry Gait analysis 1992.

51 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQIM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Cycles étirement-détente des muscles

- Contraction excentrique puis concentrique en CCF
 - Phase excentrique = accumulation d'énergie élastique
 - Phase concentrique = restitution passive + contraction active
- Facteur d'efficacité énergétique

Phase de freinage

Propulsion

L'unité musculo-tendineuse (UMT) accumule de l'énergie élastique qui est restituée durant la propulsion

A. D'après Nicol C. 2024. B. D'après Gage 2009.

Gait Cycle Muscle Sequence

52 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQM

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Analyse quantifiée de la marche (AQM)

Recueil synchronisé de 3 types de données:

- Cinématiques** : angles articulaires
 - Système optoélectronique 3D
- Cinétiques** : forces de réaction du sol pour calcul des moments et puissances articulaires
 - Plateforme(s) de force
- EMG dynamique** : séquences d'activations musculaires
 - EMG de surface ou intramusculaire

+ vidéo de l'examen et paramètres spatio-temporels

D. Gasq - Toulouse

26

[illegible]



Déroulement de l'AQM

54 / 105

Biomarqueurs et analyse

instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- Bases AQM

Analyse

observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

- Dans un « laboratoire de la marche »
- Coût matériel et humain élevé
- Rôle de l'ingénieur +++
- Durée de l'examen = 1h30 à 2h30
 - Préparation de la salle et du patient
 - Acquisition des données (au moins 12 passages)
- Mise en forme et interprétation de l'examen = 2h
 - Mise en forme des données (post-traitement)
 - Description des données et interprétation
 - Orientation de la stratégie thérapeutique





55 / 105

Biomarqueurs et analyse

instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- **Bases AQM**

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Limites de l'AQM

- Données manquantes (cinétique, EMG) / non interprétables
 - Limites de la modélisation, pb de recueil
- Évaluation en laboratoire = peu écologique
- Accessibilité limitée à peu de patients
 - Disponibilité d'un plateau technique ?
- Compétences pour l'interprétation de l'examen
 - Standardisation de l'interprétation ?

→ examen de recours + recherche



Les Délégations



56 / 105

Biomarqueurs et analyse

instrumentale

- Cycle de marche
- PST
- Cinématique
- Cinétique
- EMG dyn.
- Coût énergétique
- **Bases AQM**

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3

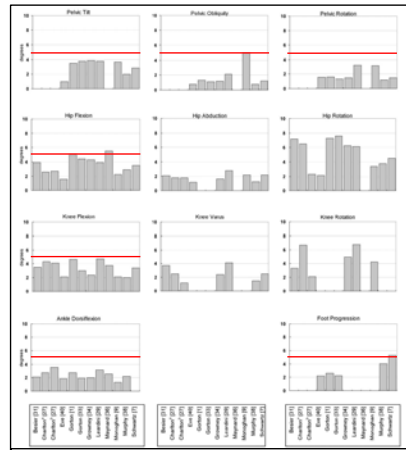
D. GASQ

03/12/2025

Apports de l'AQM

Une évaluation de référence standardisée

- Données cinématiques
 - 3D
 - Résolution spatiale ~1 mm
 - Marge d'erreur faible
 - < 5° sujets sains
 - 5-10° sujets pathologiques



McGinley et al. 2009



Plan de l'enseignement

57 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3
D. GASQ
03/12/2025

- Biomarqueurs de la marche
 1. Cycle de marche
 2. Données spatio-temporelles
 3. Données cinématiques
 4. Données cinétiques
 5. Activations musculaires
 6. Coût énergétique de la marche
 7. Analyse quantifiée de la marche
 8. Analyse observationnelle de la marche
- **Analyse observationnelle de la marche**
- Anomalies primaires, adaptatives et compensatoires
- Principales boiteries



