

Locomotion et Activités Physiques

Biomécanique de la locomotion

L'agenda / Plan

HORAIRE 1^{ère} année 2025-2026

SEMAINE 23



	Lundi 23.03.2026		Mardi 24.03.2026		Mercredi 25.03.2026		Jeudi 26.03.2026		Vendredi 27.03.2026	
08h15-09h00					Chimie organique 11 S. Matile / J. Viger-Gravel CMU/Champendal		Biomécanique et physiologie de la locomotion S. Armand CMU/Champendal		Chimie organique 12 S. Matile / J. Viger-Gravel CMU/Champendal	
09h15-10h00	Introduction à la locomotion S. Armand CMU/Champendal		Production du mouvement S. Armand CMU/Champendal							
10h15-11h00	Métabolisme des triglycérides P. Maechler CMU/Champendal		Physique 21 Physique nucléaire M. Kunz / C. Senatore CMU/Champendal		Contrôle du mouvement S. Armand CMU/Champendal		Cas de liaison Athérosclérose 8 F. Mach CMU/Champendal		Répétitoire immunité innée J. Bertrand / C. Jandus / C. Scheiermann / K. Egervari CMU/Champendal	
11h15-12h00					Biomécanique du membre inférieur S. Armand CMU/Champendal		MFE 5 : Catalogue PROFILES M. Bideau CMU/Champendal		Répétitoire immunité adaptative J. Villard / O. Hartley / S. Hugues CMU/Champendal	
12h15-13h00										

Infos

- **Liens avec autres cours**

- Aucun identifié

- **Speakup**

<https://web.speakup.info/room/join/92645>



- **Rappels**

Notions déjà abordées dans un autre cours

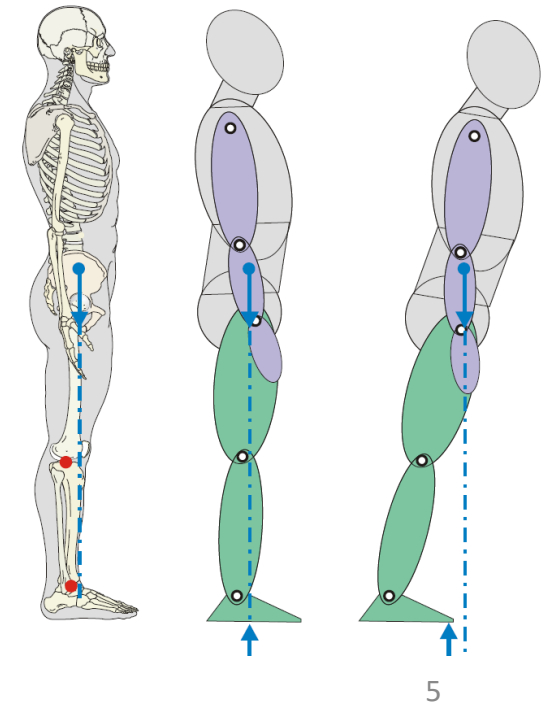
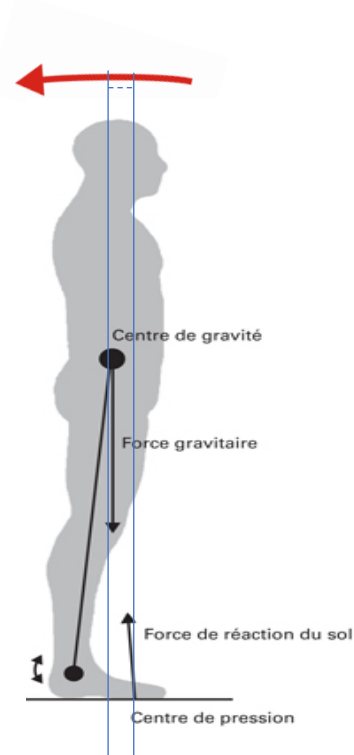
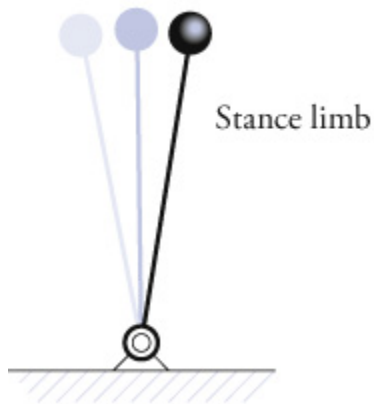
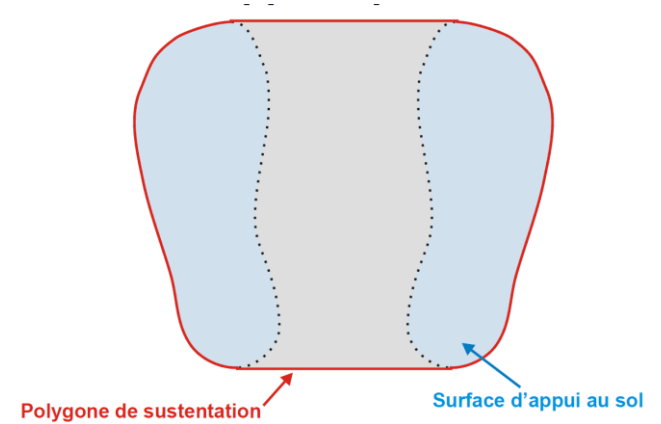


Plan

- De l'équilibre à la marche
- La marche
 - Cycle de marche
 - Paramètres spatio-temporels
 - Cinématique
 - Cinétique
 - Activité musculaire
 - Energie
 - Déterminants de la marche
 - Analyse Quantifiée de la Marche
- La course
 - Cycle de course
 - Paramètres spatio-temporels
 - Cinématique
 - Cinétique
 - Energie

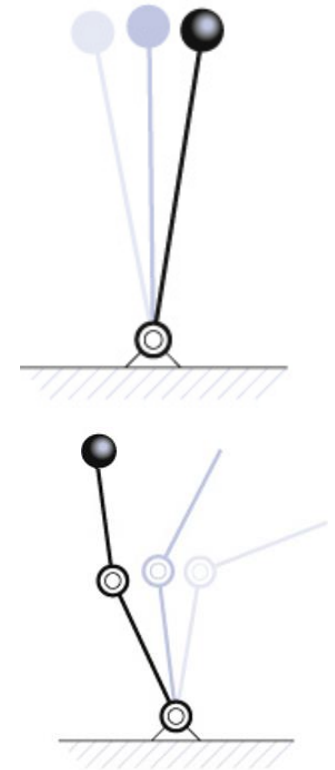
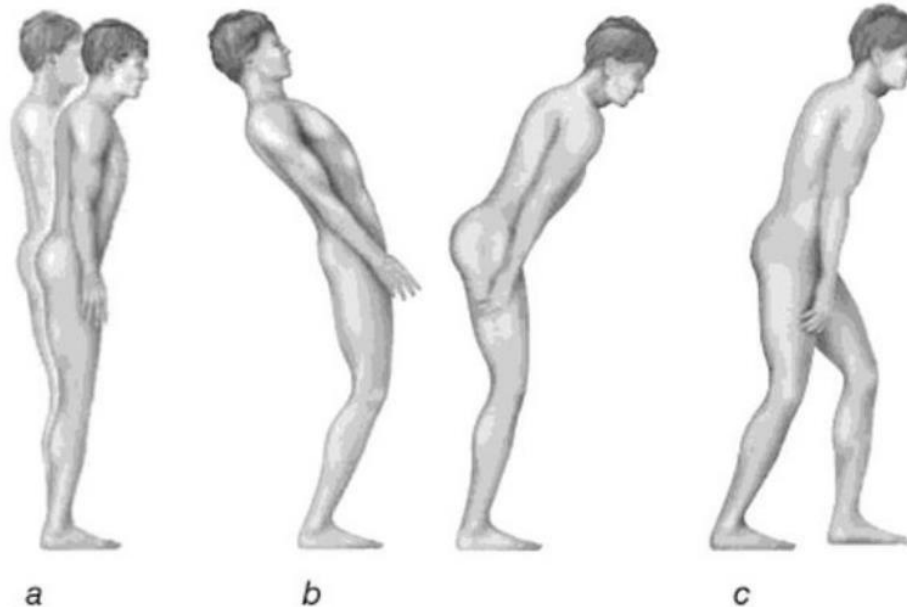
Equilibre instable

- Toujours des mouvements du corps (respiration, cardiaque)
- Equilibre jamais stable
- Modèle de pendule inversé

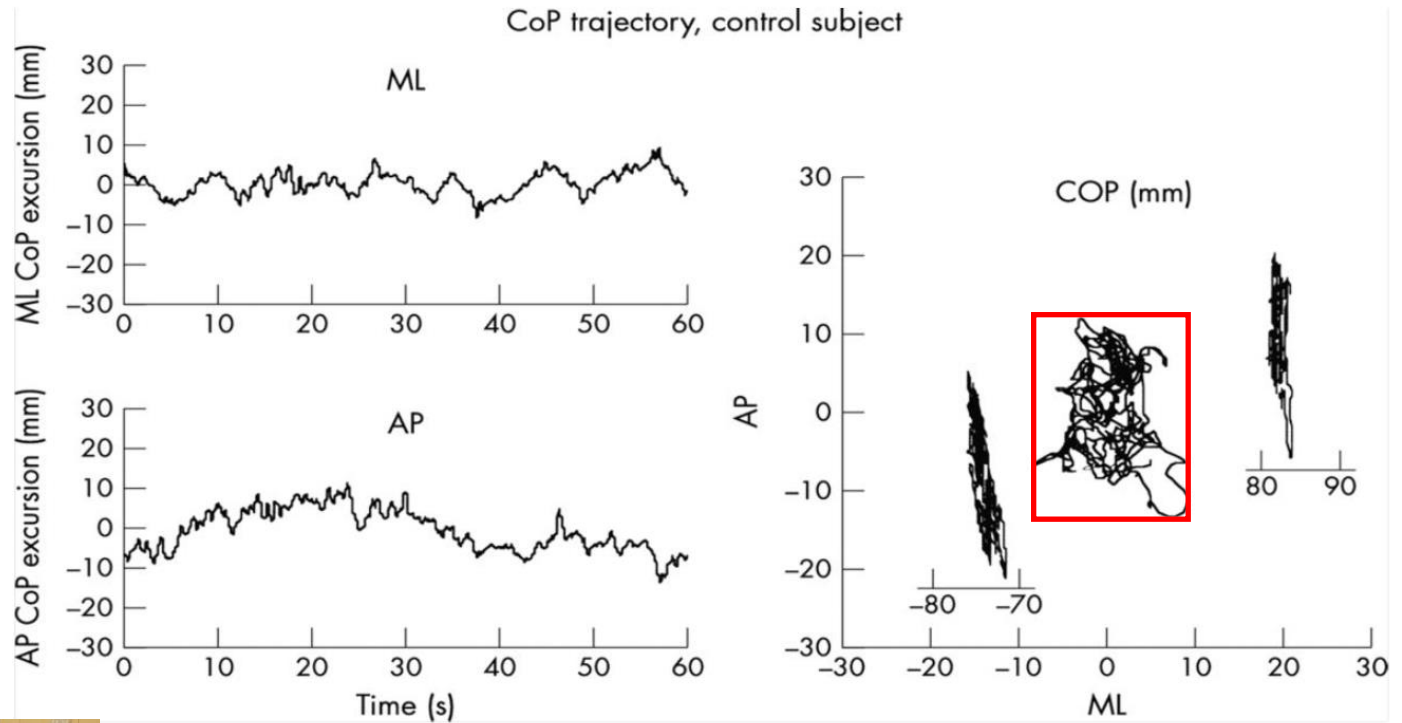


Stratégies de contrôle de l'équilibre

- a) Cheville (simple pendule)
- b) Hanche (double pendule)
- c) Pas (si CG sort du polygone de sustentation)

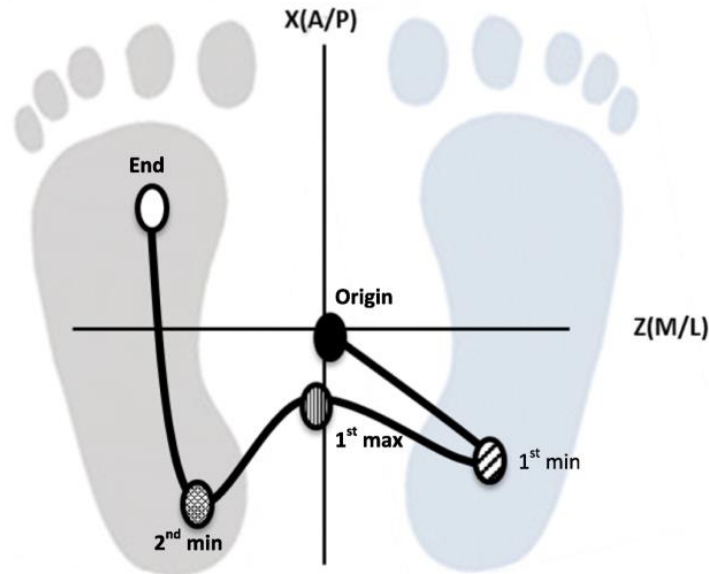


Posturographie



Ajustements posturaux anticipés

- Initiation du pas
 - Création décalage entre COP - CG



Corsi, C., Cimolin, V., Capodaglio, P. *et al.* A biomechanical study of gait initiation in Down syndrome. *BMC Neurol* **19**, 66 (2019).
<https://doi.org/10.1186/s12883-019-1288-4>

Plan

- De l'équilibre à la marche
- La marche
 - Cycle de marche
 - Paramètres spatio-temporels
 - Cinématique
 - Cinétique
 - Activité musculaire
 - Energie
 - Déterminants de la marche
 - Analyse Quantifiée de la Marche
- La course
 - Cycle de course
 - Paramètres spatio-temporels
 - Cinématique
 - Cinétique
 - Energie

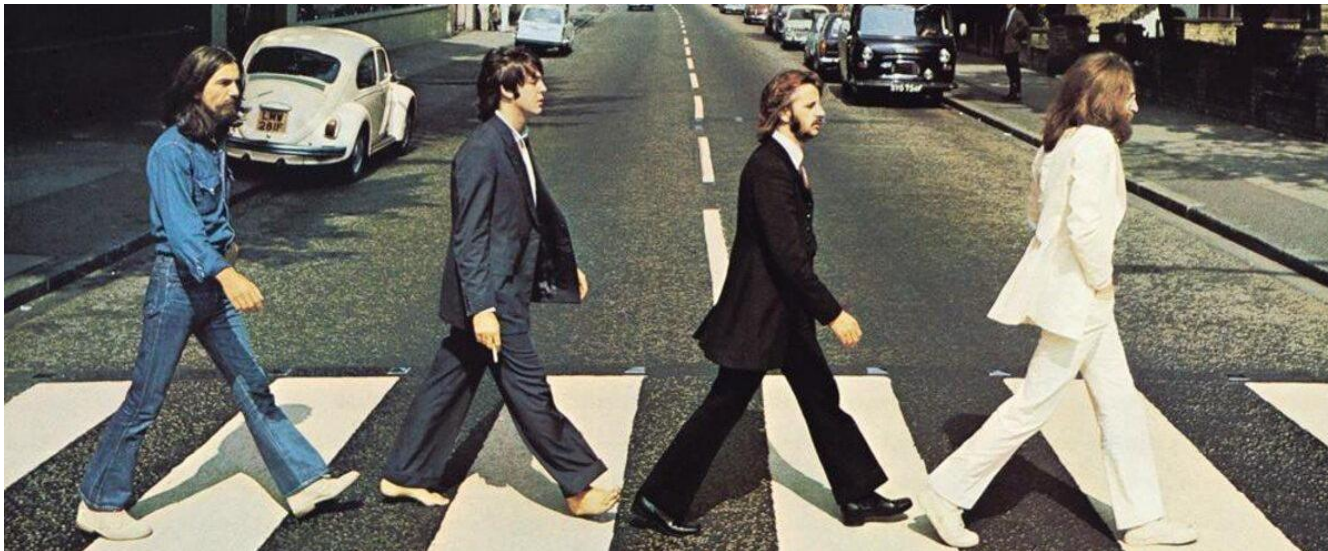


La marche

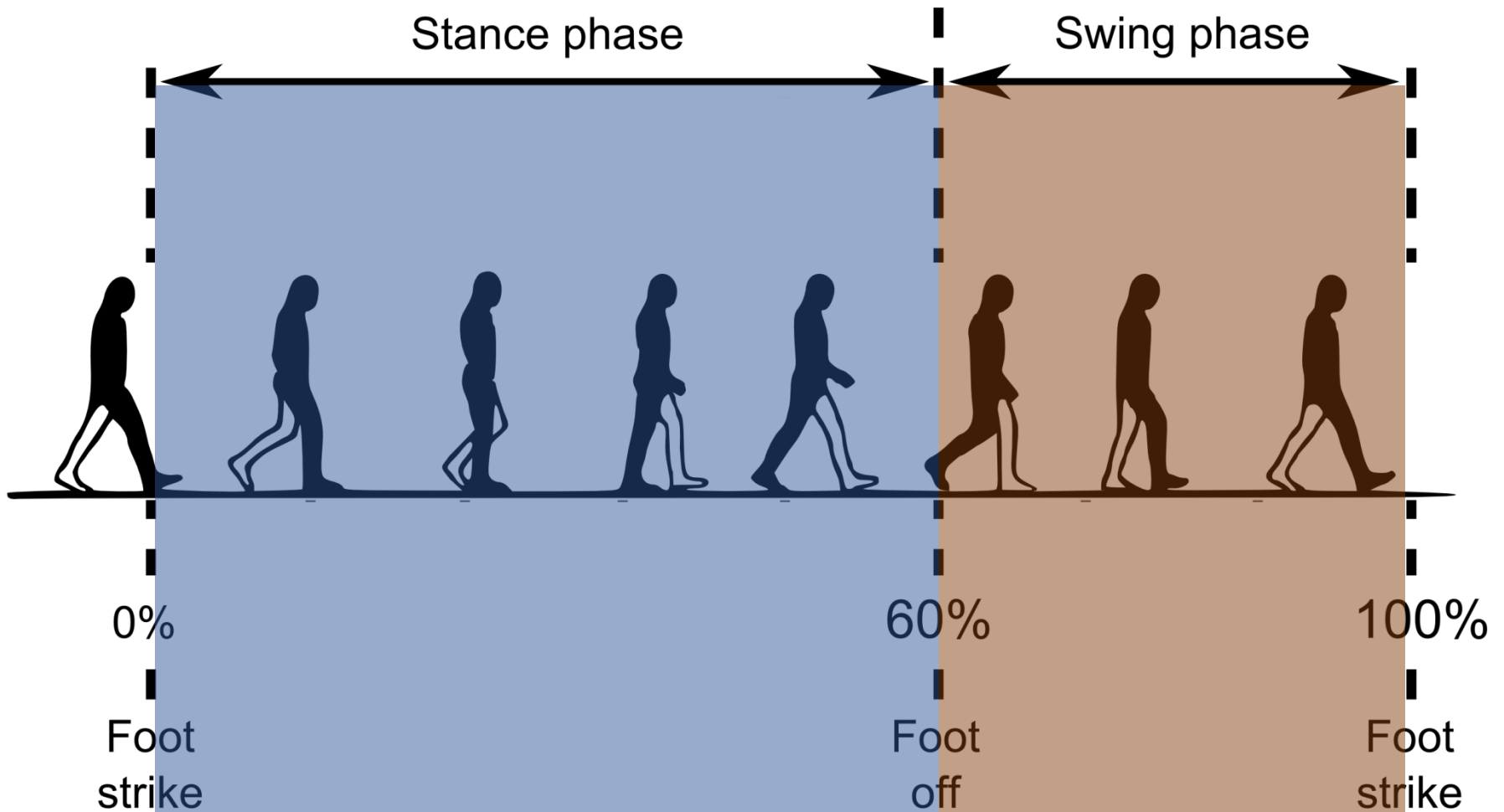
- **Marche** : mouvement permettant le déplacement du corps sur les deux pieds dans une direction donnée en ayant au moins toujours un pied en contact avec le sol