Vidéo de la marche en pratique

58 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3
D. GASQ
03/12/2025

- Caméras fixes
 - Pièce de 8 à 10 m de long, au moins 2 m de large (selon la largeur de champ des caméras)
 - Fond uni plutôt clair, bon éclairage (selon optique)
- Combien de caméras ?
 - Au minimum 2 (face & profil)
 - 3 ou 4 pour le confort
 - Face + dos & 2 profils
 - Plan global et plan rapproché des pieds
- Performance des caméras
 - Idéalement ≥ 100 ips
 - Résolution HD minimum (720p)





59 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Protocole vidéo de la marche

- Standardiser les conditions d'évaluation
→ permet de comparer plus facilement



- Protocole type
 - Vitesse spontanée & maximale
 - Marche sur les pointes de pieds et les talons
 - Flexion volontaire de hanche, talons-fesses, marche genoux fléchis
 - Avec et sans chaussage / orthèses / prothèses
 - Parfois : marche arrière, pas chassés, course ...



60 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

La cinématique systématique

4 temps clés à partir d'une vidéo

Analyse observationnelle de la marche à partir d'une vidéo selon les 4 temps clés

Données générales et PST :

	D DAR	G DAP/PPO	D AU	G PO	D DAP/PPO	G DAR	D PO	G AU
Pied								
Cheville								
Genou								
Hanche								
Bassin								
HAT								

Pour chaque anomalie, préciser si anomalie primaire, ou secondaire / compensatrice
Donner une phrase de synthèse pour caractériser les anomalies de la marche



Échelles observationnelles de la marche

61 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3
D. GASQ
03/12/2025

- De nombreuses échelles existent, la plupart développées chez le patient paralysé cérébral ou hémiplegique adulte
- Basées sur l'observation visuelle directe ou sur une vidéo de la marche
- Objectif = **quantifier** le niveau d'anormalité de la marche
- Grande variabilité des articulations étudiées, des anomalies de la marche envisagées et des systèmes de cotation
 - Une échelle générique à retenir : EVGS
 - Échelles spécifiques : ex. de la GAIT (hémiplegique)



Échelles observationnelles de la marche

62 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3
D. GASQ
03/12/2025

10 échelles principales *(Gor-García-Fogeda et al. 2016; Rathinam et al. 2014; Toro et al. 2003)*

Physician Rating Scale	PRS	Koman et al., 1994
Rivermead Visual Gait Assessment	RVGA	Lord et al., 1998
Observational Gait Scale	OGS	Boyd and Graham, 1999; Mackey et al, 2003
Visual Gait Assessment Scale	VGAS	Dickens and Smith, 2007
Rancho los Amigos System	Rancho	Perry et al., 1992
Visual Assessment of Hemiplegic Gait	VAHG	Hughes and Bell, 1994
Wisconsin Gait Score	WGS	Rodriguez et al., 1996
Edinburgh Visual Gait Scale	EVGS	Read et al., 2003
Salford Gait Tool	Salford	Toro et al., 2007
Gait Assessment and Intervention Tool	GAIT	Daly et al., 2009

 63 / 105 Biomarqueurs et analyse instrumentale Analyse observationnelle Anomalies I, II et compensatrices Boiteries DES MPR – Mod 3 D. GASQ 03/12/2025	Eléments métrologiques							
	Echelle	Avec ou sans vidéo	Validité		Fidélité		Sensibilité au changement	Pop de validation
			Autre	Contre critère AQM	Inter-observateur	Intra-observateur		
	PRS		X	X	-	X	-	PC
	RVGA		X		-	-	X	SEP et HP
	OGS		X	X	X	X		PC
	VGAS		X	X	X	X		PC (HP)
	Rancho L.A. system							Non publié
	VAHG				-	-	-	HP
	WGS		X		X	X	X	HP
	EVGS		X	X	X	X	X	PC
	Salford Gait Tool		X	X	X	X		PC et sains
	G.A.I.T		X		X	X	X	HP