➔ Activité cyclique

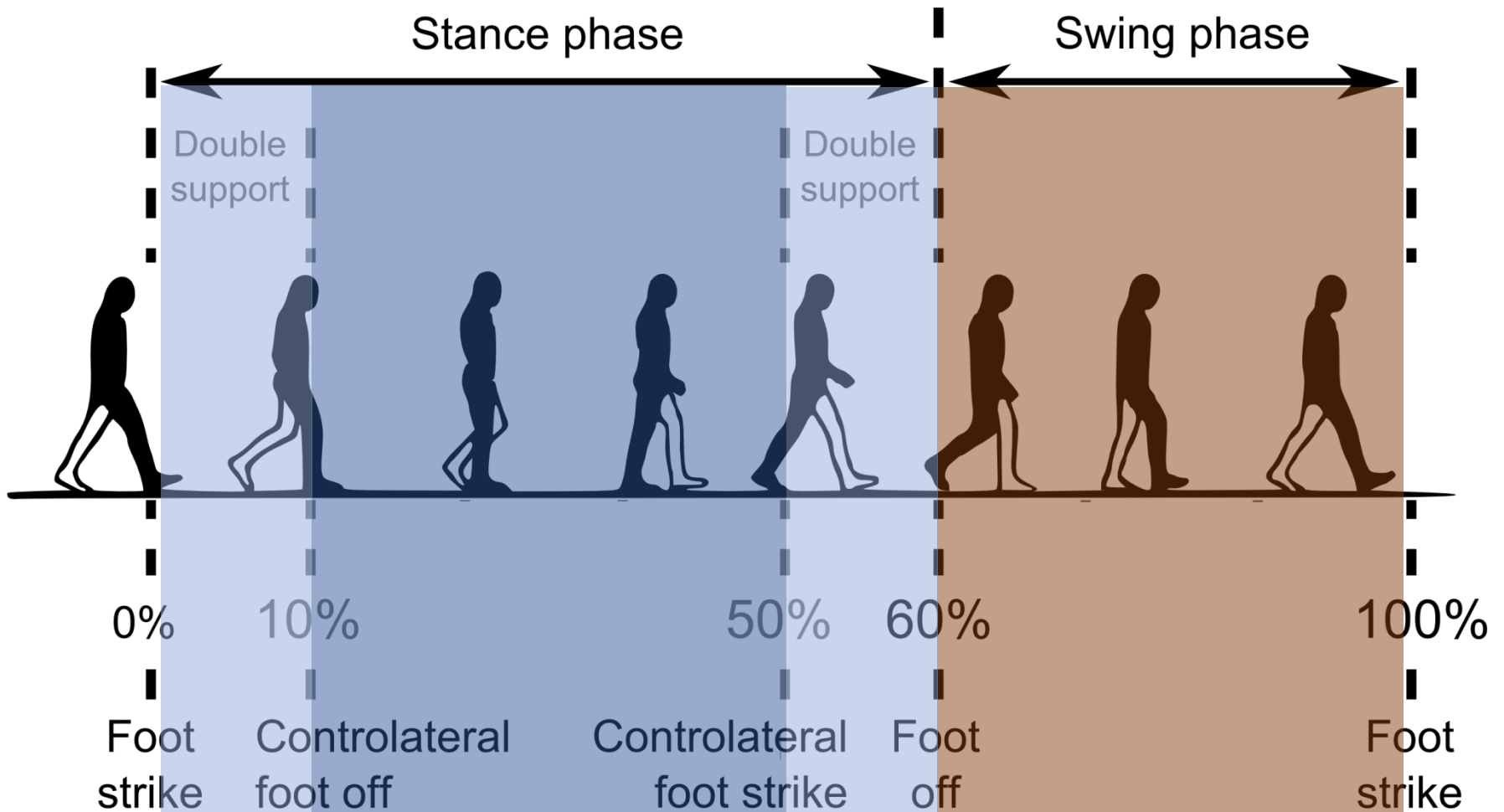
- **Démarche** : la façon de marcher



Le cycle de marche

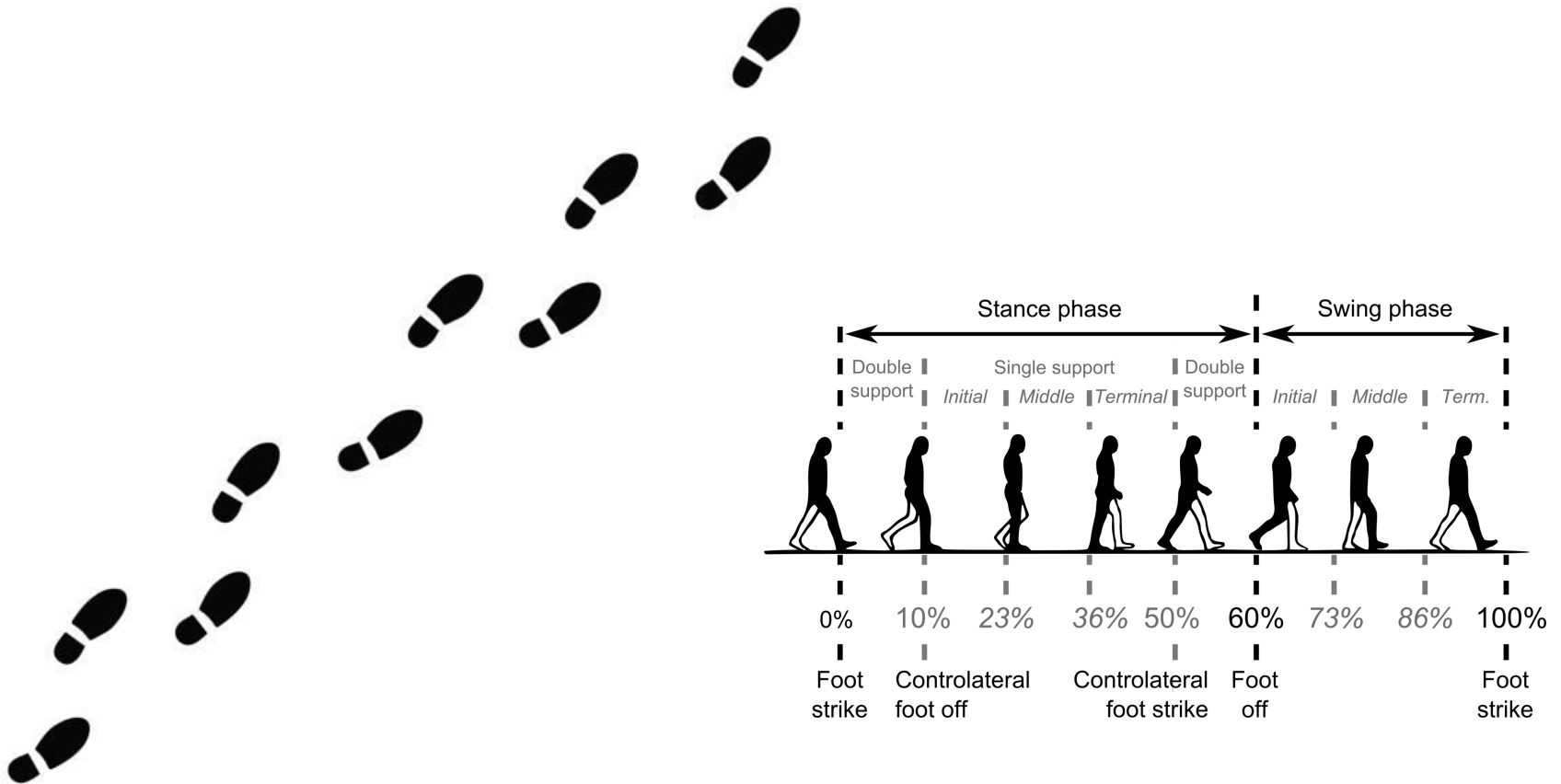


Le cycle de marche



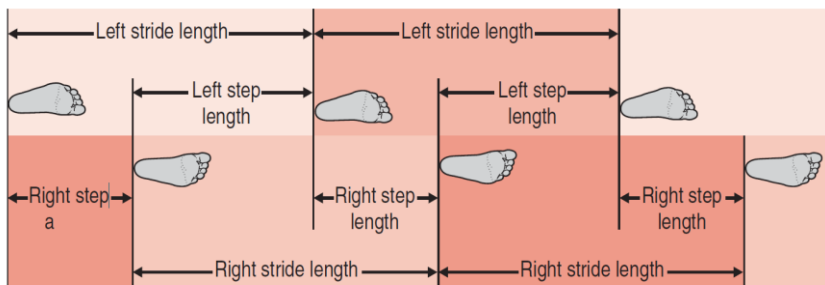
Les paramètres spatio-temporels

- Temps / Distance

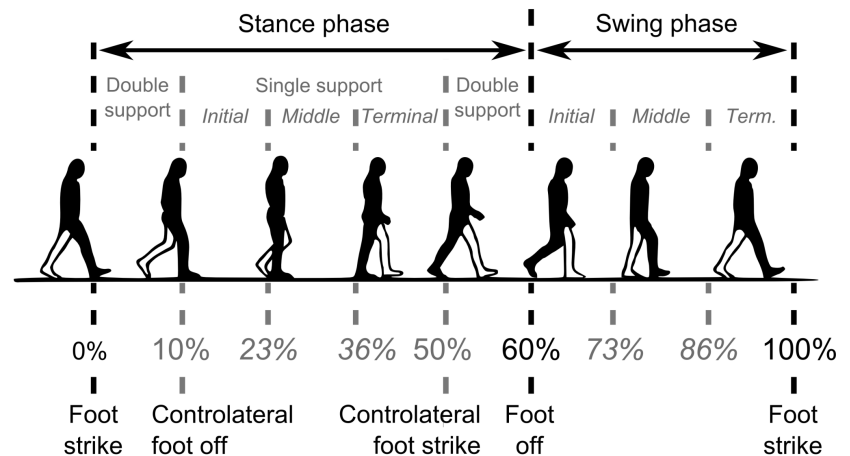


Les paramètres temporels

- **Durée du cycle (s)**: durée totale du cycle, somme de la durée d'un pas gauche et droite
- Durées **relatives** des phases
 - **Appui (60%)** : période de temps où le pied est en contact avec le sol
 - **Oscillation (40%)** : période de temps où le pied n'est pas en contact avec le sol
 - **Simple appui (40%)**: période de temps où un seul pied est en contact avec le sol
 - **Double appui (2x10%)**: période de temps où les deux pieds sont en contact avec le sol. *Attention, il y a 2 phases de double appui pendant un cycle*

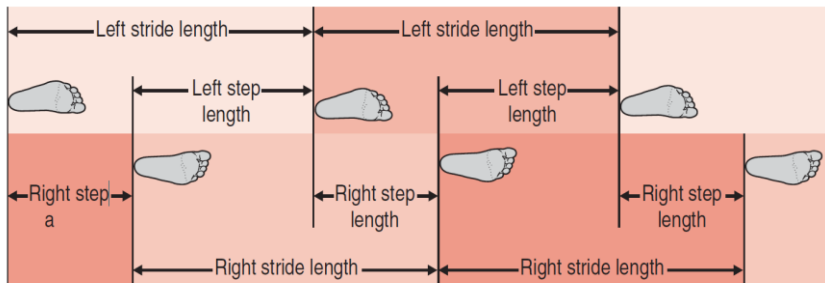


Kirtley, Clinical Gait Analysis, 2006

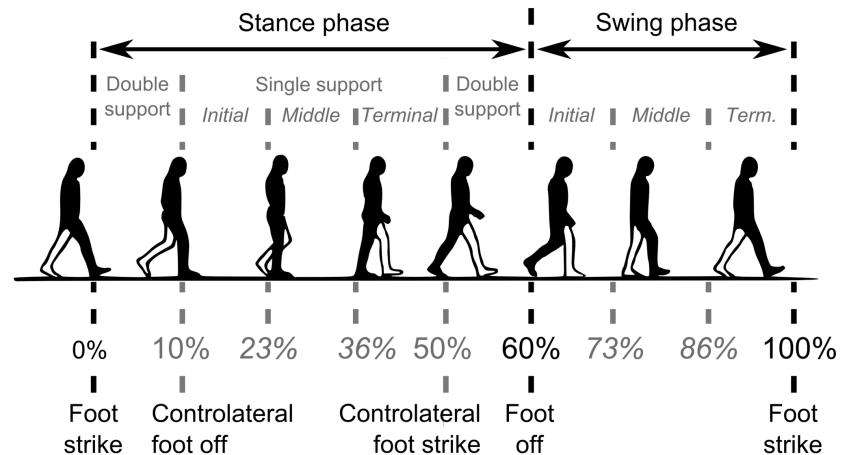


Les paramètres temporels

- **Cadence (pas/min)** : nombre de pas réalisés par unité de temps, généralement par minute
- $\text{Cadence} = (60 / \text{durée du cycle (s)}) \times 2$

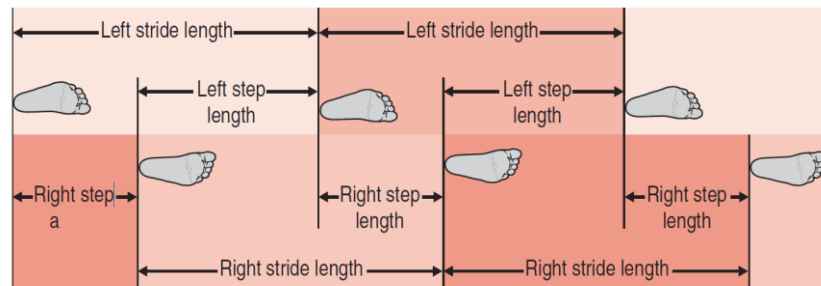


Kirtley, Clinical Gait Analysis, 2006



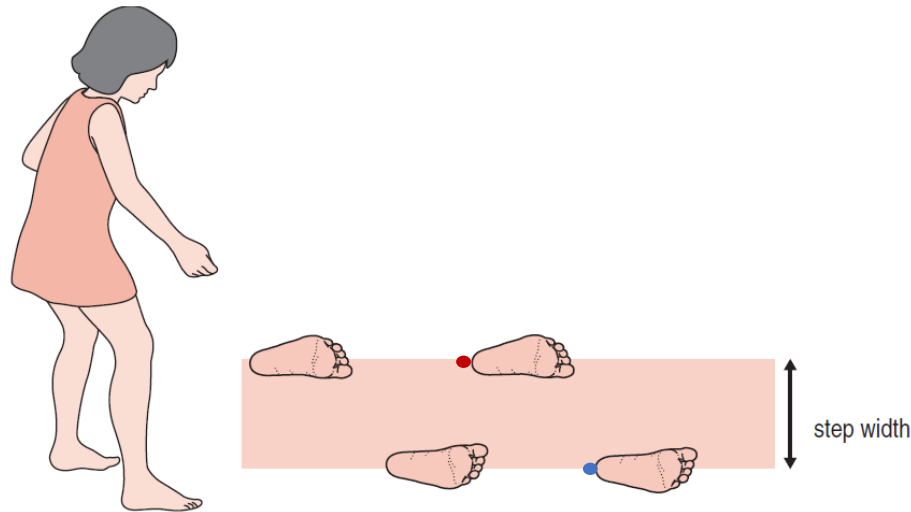
Les paramètres spatiaux

- **Longueur du pas (m)** : distance entre les points les plus en arrière de deux empreintes successives des pieds ipsi et controlatéral.
- **Longueur du cycle (m)** : distance parcourue pendant une cycle (somme pas gauche et droit)