 64 / 105 Biomarqueurs et analyse instrumentale Analyse observationnelle Anomalies I, II et compensatrices Boiteries DES MPR – Mod 3 D. GASQ 03/12/2025	Edinburgh Visual Gait Score (Read et al. 2003) Cotation à partir d'une vidéo de face et de profil			
	Version 2021/08/04 - D. Gasq - CHU de Toulouse			
	PHASE D'APPUI			
	PIED	Gauche	PIED	Droite
	1. Contact talon	Contact talon		Contact talon
	2. Décollement talon	Normal		Normal
	3. Dorsiflexion max Cheville	DF 5-25°		DF 5-25°
	4. Varus/Valgus arrière-pied	Vg physio		Vg physio
	5. Rotation du pied	// APG RE 0-20°		// APG RE 0-20°
	GENOU	Gauche	GENOU	Droite
	8. Angle progression Genou	Neutre		Neutre
	9. Extension max Genou	Flexion 0-15°		Flexion 0-15°
	HANCHE	Gauche	HANCHE	Droite
	12. Extension max Hanche	Extension 0-20°		Extension 0-20°
	BASSIN	Gauche	BASSIN	Droite
	14. Bascule en MA	Elévation 0-5°		Elévation 0-5°
	15. Rotation en MA	Post < 5° / Ant < 10°		Post < 5° / Ant < 10°
	TRONC	Gauche	TRONC	Droite
	16. Position sagittale	Normal		Normal
	17. Déport latéral	Normal		Normal
	PHASE DE BALANCEMENT			
	PIED	Gauche	PIED	Droite
	6. Clairance pied	Normal		Normal
	7. Dorsiflexion max Cheville	DF < 15° / FP° < 5°		DF < 15° / FP° < 5°
	GENOU	Gauche	GENOU	Droite
	10. Flexion Genou en FO	Flexion 0-15°		Flexion 0-15°
	11. Flexion max Genou	Flexion 50-70°		Flexion 50-70°
	HANCHE	Gauche	HANCHE	Droite
	13. Flexion max Hanche	Flexion 25-45°		Flexion 25-45°
	Marche normale = 0, patho de 1 à 34	0 / 34		0 / 34
	Sous-total en phase d'appui	0 / 24		0 / 24
	Sous-total en phase oscillante	0 / 10		0 / 10
	Commentaires sur la vidéo analysée et vidéos complémentaires :			



Approche globale puis focale

65 / 105

Biomarqueurs et
analyse
instrumentale

Analyse
observationnelle

Anomalies I, II et
compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3
-
D. GASQ
-
03/12/2025

Approche globale : compréhension des situations complexes

Approche focale : pré-thérapeutique ++





Quelle analyse de la marche ?

66 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtieres

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

- **Vidéo = le minimum pour tous**
 - Archivage, partage
 - Possibilité de quantification (EVGS)
- **Analyse spatio-temporelle**
 - Quantification pré/post thérapeutique, évolution
 - Rapide et simple → systématique
- **Analyse quantifiée de la marche**
 - Cinématique 3D + EMG dynamique + cinétique
 - Complexe → situations particulières
 - Aide à la décision thérapeutique (situations complexes)
 - Avant chirurgie neuro-orthopédique
 - En cas d'échec thérapeutique



Variable de marche (m)	Normale	Enfant	Adulte	Enfant	Adulte	Normale
Vitesse de marche (m/s)	1.00	0.80	1.2	1.0	1.2	1.0
Longueur d'appas (m)	0.80	0.60	1.0	0.8	1.0	0.8
Temps de contact (s)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Phase d'appas (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au contact (% cycle)	100	100	100	100	100	100
Angle au décollage (% cycle)	100					



67 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîteries

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Biomarqueurs et outils d'évaluation de la marche