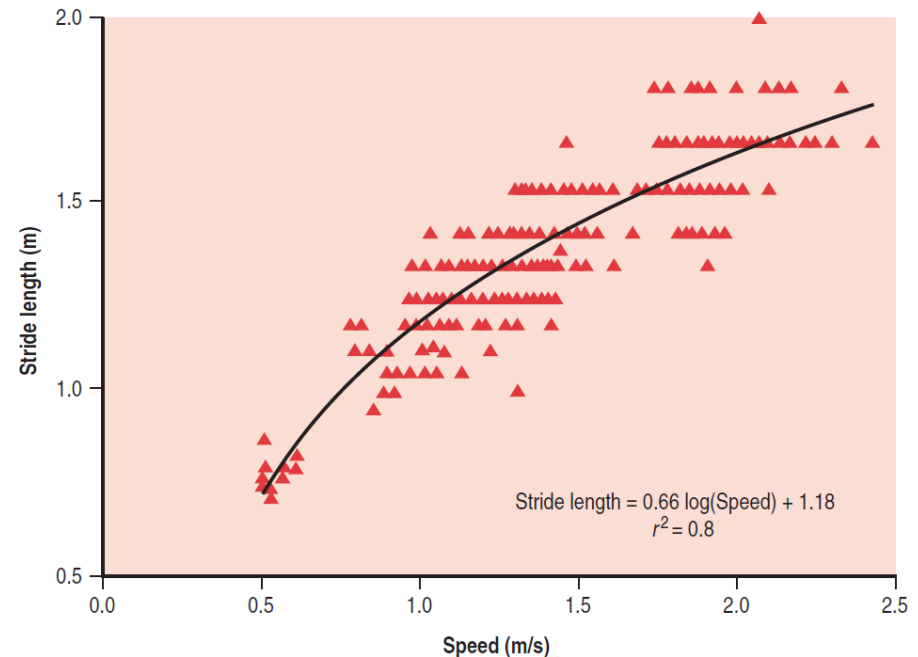
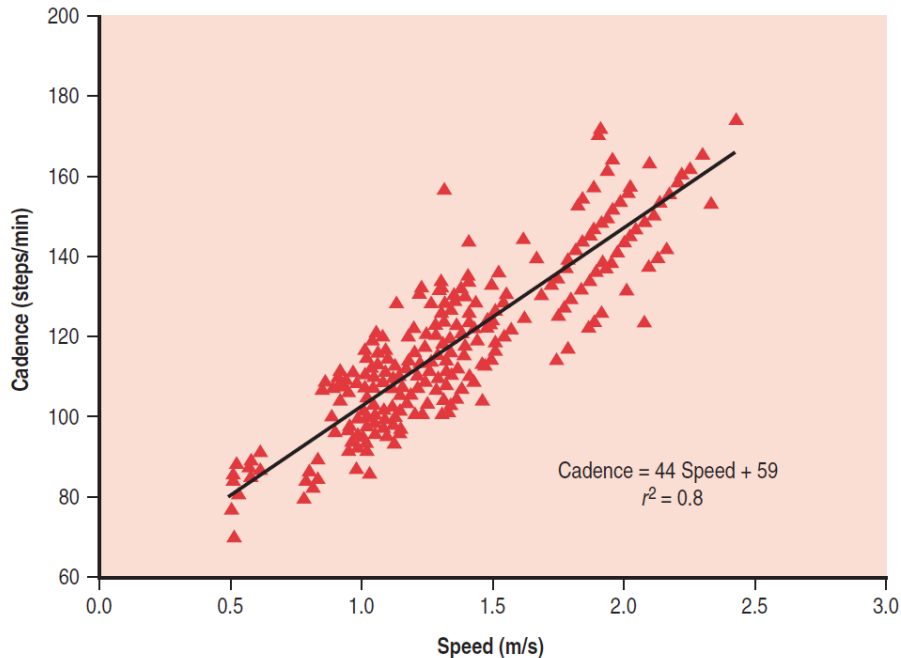
Les paramètres spatiaux

- **Largeur du pas (m)** : écartement des pieds pendant la marche, distance perpendiculaire à la ligne de progression entre les points les plus en arrière de deux empreintes successives des pieds ipsi et controlatéral



Les paramètres spatio-temporels

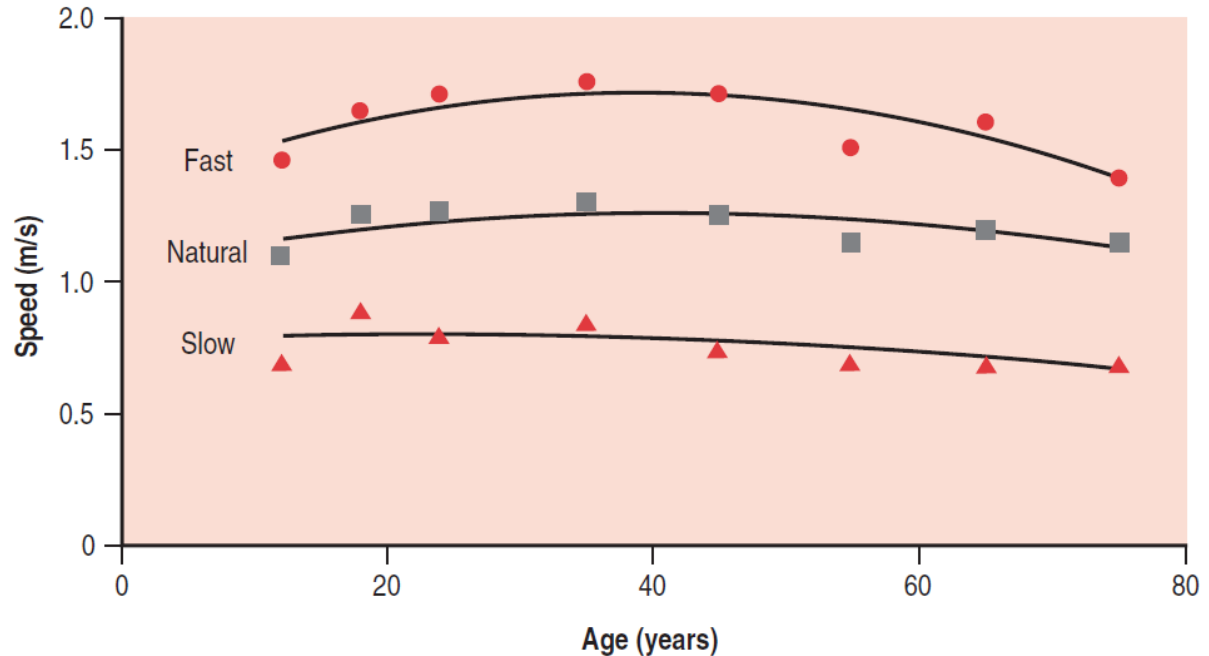
- **Vitesse (m/s)** : distance parcourue par unité de temps
 - $V = \frac{\sum \text{Distance cycle}}{\sum \text{Temps cycle}}$
 - $V = (\text{cadence (pas/min)} \times \text{longueur du cycle}) / 120$



Kirtley, Clinical Gait Analysis, 2006

Les paramètres spatio-temporels

- Valeurs normales



	Speed (m/s)	Cadence (steps/min)	Stride length (m)
Men	1.3–1.6	110–115	1.4–1.6
Women	1.2–1.5	115–120	1.3–1.5

Kirtley, Clinical Gait Analysis, 2006

Altérations des PST

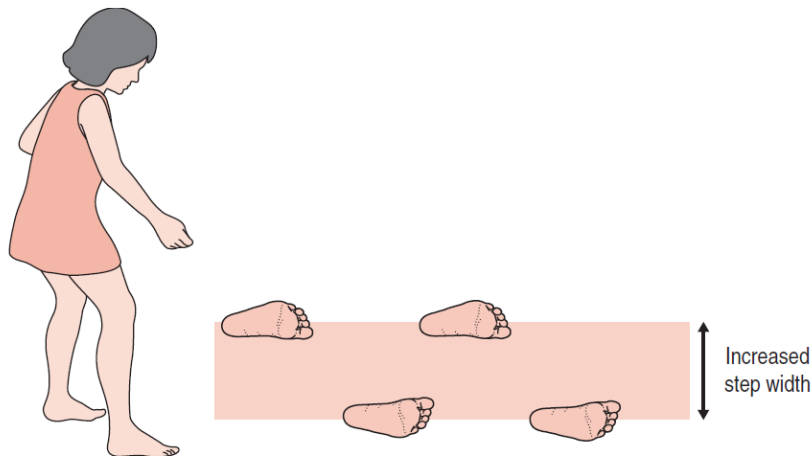
Table 1.3 Interpretation of TSPs in gait disorders

Speed	Stride length	Cadence	Conclusion
N	N	N	Normal gait
N	↓	↑	Compensated gait
↓	↓	↑	Inadequately compensated gait
↓	↓	↓	Severe gait impairment

Table 1.4 Interpretation of temporal measures in gait disorders

Stance duration	Conclusion
↓	Ipsilateral pain or instability
↑	Dysequilibrium or contralateral instability

Kirtley, Clinical Gait Analysis, 2006

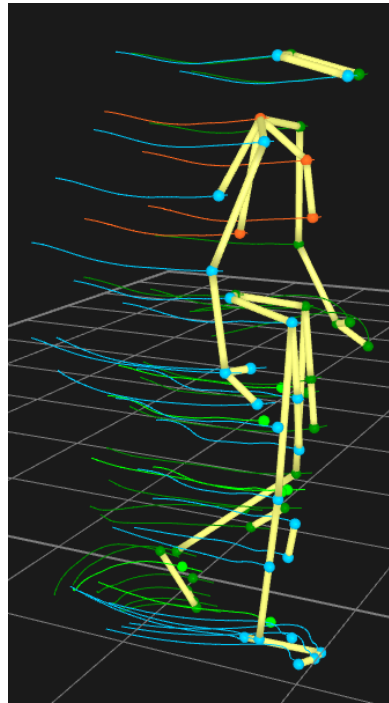


Plan

- De l'équilibre à la marche
- La marche
 - Cycle de marche
 - Paramètres spatio-temporels
 - Cinématique
 - Cinétique
 - Activité musculaire
 - Energie
 - Déterminants de la marche
 - Analyse Quantifiée de la Marche
- La course
 - Cycle de course
 - Paramètres spatio-temporels
 - Cinématique
 - Cinétique
 - Energie

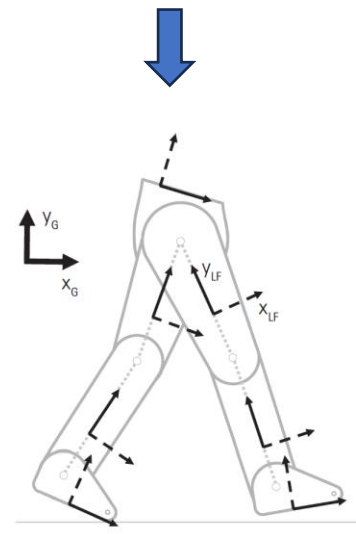
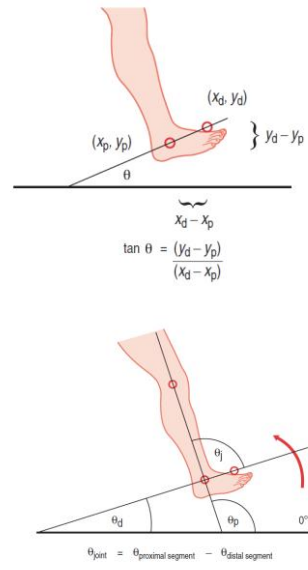
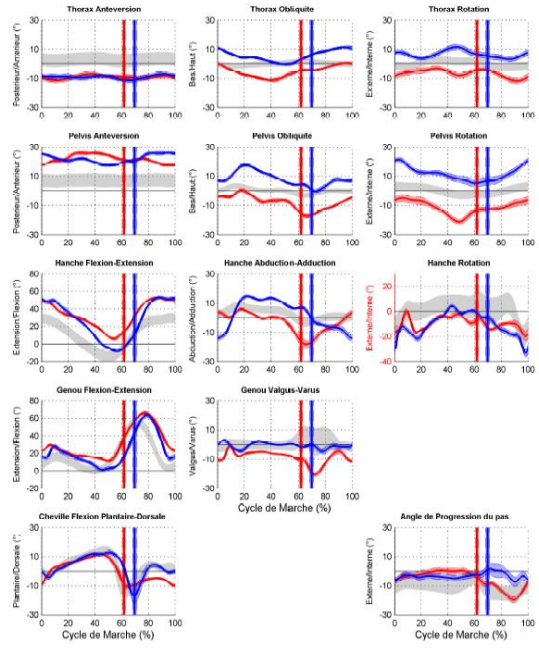
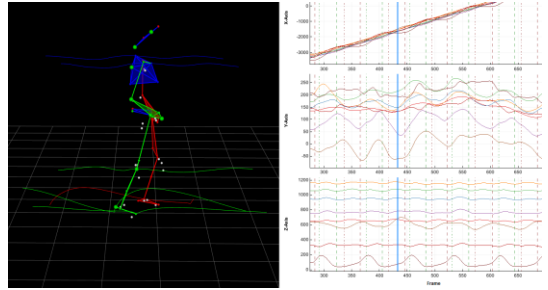
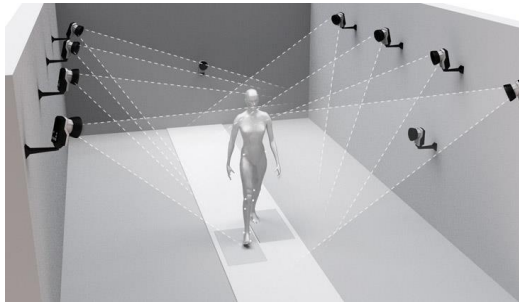
Cinématique de la marche