	Description de la marche	Pressions plantaires	Paramètres spatio-temporels	Cinétique	Cinématique 3D	EMG dynamique
Outils						
Échelles cliniques et/ou vidéo sans quantification instrumentale	X					
Vidéo +/- infra-rouge avec quantification			X		X	
Capteurs de pressions (contacteurs plantaires, tapis de marche, semelles embarquées)		X	X			
Stations inertielles			X		X	
Plateformes de force			X	X		
Systèmes optoélectroniques 3D (marqueurs passifs ou actifs)			X		X	
EMG de surface ou implantée						X
Niveaux d'analyse de la marche (outils utilisables pour chaque niveau d'analyse de marche : cf. première partie du tableau)						
Analyse observationnelle (visuelle) de la marche (AOM)	X					
Analyse spatiotemporelle de la marche (ASTM) * PEQP002 ³			X **			
Analyse dynamique de la marche (ADM) * NKQP002 ³		X		X		
Analyse cinématique de la marche (ACM) * NKQP001 ³					X **	
Analyse EMG des activités musculaires de la marche (AEM) * AHQP002 ³						X
Analyse quantifiée de la marche (AQM) * NKQP003 ³			X **	X **	X **	X

* L'analyse instrumentale de la marche (AIM) regroupe l'ASTM, l'ADM, l'ACM et l'AEM. L'AQM correspond à une entité spécifiquement définie de l'AIM en termes de données recueillies et de qualité métrologique des données. ** Sous réserve de propriétés métrologiques compatibles. ³ actes correspondant dans la nomenclature des actes française proposée par la HAS.

Revue systématique de littérature sur les propriétés de mesure des données instrumentales d'évaluation de la locomotion humaine, dans l'objectif de proposer des recommandations métrologiques → en cours

	Plan de l'enseignement						
68 / 105							
Biomarqueurs et analyse instrumentale	- Biomarqueurs de la marche - Cycle de marche - Données spatio-temporelles - Données cinématiques - Données cinétiques - Activations musculaires - Coût énergétique de la marche - Analyse quantifiée de la marche						
Analyse observationnelle							
Anomalies I, II et compensatrices							
Boiteries	Analyse observationnelle de la marche						
	Anomalies primaires, adaptatives et compensatoires						
	Principales boiteries						
DES MPR – Mod 3 D. GASQ 03/12/2025							



69 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

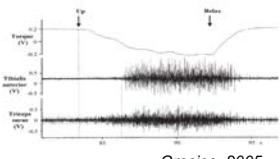
Boîtiers

DES MPR – Mod 3
D. GASQ
03/12/2025

Anomalies primaires

Déficiences responsables de modifications de la marche

- Déformations osseuses
- Raideur articulaire et rétractions musculo-tendineuses
- Parésie musculaire
- Hyperactivité musculaire
- Hypoesthésie
- ...


Gracies, 2005

Anomalies I = anomalies directement liées à ces déficiences

- Cible thérapeutique dans la mesure du possible



70 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boîtiers

DES MPR – Mod 3
D. GASQ
03/12/2025

Anomalies adaptatives: secondaires et compensatrices

La marche du sujet correspond à une adaptation plus ou moins contrainte aux déficiences:

Marche pathologique = anomalies primaires + anomalies adaptatives

→ Examen clinique incontournable

- **Anomalies secondaires**
 - Anomalie directement induite par une anomalie primaire = nécessité biomécanique
 - Ex. si flexum de genou → marche hanches fléchies
- **Anomalies compensatrices**
 - Anomalie compensant les conséquences d'une anomalie primaire
 - Ex. des compensations d'un défaut de raccourcissement
- **Anomalies adaptatives à respecter**
 - Possibilité de correction si les anomalies I sont corrigées
 - Notion de **déformation utile**
 - Tout l'enjeu est de les repérer lors de l'évaluation d'une marche pathologique



Décryptage des anomalies de la marche

71 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3
D. GASQ
03/12/2025

Grandes catégories de boiteries

- **Boiteries de phase d'appui** = esquivé d'appui, instabilité articulaire / posturale
 - Concerne DAR (mise en charge) et AU
- **Boiteries de phase oscillante** = défaut de raccourcissement ou de progression
 - Concerne DAP (pre-swing) et PO
- **Marche hypokinétique** du syndrome parkinsonien
- **Vieillesse physiologique de la marche**
- **Troubles de la marche fonctionnels** = situations typiques (incohérence des compensations)



Boiteries en phase d'appui

72 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3
D. GASQ
03/12/2025

- **Marches instables = ataxiques**
 - Ataxies cérébelleuse et proprioceptive
- **Boiterie d'esquive**
 - Éviter une douleur du membre inférieur
- **Boiterie de Trendelenburg**
 - Défaut de verrouillage des abducteurs de hanche / coxopathie
- **Marche « avec salutation »**
 - Défaut d'extension de hanche
 - Parésie du quadriceps



73 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3
D. GASQ
03/12/2025

Marche ataxique

- Instabilité en position debout → marche instable
- **Élargissement du polygone de sustentation**
- Ataxie cérébelleuse = marche pseudo-ébrieuse ou titubante
 - **Festonnante** = embardées irrégulières
- Ataxie proprioceptive = aggravée les yeux fermés
 - **Talonnante**
- Formes associées possibles (Friedreich, sclérose en plaques, ...)






74 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

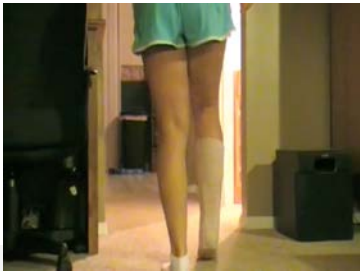
Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3
D. GASQ
03/12/2025

Boiterie d'esquive

- **Évitement de l'appui car douleur**
 - Diminution du temps d'appui unipodal
- Causes variées :
 - coxarthrose, gonarthrose, lésion osseuse, caillou dans la chaussure....
- Rotation latérale du membre si douleur d'une structure propulsive sagittale (ex. hallux rigidus)
- **Intérêt d'une canne**





75 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

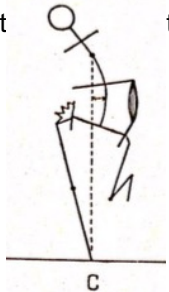
Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3
D. GASQ
03/12/2025

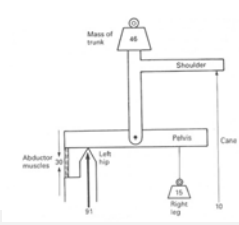
Boiterie de Trendelenburg-Duchenne

- Abaissement du bassin coté oscillant + inclinaison compensatrice du tronc
 - Si bilatéral (myopathie) = **démarche dandinante**
- Étiologies
 - Parésie « abducteurs » de hanche : moyen fessier, myopathies
 - Douleur de hanche
- Corrigée par utilisation d'une canne côté sain

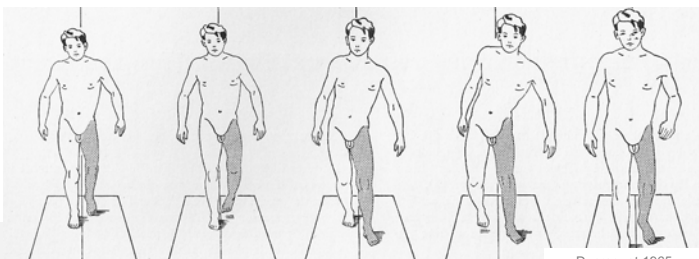


C

Ducroquet 1965



Whittle Gait Analysis 2006



Ducroquet 1965



76 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

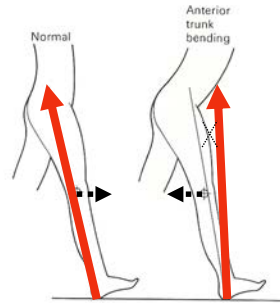
Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3
D. GASQ
03/12/2025

Boiterie avec « salutation »

- Antéflexion du tronc en phase d'appui
 - Perte d'extension de hanche (coxarthrose)
 - Parésie du quadriceps (polio ++) → *déformation en équin utile*