- Etude du mouvement



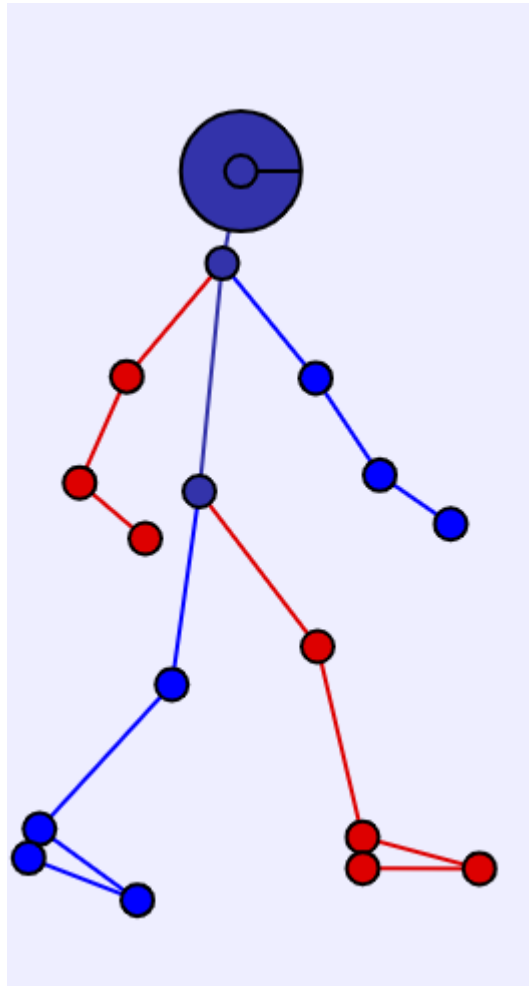


De la capture du mouvement à la cinématique de la marche

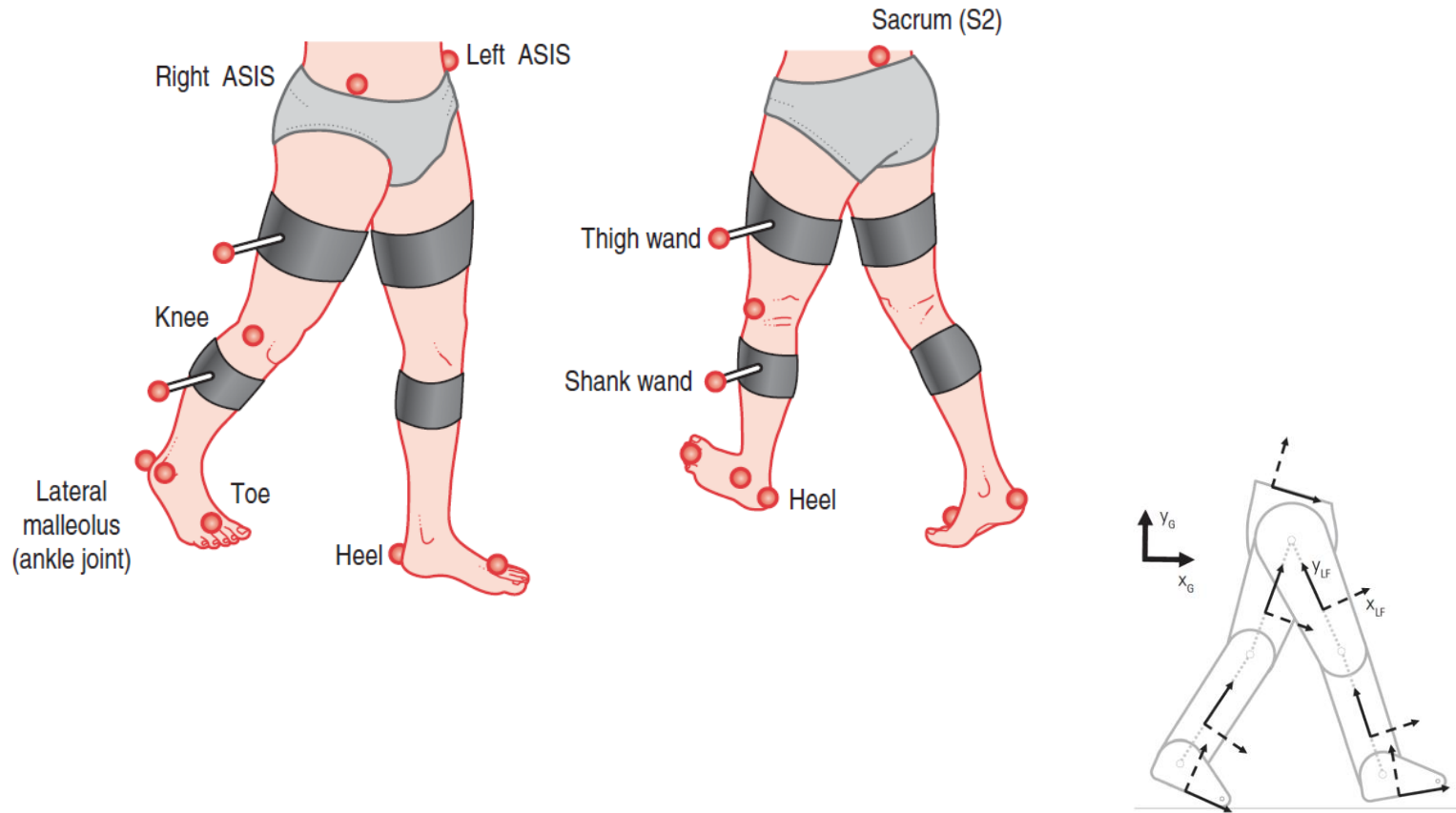


Cinématique 2D

- http://www.articlesbyaphysicist.com/body_angles.html

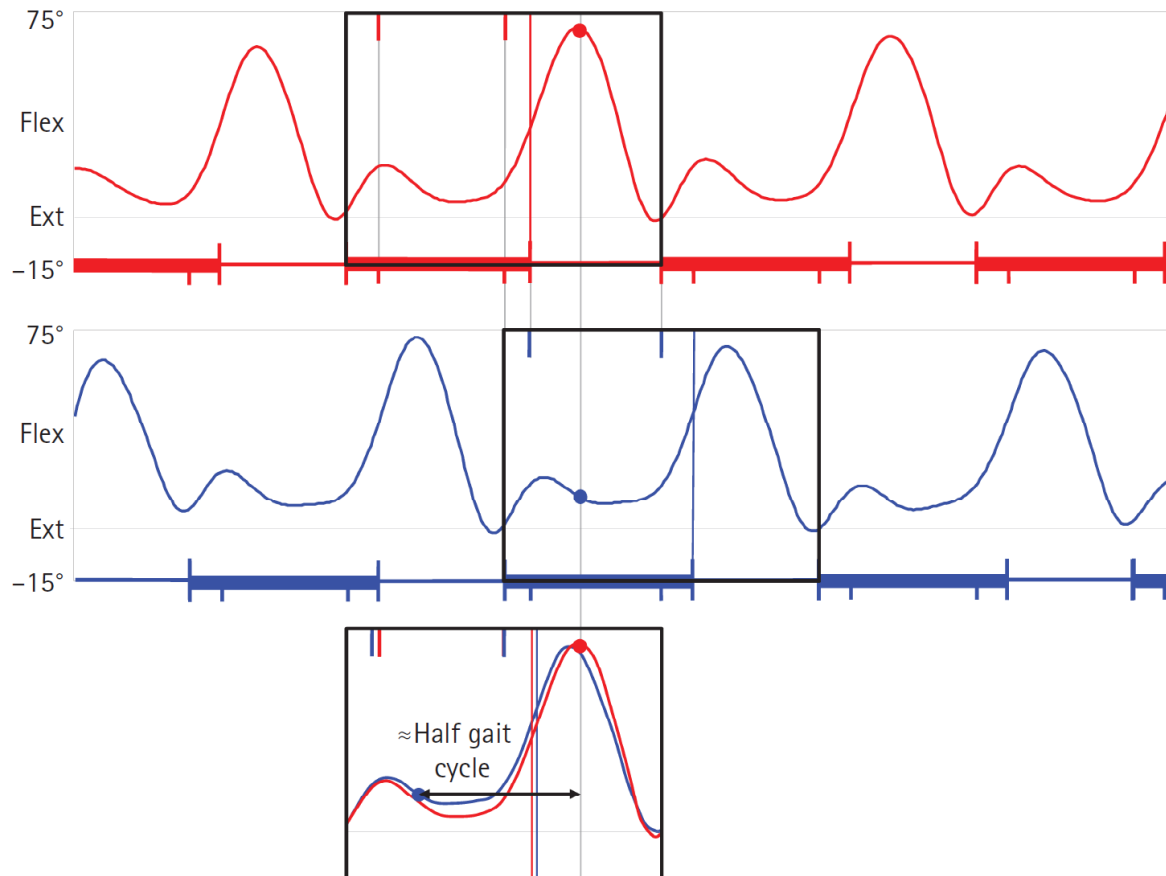


Modèle conventionnel de la marche

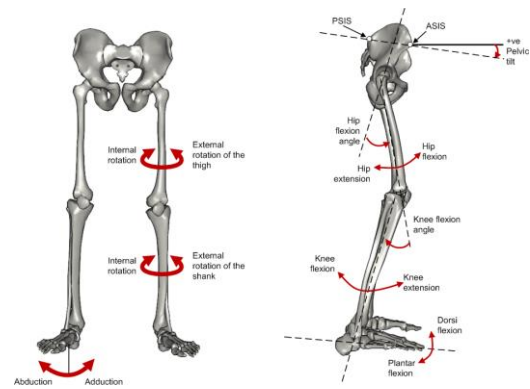
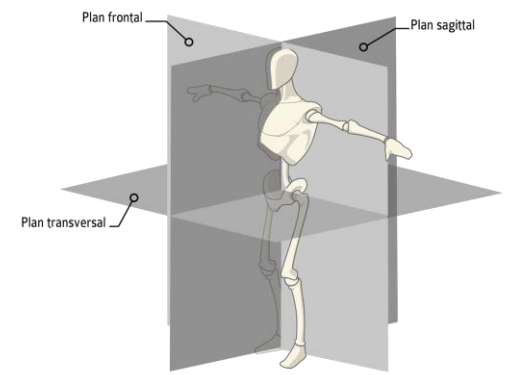
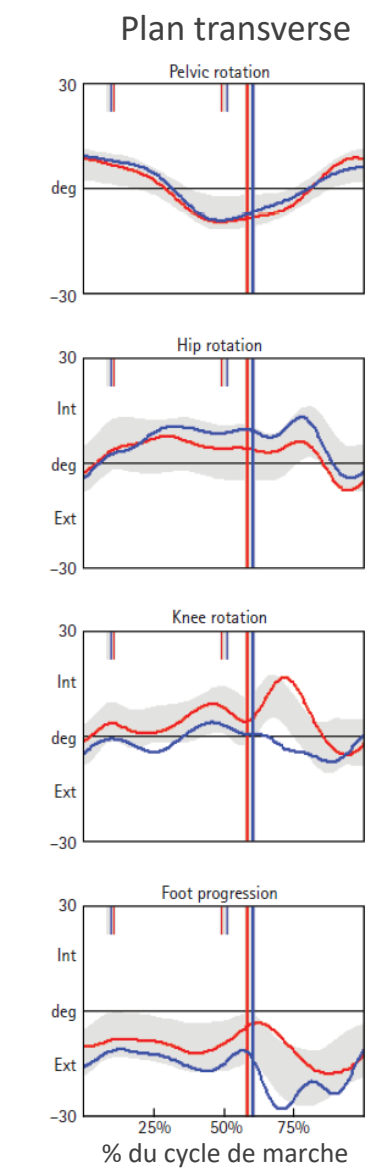
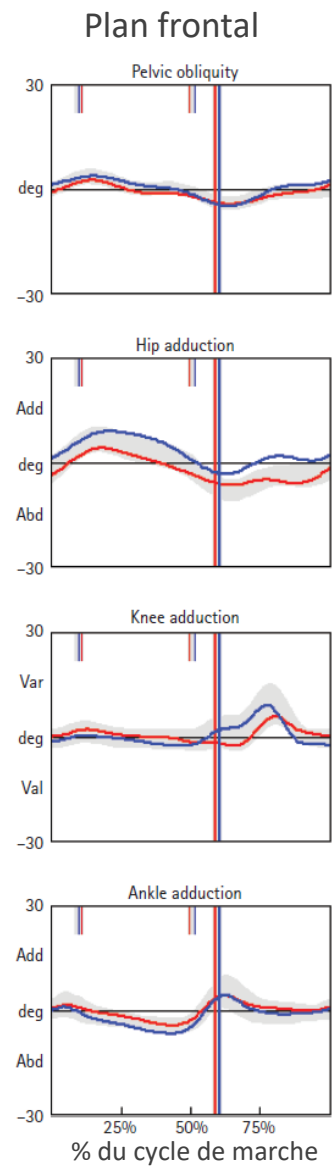
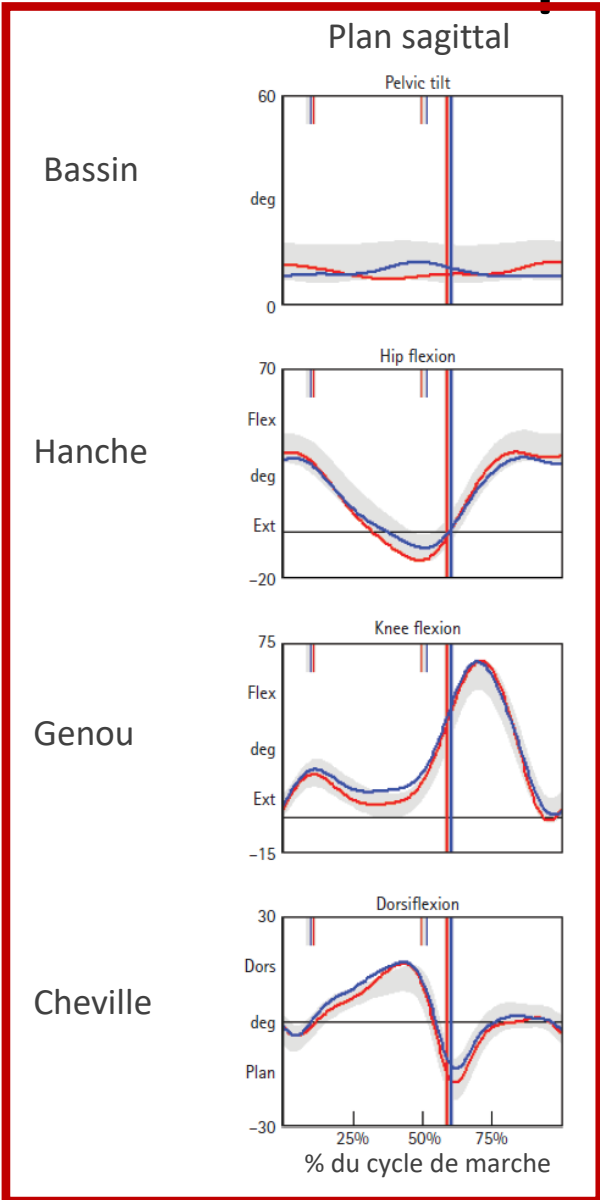


Cinématique du membre inférieur

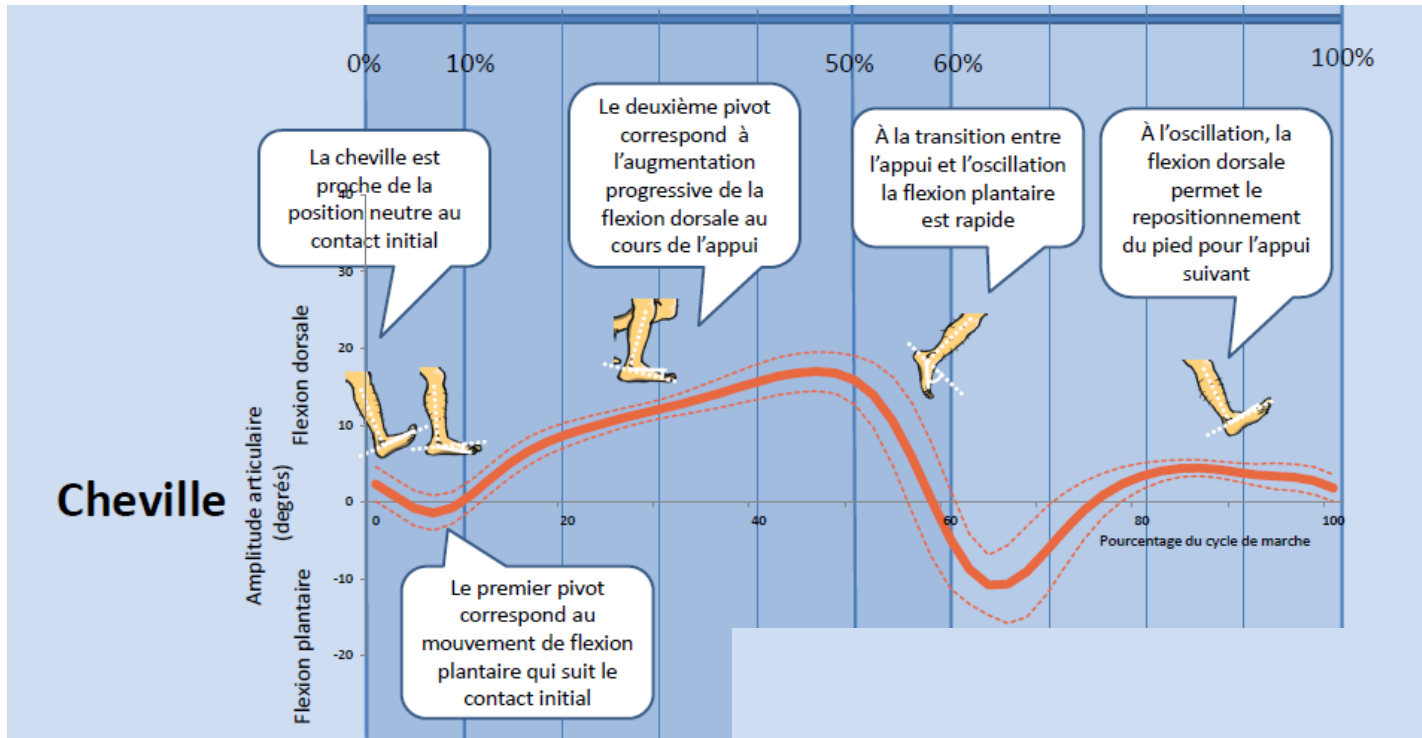
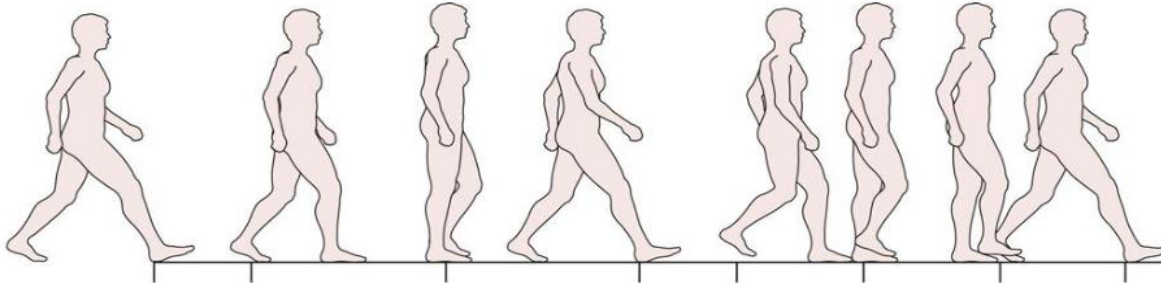
- Découpage en cycles



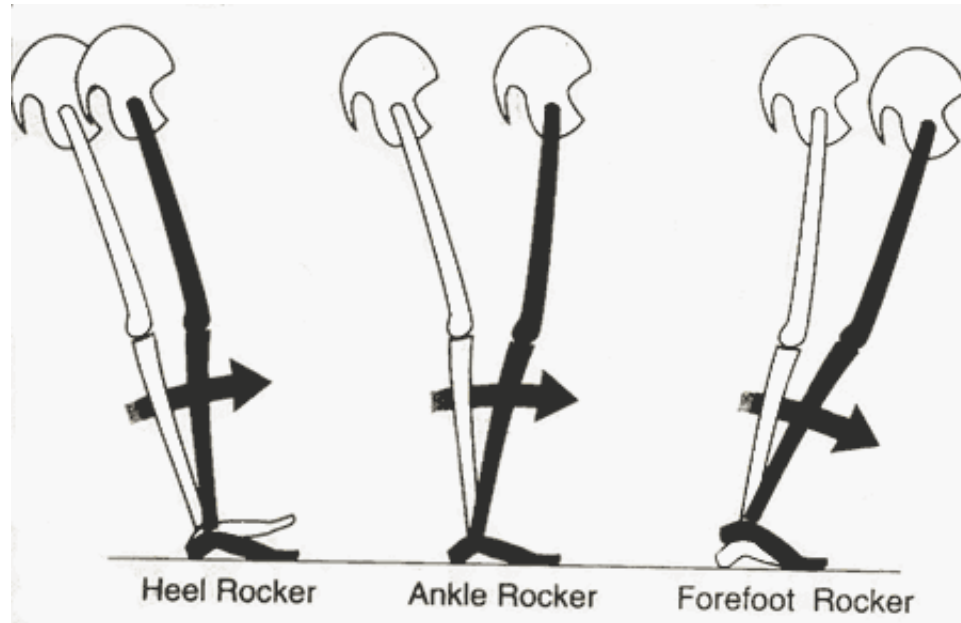
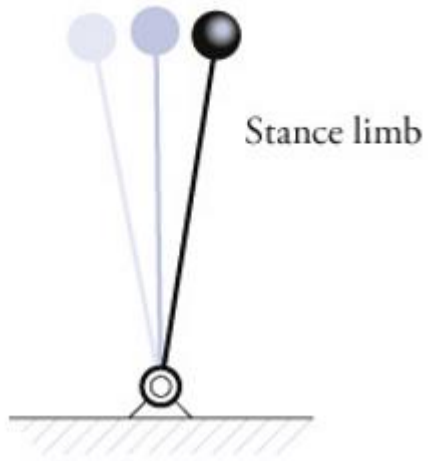
Cinématique du membre inférieur



Cheville – plan sagittal



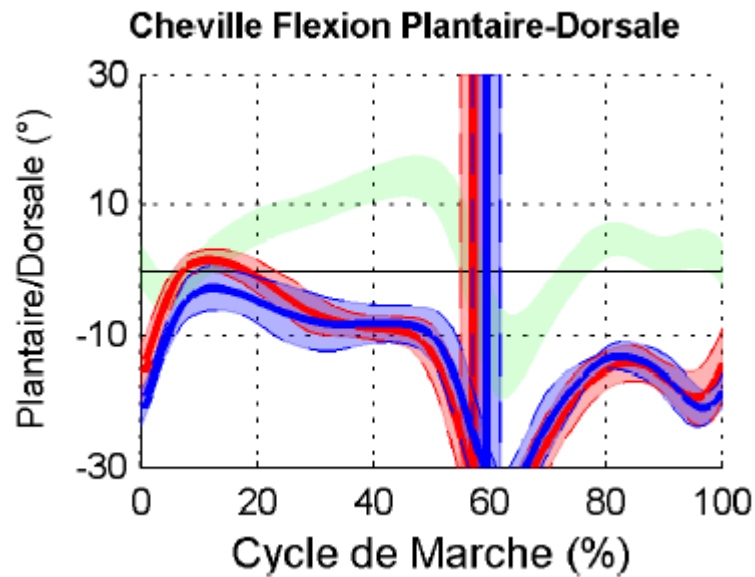
Cheville/pieds - pivots



Perry, *Gait Analysis: Normal and Pathological Function*, 2010

Rétraction du triceps

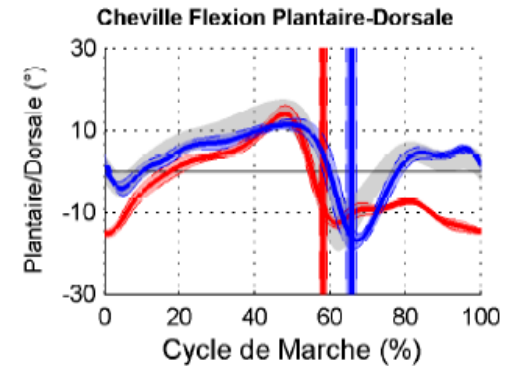
- Marche digitigrade / en équin



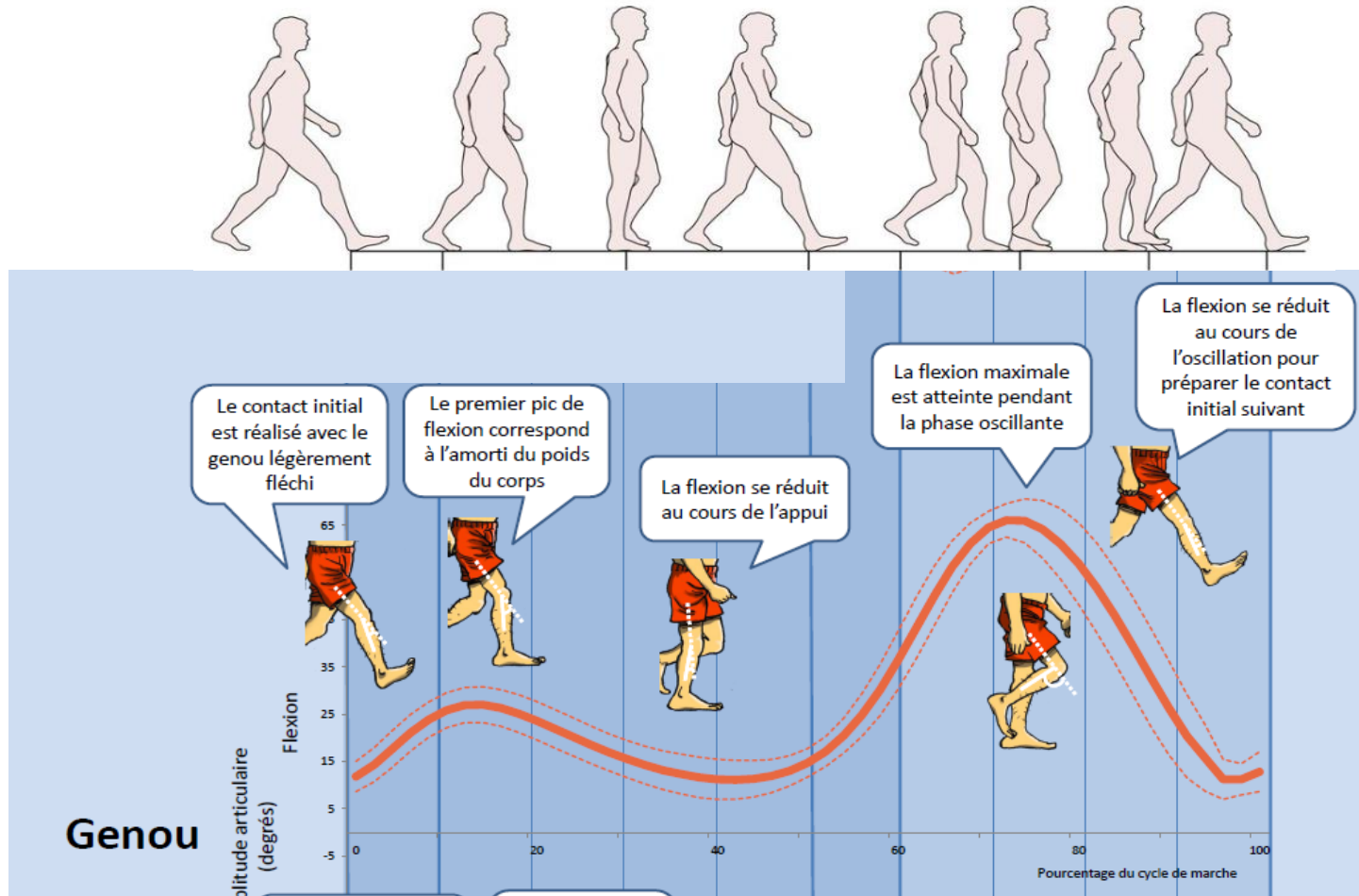
<https://musculoskeletalkey.com/the-role-of-gait-analysis-in-treating-gait-abnormalities-in-cerebral-palsy/>

Faiblesse des fléchisseurs dorsaux

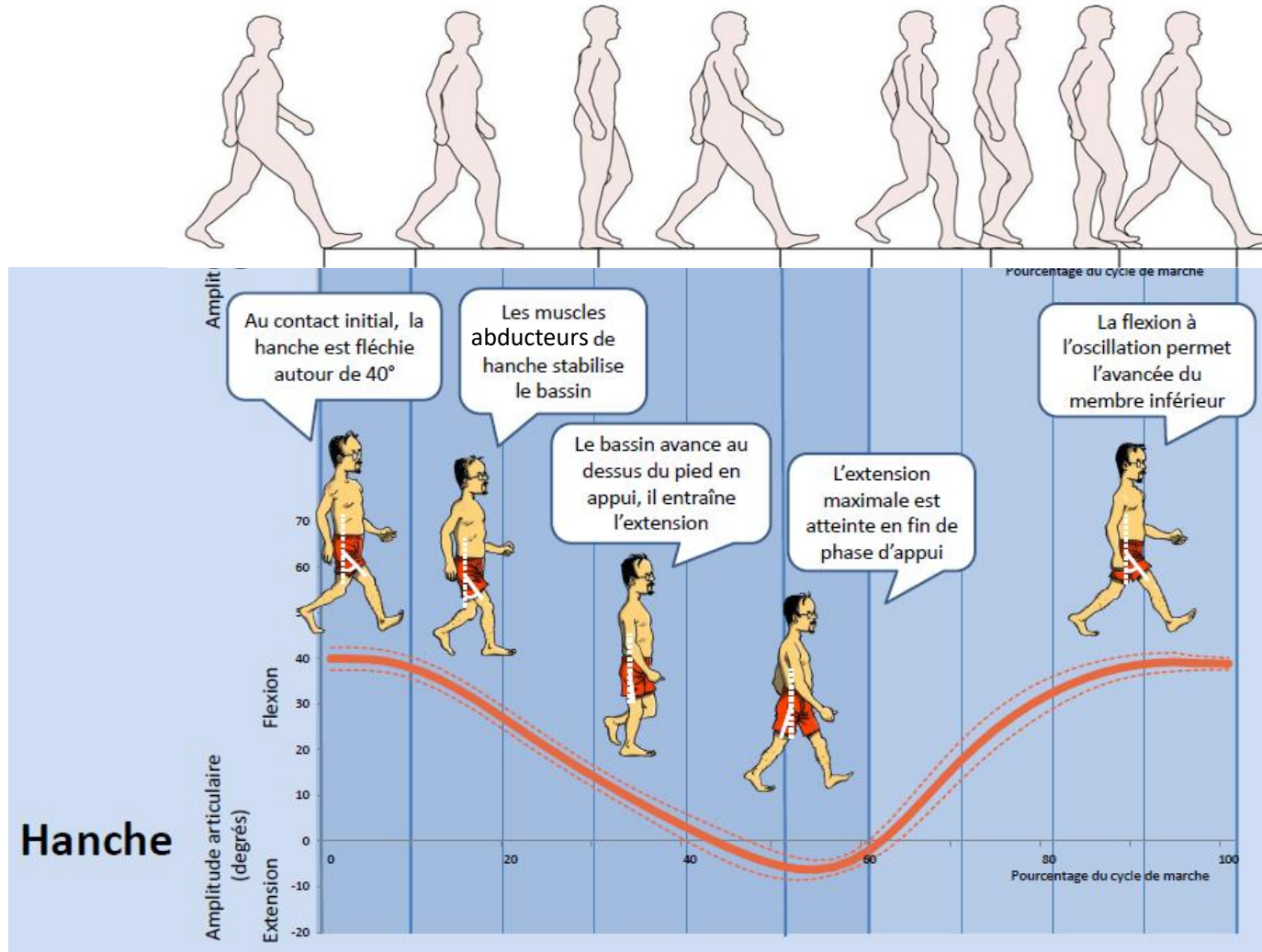
- Pied tombant
- (Pied qui claque)
- Compensation
 - Flexion de hanche et genou



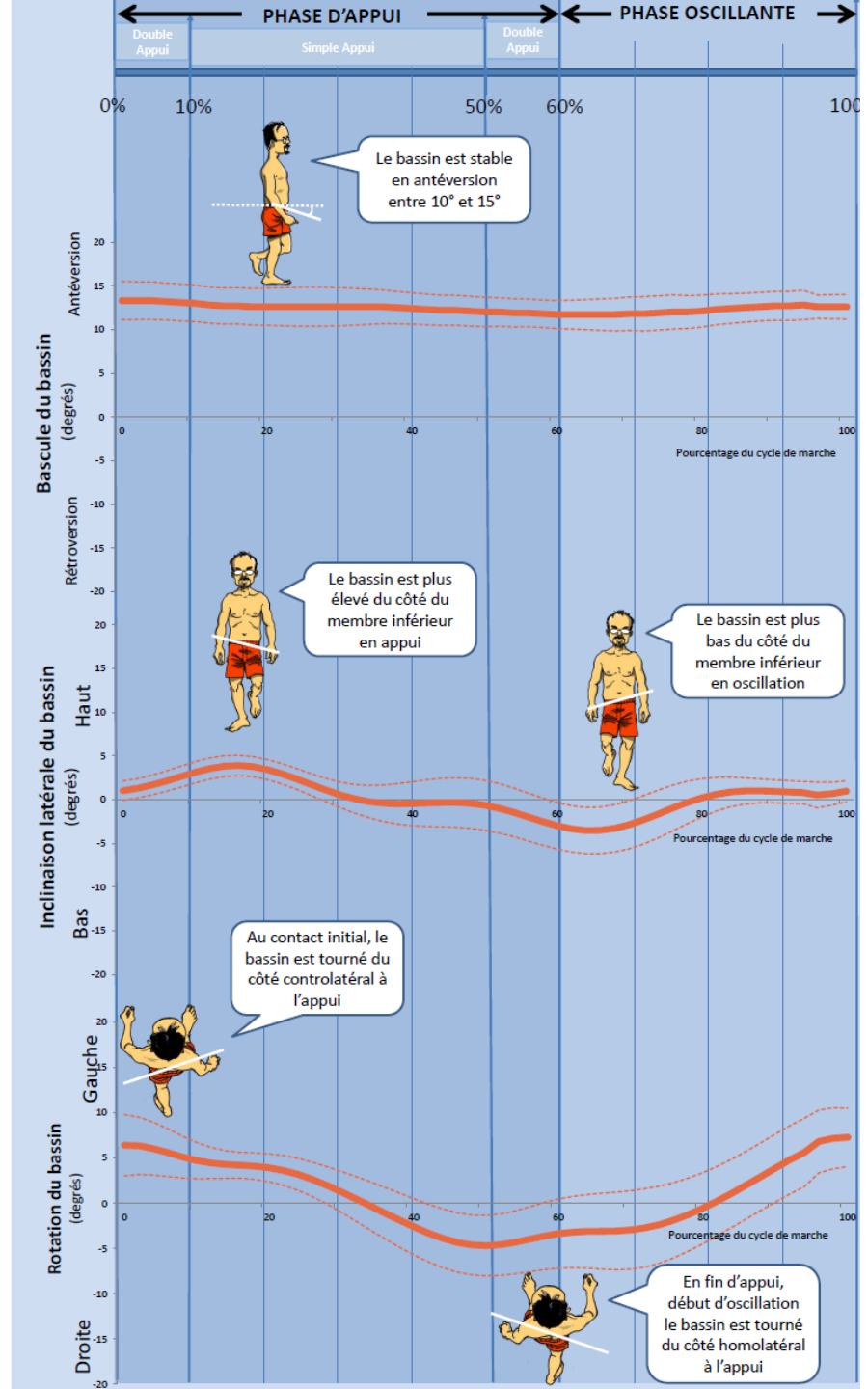
Genou – plan sagittal



Hanche – plan sagittal

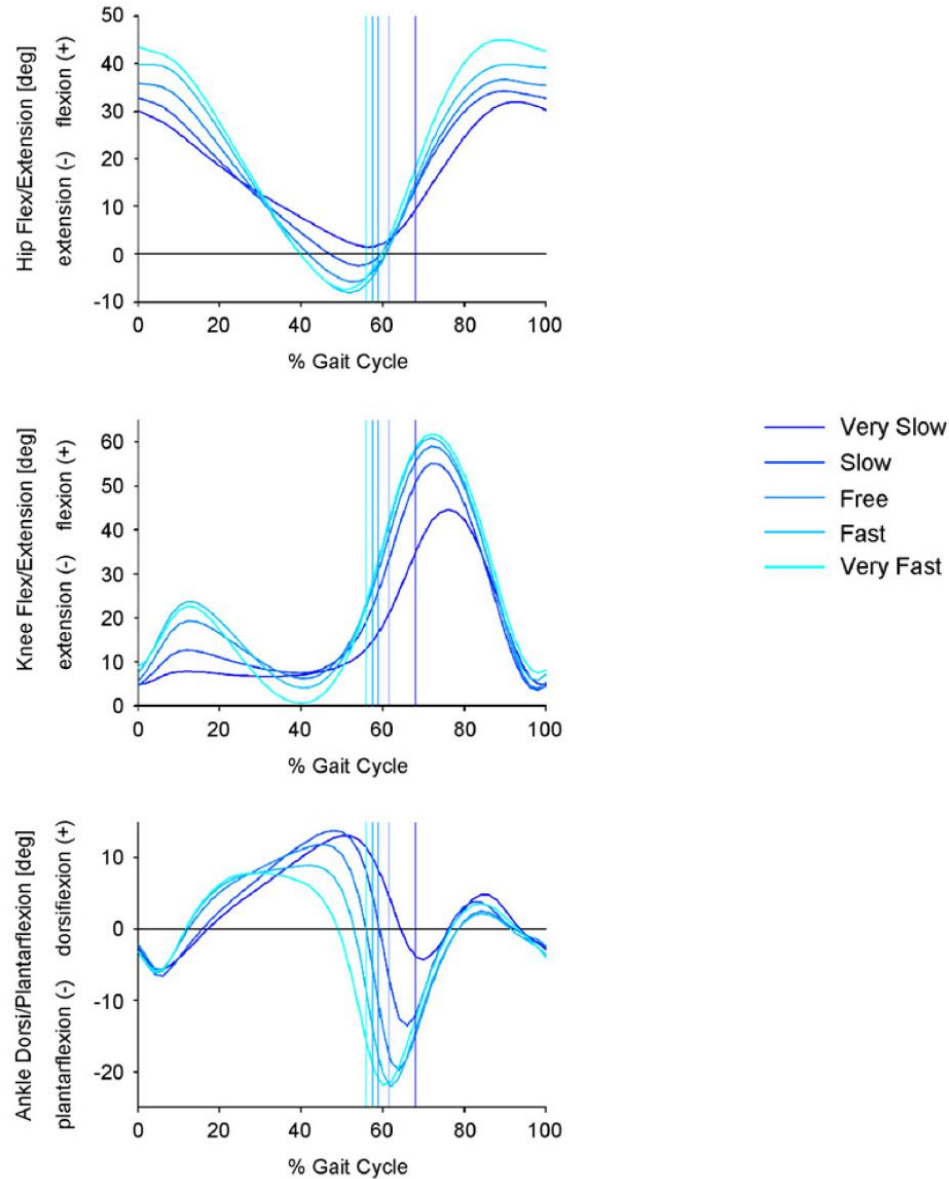


Bassin



https://www.chu-lyon.fr/sites/default/files/recherche/poster_aqm_-_les_normes_4_mouvement-et-handicap_hcl_01-2021.pdf