Modifié d'après Whittle M.W. 2006



77 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Marche du parkinsonien

- Perturbations stéréotypées associées à une instabilité
- **Difficultés à l'initiation de la marche : freezing ou enrayage cinétique**
 - Interruption brutale de la marche avec piétinement, de survenue spontanée ou provoquée par un stimulus visuel
- Raccourcissement des pas = **marche à petits pas**
- Cadence irrégulière avec accélérations brutales = **festination**
- Perte du balancement d'un ou des membres supérieurs et demi-tour décomposé






78 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Boiterie de phase oscillante

- **Défaut de raccourcissement +/- de progression**
 - Défaut de relevé du pied
 - Défaut de flexion de genou (stiff-knee)
 - Défaut de flexion de hanche

→ anomalies primaires
- **Compensations : pas pelvien, fauchage, steppage, volte**
 - Caractérise la boiterie le plus souvent → source de confusion ...
- **Défaut de raccourcissement**
 - Unilatéral → ex. hémiplegie
 - Bilatéral → ex. paraparésie spastique
- **! de manière aspécifique :**
 - Si instabilité d'un côté = phase oscillante controlatérale raccourcie



79 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3

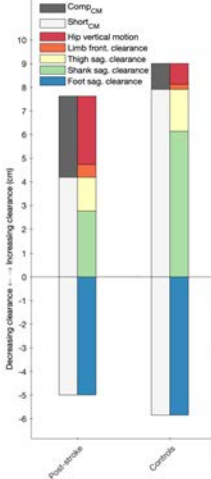
D. GASQ

03/12/2025

Ex. du défaut de flexion en phase oscillante

Défaut de raccourcissement / flexion liée à une hypertonie des extenseurs
→ entraîne des compensations = pas pelvien & fauchage

- Impact sur la consommation énergétique
 - Défaut de raccourcissement = mobilisation du centre de masse
 - Augmentation des activations musculaires & hypertonie
- Consommation énergétique lors de la marche en post-AVC^a
 - x 2 à 7 par rapport à des sujets contrôles
 - 5 à 18 MET = course à pied de 6 à 18 km/h^b



A. Montané et al. 2023.^a Kramer et al. 2016; Compagnat et al. 2018. ^b 2024 Compendium of Physical Activities <https://pacompendium.com/>



80 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

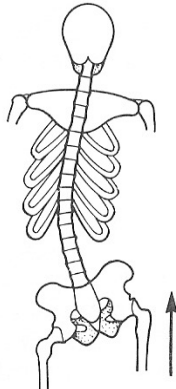
DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Pas pelvien

- Élévation du bassin +/- participation du tronc
 - +/- associé à une RVB pour faciliter l'avancée du fémur



Whittle Gait Analysis 2006



81 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

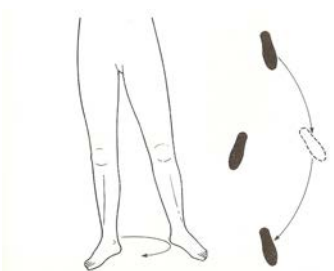
Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3
- D. GASQ
- 03/12/2025

Fauchage

- Le pied décrit un demi-cercle au sol = circumduction
 - Rôle des muscles abducteurs de hanche
- Souvent associé à un pas pelvien
- Causes = défaut de flexion de genou et/ou cheville




Compensation ou anomalie I ?

Journal of Biomechanics 31 (2008) 150–155

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Biomechanics

Journal homepage: www.elsevier.com/locate/jbiomech
www.jbiomech.com

Hip circumduction is not a compensation for reduced knee flexion angle during gait

Tunc Abbas^a, Sunil Prajapati, David Ziemnicki, Poornima Tamma, Sarah Gross, James Solari