Cinématique et vitesse de marche



Plan

- De l'équilibre à la marche
- La marche
 - Cycle de marche
 - Paramètres spatio-temporels
 - Cinématique
 - Cinétique
 - Activité musculaire
 - Energie
 - Déterminants de la marche
 - Analyse Quantifiée de la Marche
- La course
 - Cycle de course
 - Paramètres spatio-temporels
 - Cinématique
 - Cinétique
 - Energie

Cinétique

- Définition : étude des forces qui causent le mouvement



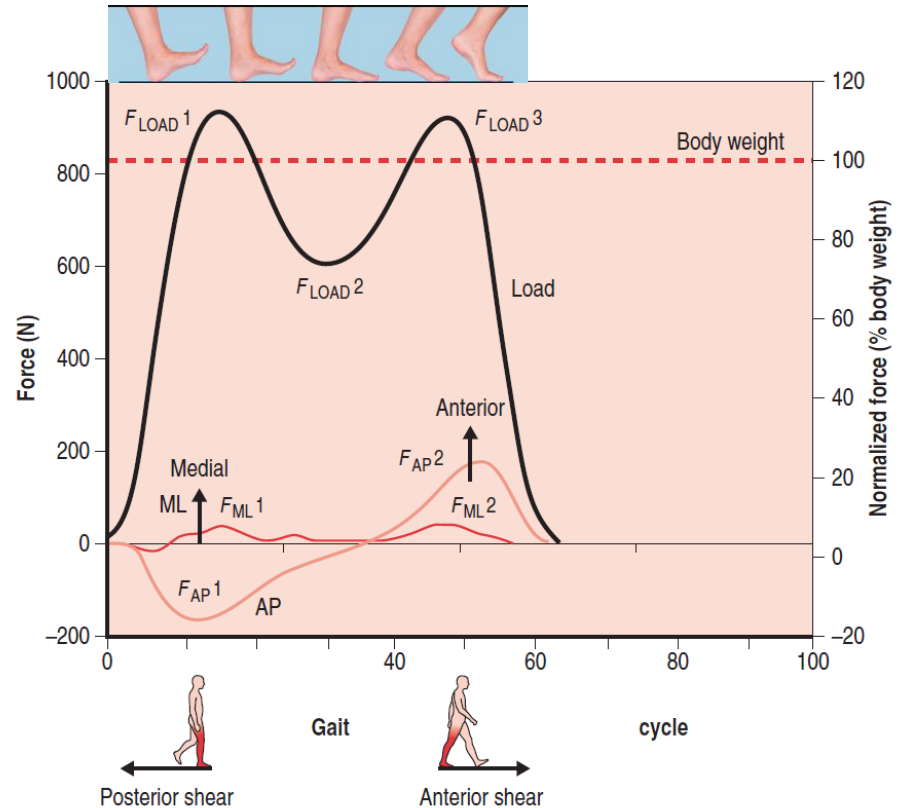
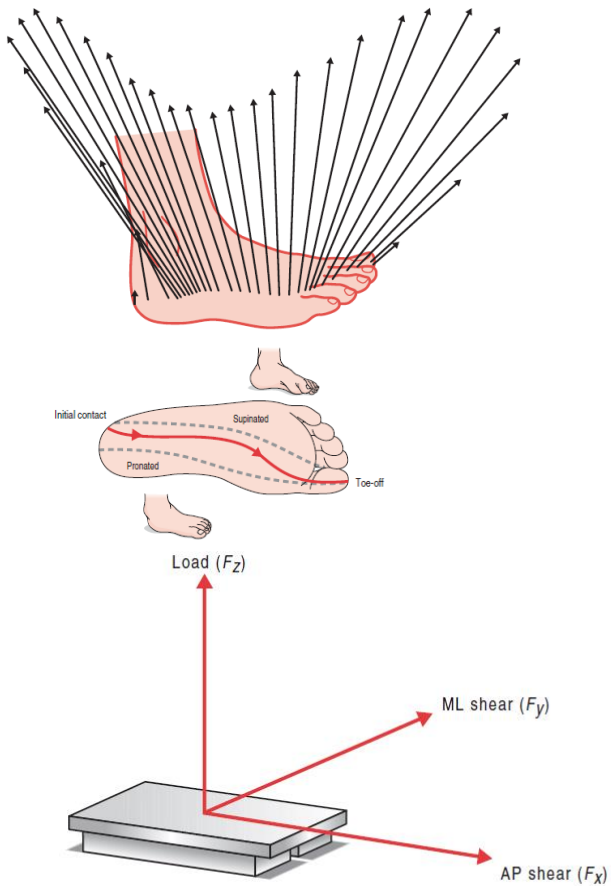
$$\sum \vec{F} = 0$$
$$\sum \tau_z = 0$$

$$\sum_i \vec{F}_i = m\vec{a}$$

$$\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$$

Forces de réactions aux sols

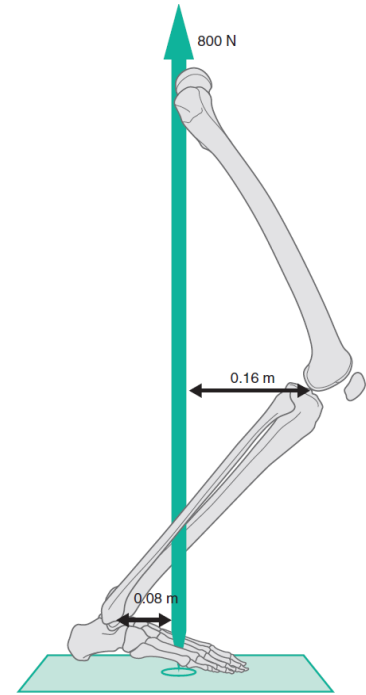
- Mesurées avec plateformes de forces



Moment articulaire en statique

- **Définition** : somme de tous les moments internes délivrés par toutes les structures internes autour d'une articulation (ne prend pas en compte les co-contractions)
- Correspond aux forces générées par les muscles et les structures passives en prenant en compte les bras de levier
- **Moment (N.m)**=Force (N) x Bras de levier (m)

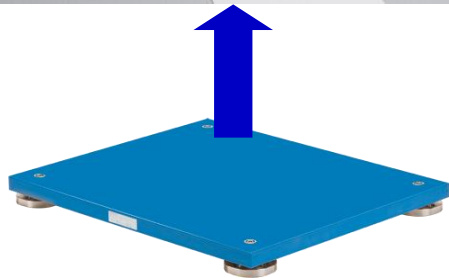
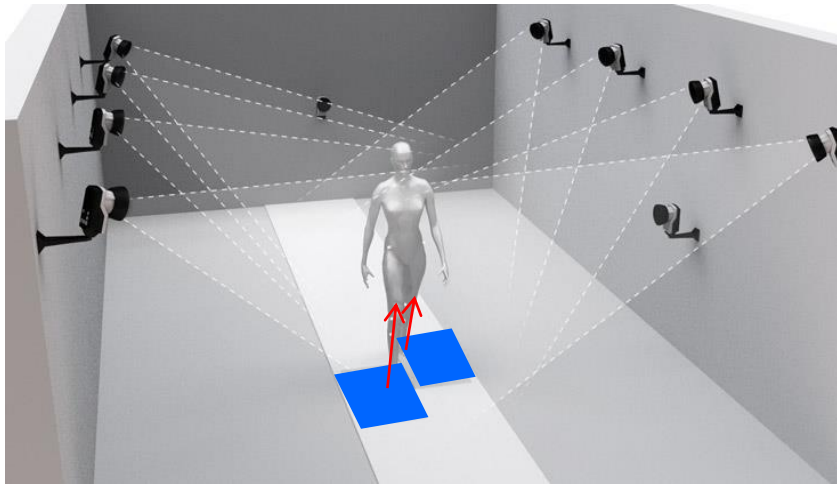
➔ Le moment interne renseigne sur le groupe musculaire actif pendant le mouvement



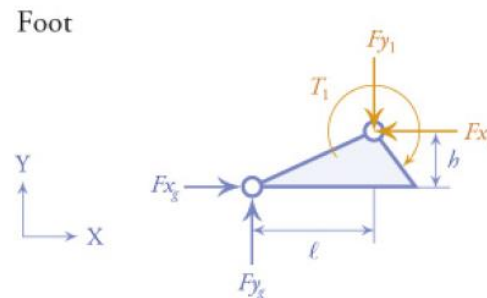
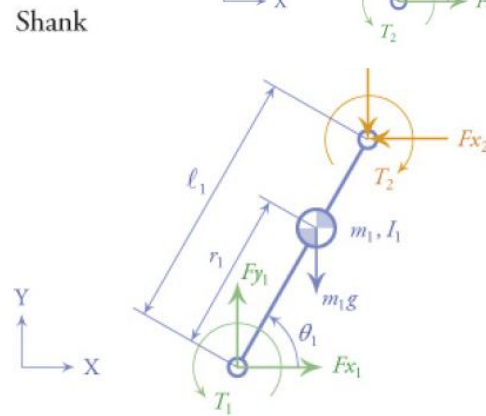
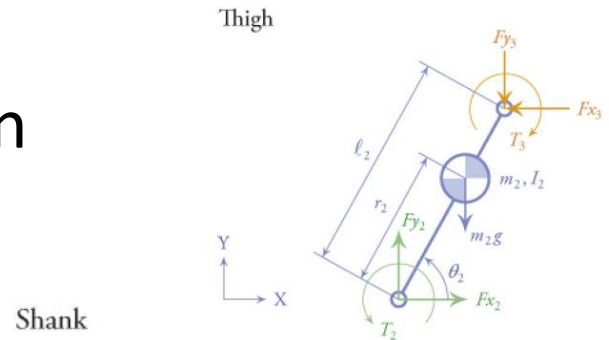
Richards, The Comprehensive Textbook of Clinical Biomechanics, 2018

Moment articulaire en dynamique

- Calculé par dynamique inverse
- Mouvement et inertie des segments doivent être pris en compte

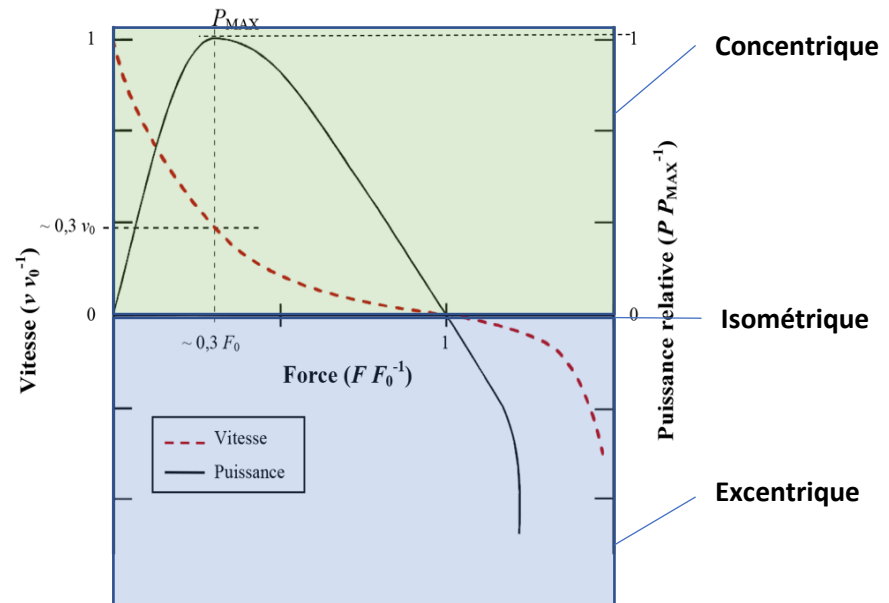
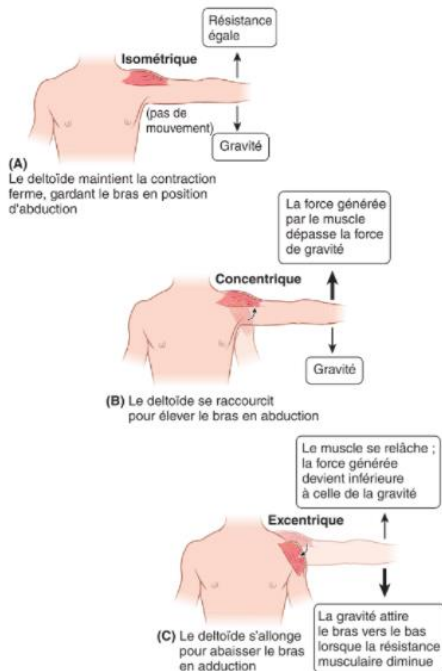


41

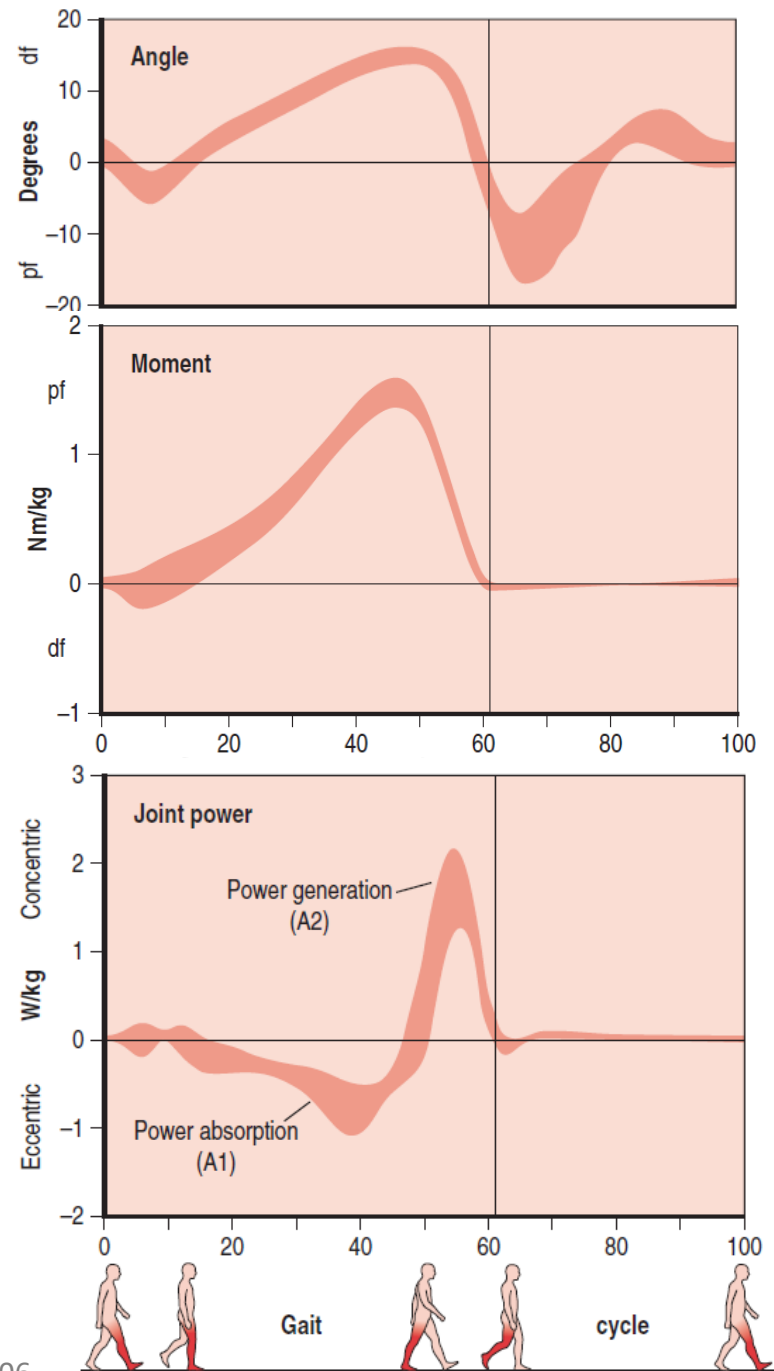


Puissance articulaire

- Définition : quantité de génération et de dissipation d'énergie de tous les muscles et structures internes autour d'une articulation
 - Puissance = Force x Vitesse
 - Puissance = Moment x Vitesse angulaire
- ➔ Renseigne sur le type de contraction musculaire pendant le mouvement

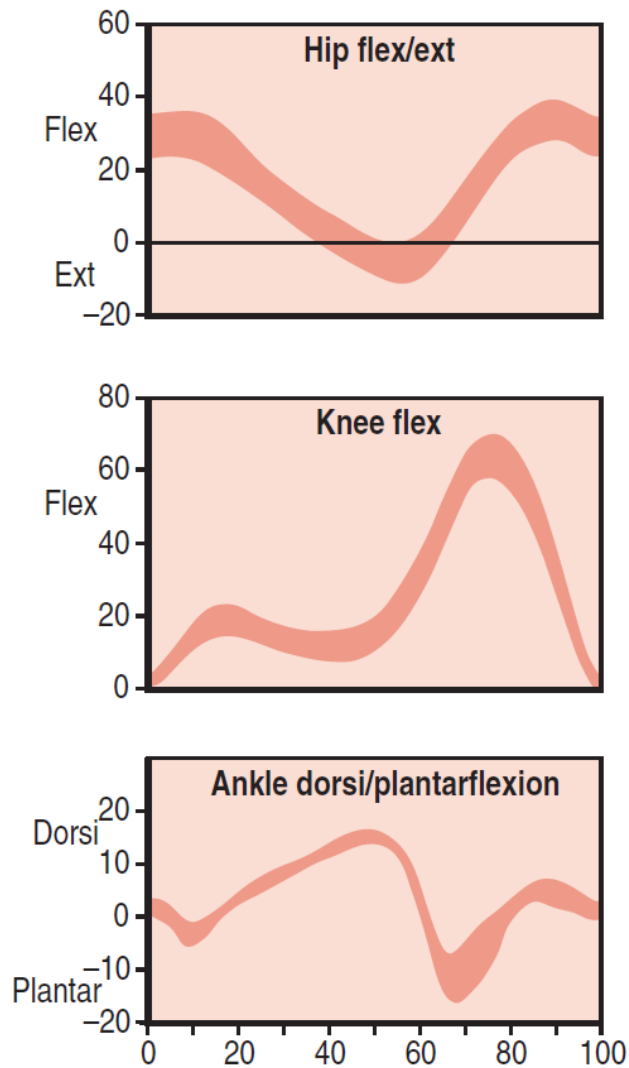


Puissance articulaire

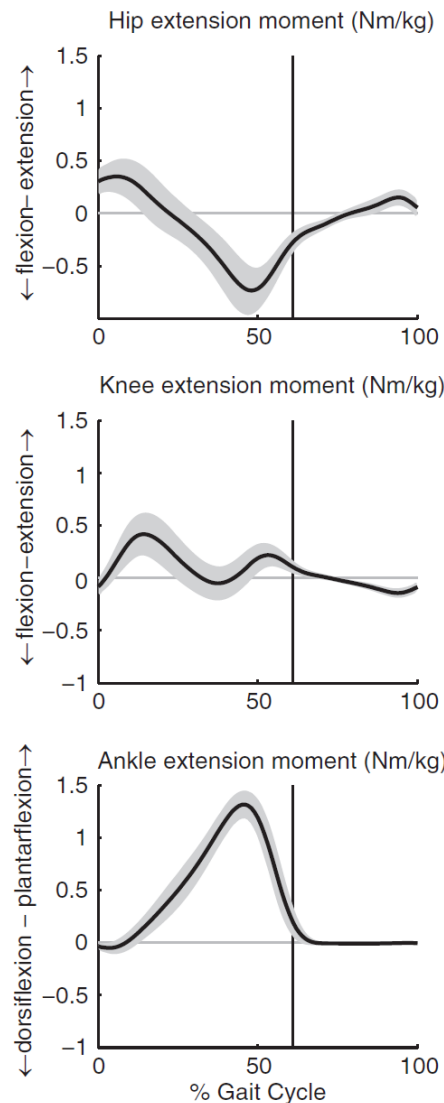


Angles, moments et puissances du membre inférieur dans le plan sagittal

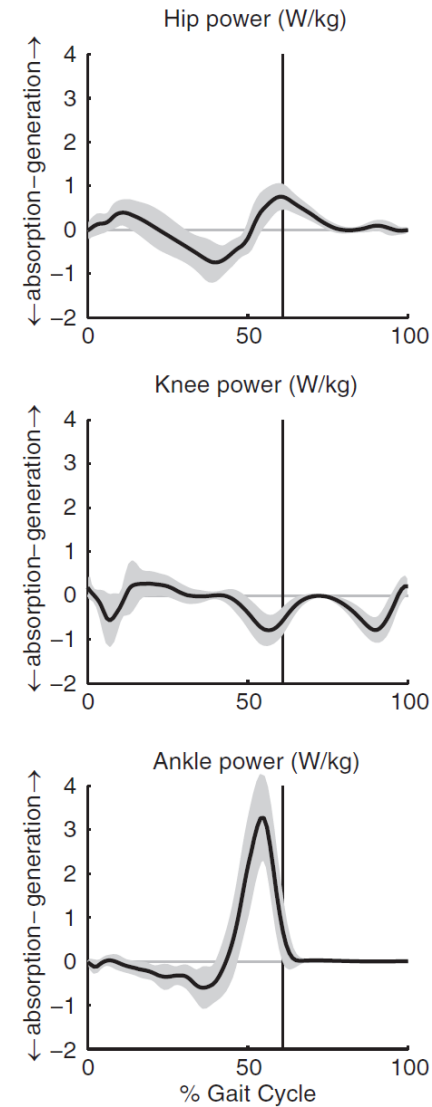
ANGLES



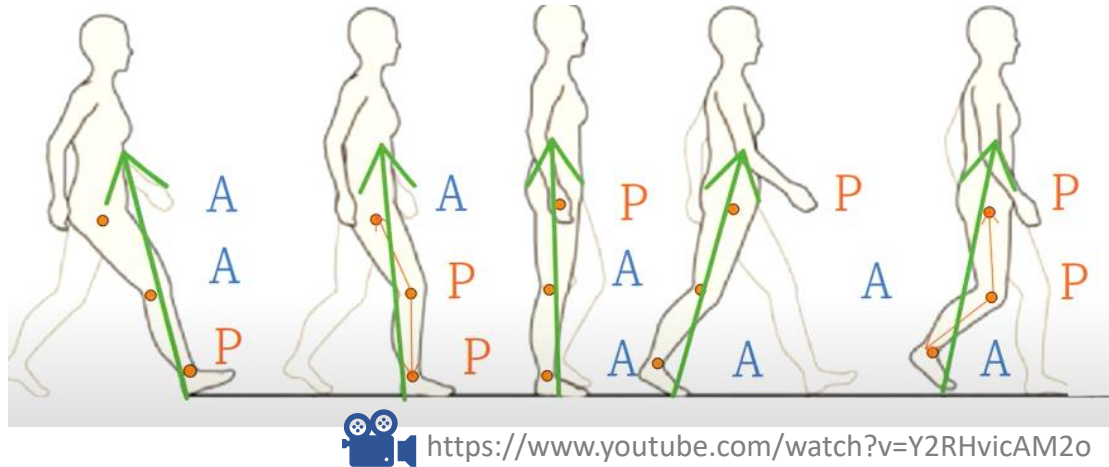
MOMENTS



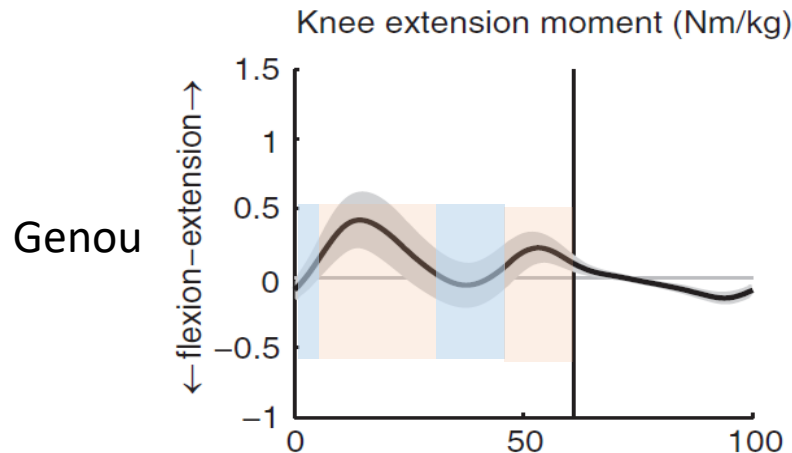
PUISSANCES



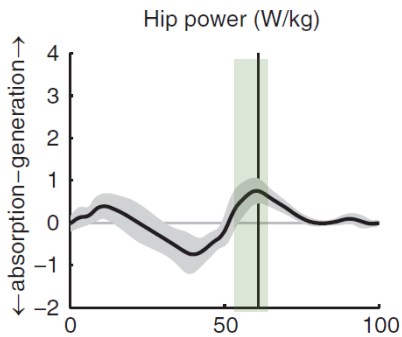
Moments internes (plan sagittal - genou)



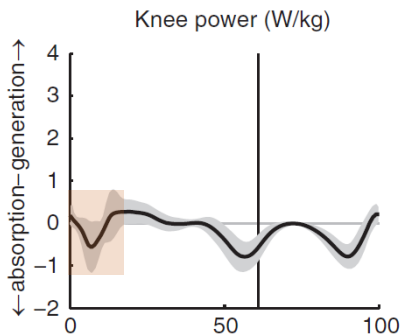
- Moment interne **fléchisseur** si force de réaction passe en **AVANT** du centre articulaire
- Moment interne **extenseur** si force de réaction est **POSTERIEUR** au centre articulaire



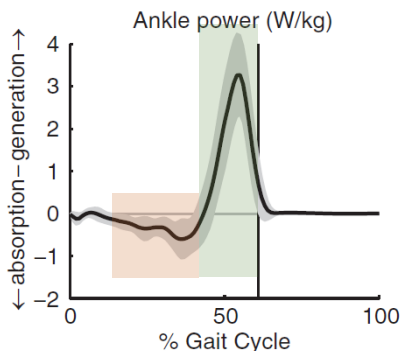
Puissances



- Génération d'énergie en fin d'appui pour aider à la propulsion par les fléchisseurs de hanche



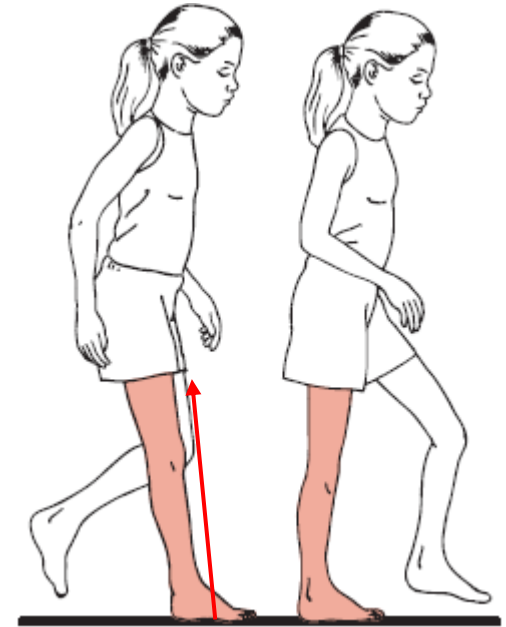
- Absorption d'énergie en début d'appui par le quadriceps en lien avec le rôle d'amortisseur du genou



Absorption d'énergie en milieu d'appui par le triceps puis principale génération d'énergie à la marche en fin d'appui pour la propulsion

Faiblesse du quadriceps

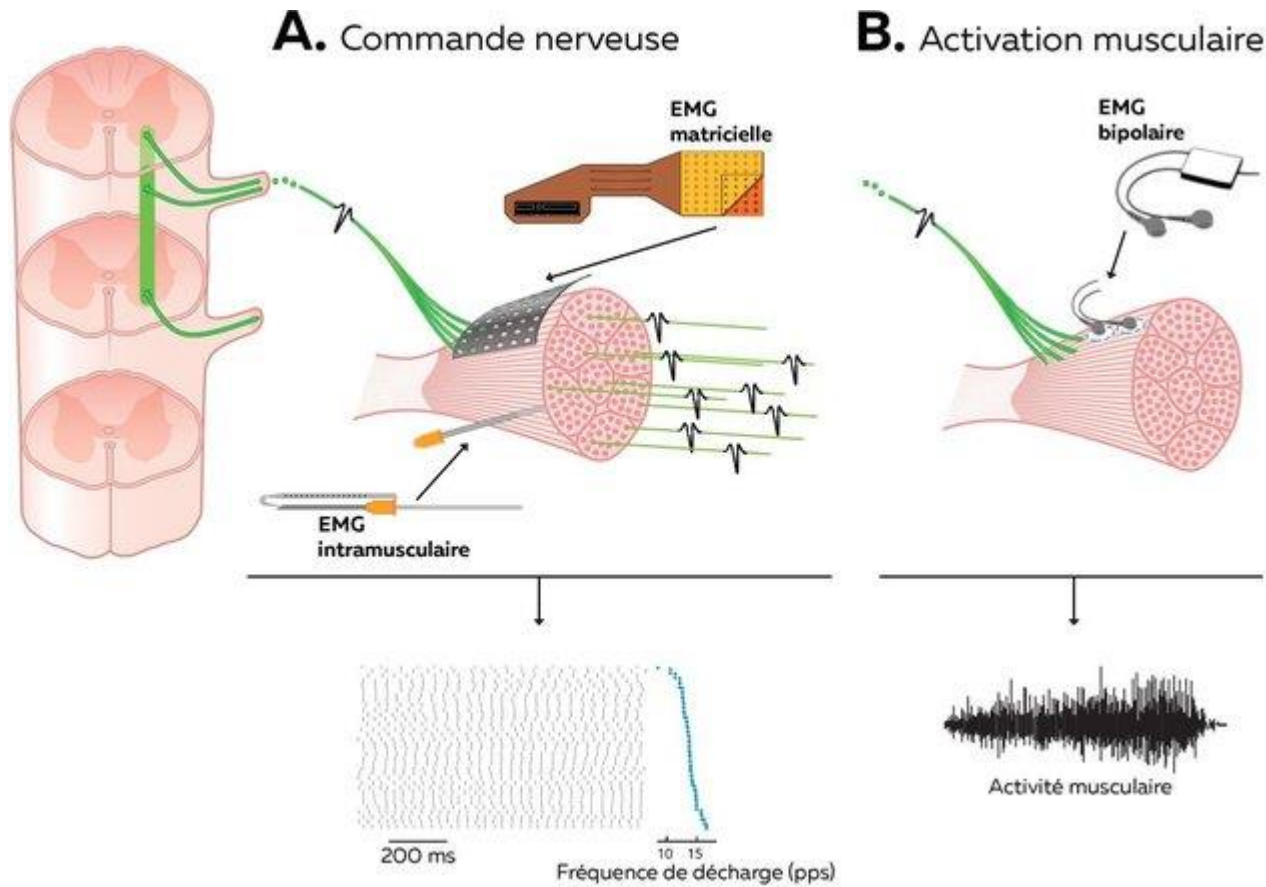
- Marche en hyperextension du genou
 - Garde le genou en extension en phase d'appui unipodal pour éviter un «lâchage du genou»
 - Flexion du tronc vers l'avant
 - Amène la force de réaction du sol en avant du genou



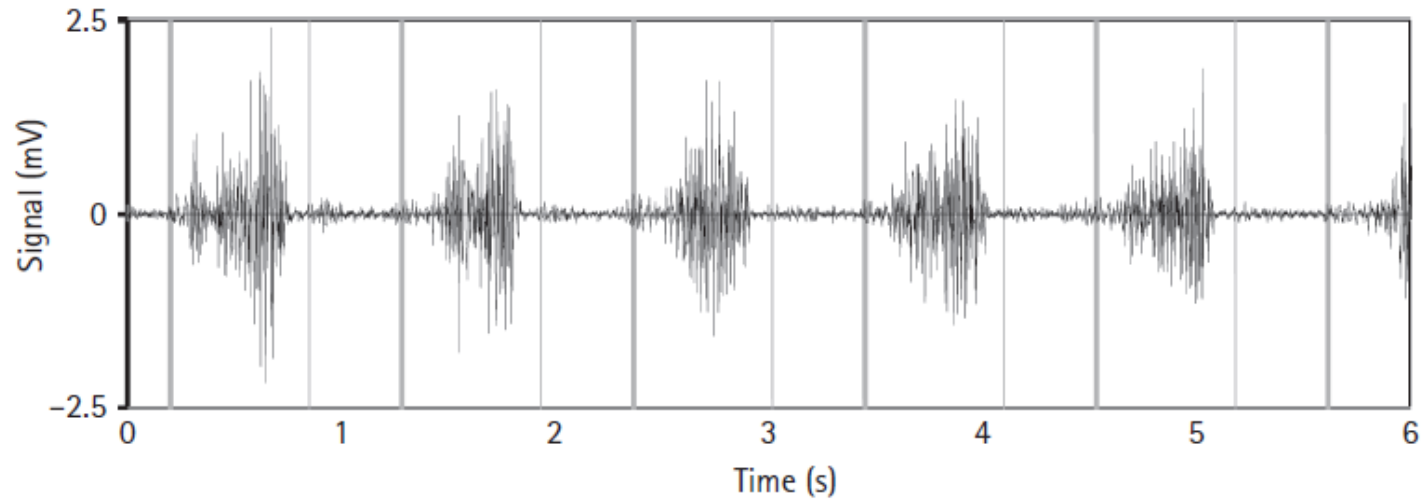
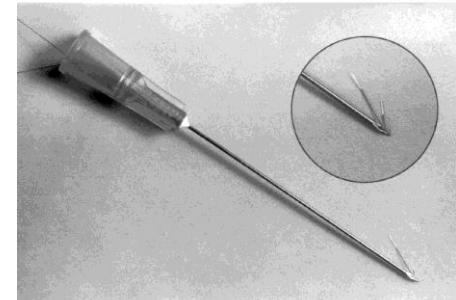
Plan

- De l'équilibre à la marche
- La marche
 - Cycle de marche
 - Paramètres spatio-temporels
 - Cinématique
 - Cinétique
 - **Activité musculaire**
 - Energie
 - Déterminants de la marche
 - Analyse Quantifiée de la Marche
- La course
 - Cycle de course
 - Paramètres spatio-temporels
 - Cinématique
 - Cinétique
 - Energie