Whittle Gait Analysis 2006



82 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

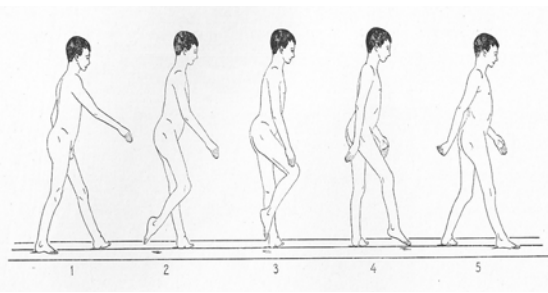
Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3
- D. GASQ
- 03/12/2025

Steppage

- Majoration de flexion de hanche (et genou) compensatoire d'un défaut de dorsiflexion de cheville
- Cause la plus fréquente = déficit des muscles releveurs du pied
 - Atteinte radiculaire L4-L5 ou du nerf fibulaire commun, Charcot-Marie-Tooth
 - Atteinte neurologique centrale avec déficit distal flasque




Ducroquet 1965



83 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

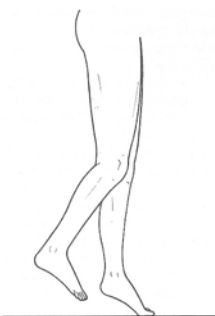
Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3
D. GASQ
03/12/2025

Volte controlatérale

- Flexion plantaire de cheville (ou diminution de dorsiflexion) en appui unipodal compensant le défaut de raccourcissement controlatéral
- Nécessite une bonne motricité distale et une vitesse suffisante





Whittle Gait Analysis 2006



84 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

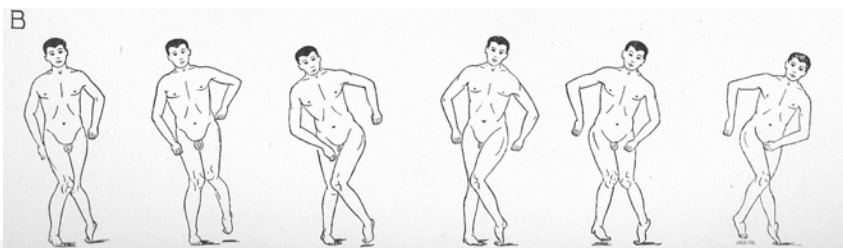
Boiteries

DES MPR – Mod 3
D. GASQ
03/12/2025

Paraparésie spastique

- Défaut de raccourcissement des deux membres inférieurs fixés en extension
- Avancement du membre inférieur = inclinaison du tronc CL + rotation horizontale HL du bassin = **démarche de « gallinacé »**
- Si adduction des cuisses trop importante avec croisement des cuisses = **démarche « en ciseaux »**.
- Utilisation de 2 cannes pour se déplacer en projetant le bassin et les membres inférieurs de manière concomitante = **marche pendulaire**

B



Ducroquet 1965



85 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

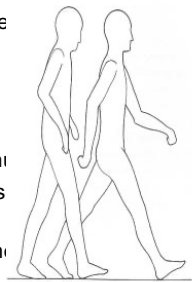
DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Vieillessement « physiologique » de la marche

- Diminution de la vitesse de marche, la longueur du pas (moins de mouvements de bassin et hanche) et la hauteur du pas (pas rasants voire trainants)
- Augmentation de la largeur du pas et des temps d'appuis bipodaux
- Perte de capacité de gestion d'une tâche cognitive alors que le sujet est en train de marche **when talking ») → augmentation du risque de chute**



D'après Murray et al. 1969

- **Astasie-abasie**
 - **Astasie** = instabilité de la station debout avec rétropulsion spontanée générant des chutes
 - **Abasie** = impossibilité de marcher en dehors de la présence de tout syndrome parkinsonien
 - Anomalies observées essentiellement chez le sujet âgé suite à une chute ou un alitement
- Dans sa forme la plus sévère s'y associe une phobie de la marche confinant le sujet au fauteuil = **staso-basophobie**



86 / 105

Biomarqueurs et analyse instrumentale

Analyse observationnelle

Anomalies I, II et compensatrices

Boiteries

DES MPR – Mod 3

D. GASQ

03/12/2025

Troubles de la marche fonctionnels