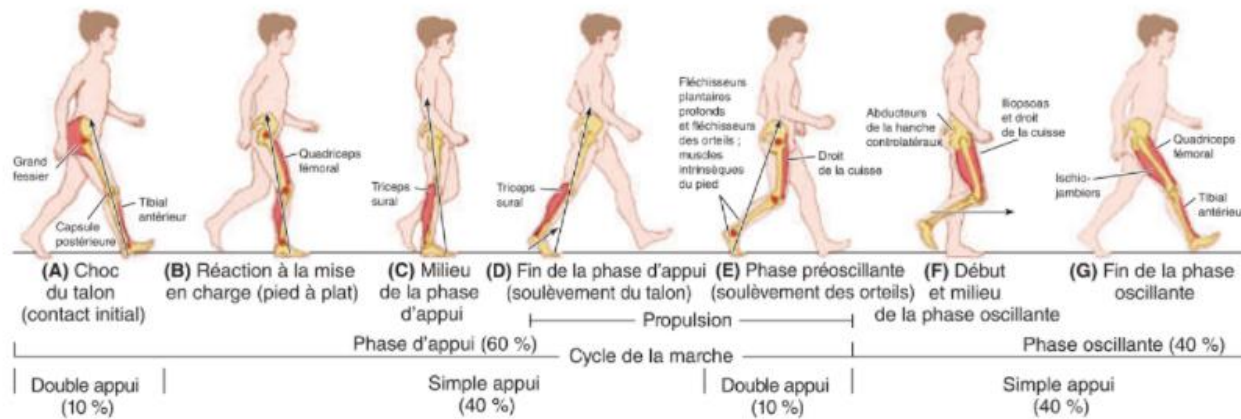
Electromyographie



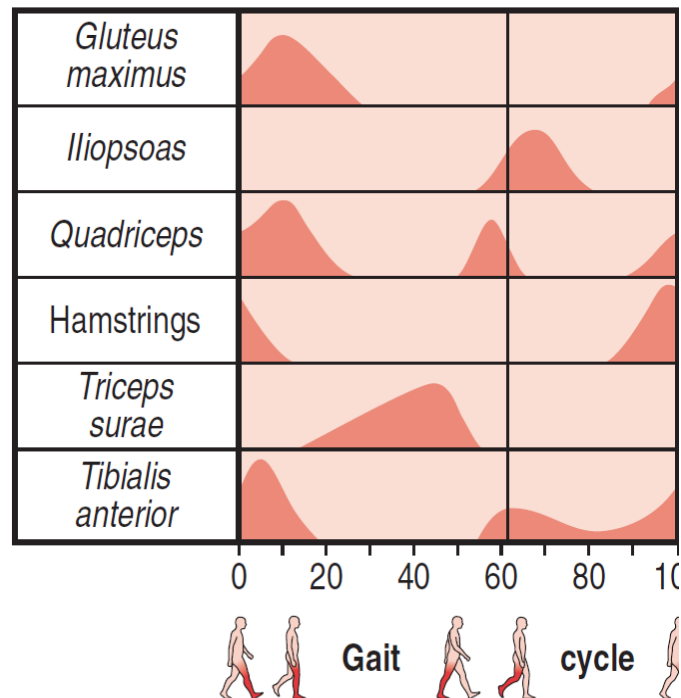
Electromyographie



Activité musculaire



Electromyography



Activité musculaire

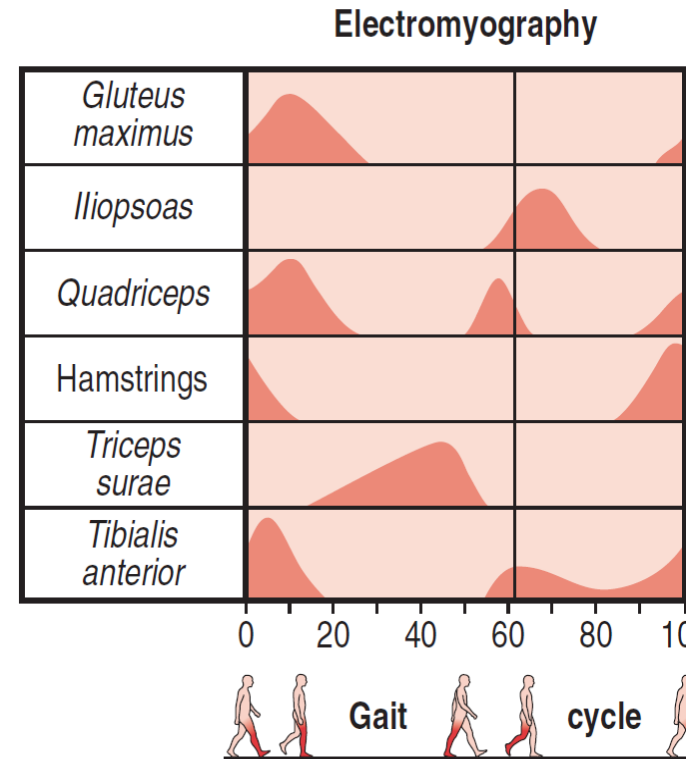
	Phase de la marche	Objectifs mécaniques	Groupes musculaires actifs	Exemples
PHASE D'APPUI	Choc du talon (contact initial)	Abaisser l'avant-pied vers *le sol	Fléchisseurs dorsaux de la cheville (contraction excentrique)	Tibial antérieur
		Continuer à décélérer (inverser l'oscillation vers l'avant)	Extenseurs de la hanche	Grand fessier
		Maintenir l'arche longitudinale du pied	Muscles intrinsèques du pied Longs tendons du pied	Court fléchisseur des orteils Tibial antérieur
	Réaction à la mise en charge (pied à plat)	Recevoir le poids du corps	Extenseurs du genou	Quadriceps
		Décélérer (ralentir la flexion dorsale)	Fléchisseurs plantaires de la cheville	Triceps sural (soléaire et gastrocnémien)
		Stabiliser le bassin	Abducteurs de la hanche	Moyen et petit fessiers, tenseur du fascia lata
		Maintenir l'arche longitudinale du pied	Muscles intrinsèques du pied Tendons longs du pied	Court fléchisseur des orteils Tibial postérieur ; longs fléchisseurs des orteils
	Milieu de la phase d'appui	Stabiliser le genou	Extenseurs du genou	Quadriceps
		Contrôler la flexion dorsale (conserver le moment cinétique)	Fléchisseurs plantaires de la cheville (contraction excentrique)	Triceps sural (soléaire et gastrocnémien)
		Stabiliser le bassin	Abducteurs de la hanche	Moyen et petit fessiers, tenseur du fascia lata
		Maintenir l'arche longitudinale du pied	Muscles intrinsèques du pied Tendons longs du pied	Court fléchisseur des orteils Tibial postérieur, longs fléchisseurs des orteils
	Fin de la phase d'appui (soulèvement du talon)	Accélérer le corps	Fléchisseurs plantaires de la cheville (contraction concentrique)	Triceps sural (soléaire et gastrocnémien)
		Stabiliser le bassin	Abducteurs de la hanche	Moyen et petit fessiers, tenseur du fascia lata
		Maintenir les arches du pied ; fixer l'avant-pied	Muscles intrinsèques du pied Tendons longs du pied	Adducteur de l'hallux Tibial postérieur ; longs fléchisseurs des orteils

Activité musculaire

	Phase de la marche	Objectifs mécaniques	Groupes musculaires actifs	Exemples
PHASE D'APPUI (suite)	Phase préoscillante (soulèvement des orteils)	Accélérer le corps	Longs fléchisseurs des orteils	Long fléchisseur de l'hallux ; long fléchisseur des orteils
		Maintenir les arches du pied ; fixer l'avant-pied	Muscles intrinsèques du pied	Adducteur de l'hallux
			Tendons longs du pied	Tibial postérieur ; longs fléchisseurs des orteils
		Décélérer la cuisse ; préparer l'oscillation	Fléchisseurs de la hanche (contraction excentrique)	Iliopsoas ; droit de la cuisse
PHASE OSCILLANTE	Début de l'oscillation	Accélérer la cuisse ; varier la cadence	Fléchisseurs de la hanche (contraction concentrique)	Iliopsoas ; droit de la cuisse
		Lever le pied	Fléchisseurs dorsaux de la cheville	Tibial antérieur
	Milieu d'oscillation	Lever le pied	Fléchisseurs dorsaux de la cheville	Tibial antérieur
	Fin de l'oscillation	Décélérer la cuisse	Extenseurs de la hanche (contraction excentrique)	Grand fessier ; ischio-jambiers
		Décélérer la jambe	Fléchisseurs du genou (contraction excentrique)	Ischio-jambiers
		Positionner le pied	Fléchisseurs dorsaux de la cheville	Tibial antérieur
		Etendre le genou pour placer le pied (contrôler l'enjambée) ; préparer le contact	Extenseurs du genou	Quadriceps

Activité musculaire

- Grand fessier
 - Extension de la hanche
- Quadriceps
 - Amortissement en phase d'appui (freine la flexion)
- Moyen fessier (et le tenseur du fascia lata)
 - stabilisation latérale du bassin (appui unipodal)
- Triceps sural
 - propulsion en fin de phase d'appui
- Iliopsoas
 - flexion de hanche en phase oscillante
- Tibial antérieur
 - relève le pied en phase oscillante et contrôle l'abaissement du pied en début d'appui
- Ischiojambiers
 - freine l'extension de genou en phase oscillante
 - contribue à l'extension de hanche en début d'appui



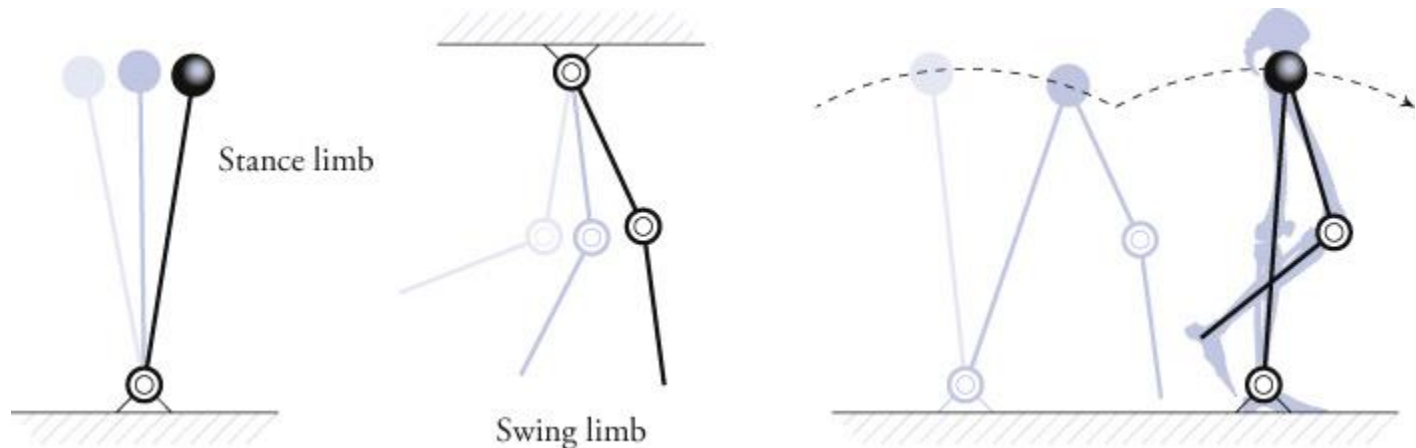
Kirtley, Clinical Gait Analysis, 2006

Plan

- De l'équilibre à la marche
- La marche
 - Cycle de marche
 - Paramètres spatio-temporels
 - Cinématique
 - Cinétique
 - Activité musculaire
 - Energie
 - Déterminants de la marche
 - Analyse Quantifiée de la Marche
- La course
 - Cycle de course
 - Paramètres spatio-temporels
 - Cinématique
 - Cinétique
 - Energie

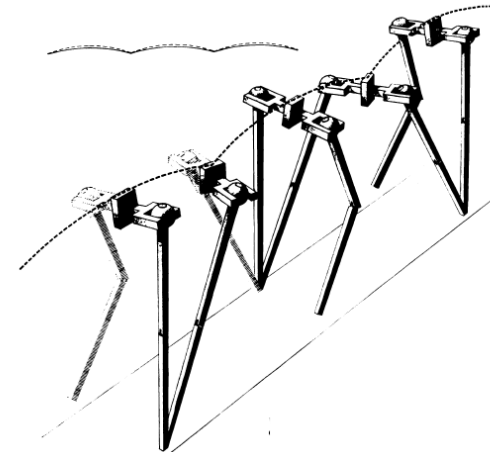
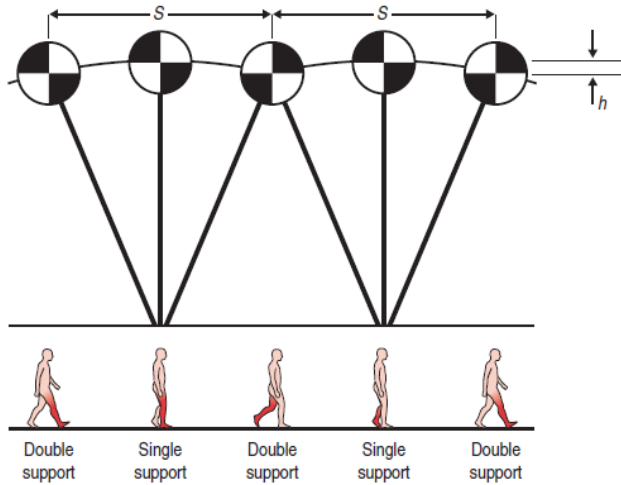
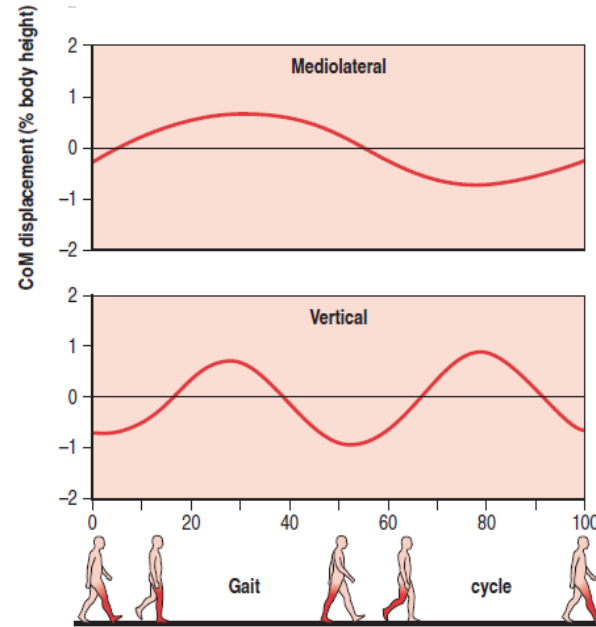
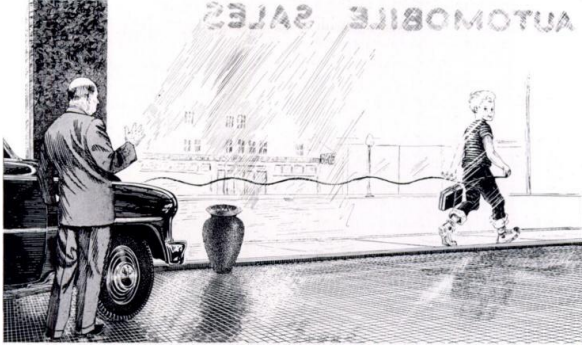
Modélisation simple

- Simple pendule (phase d'appui)
- Double pendule (phase oscillante)



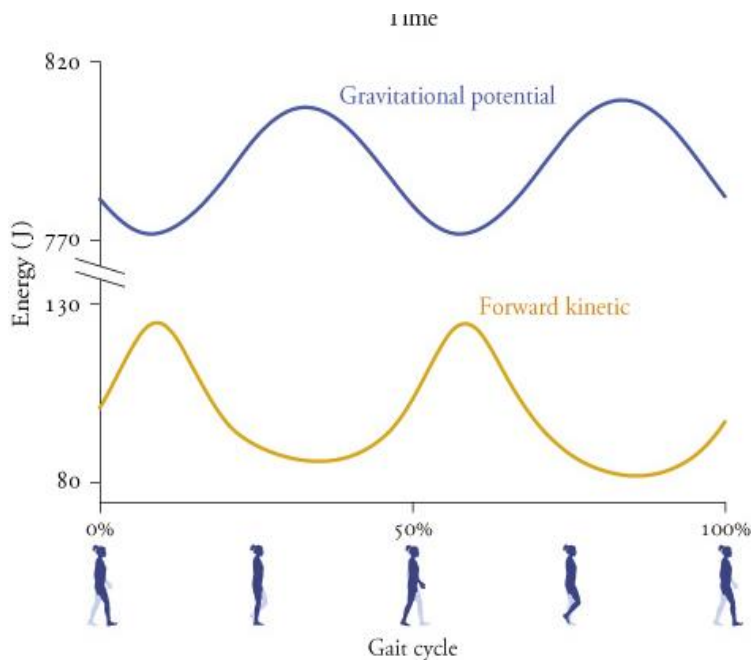
Uchida et al., *Biomechanics of Movement*, 2020

Mouvement du centre de gravité

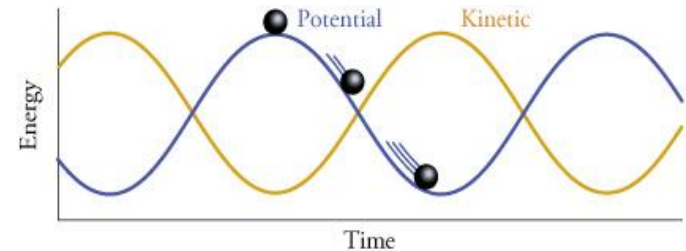
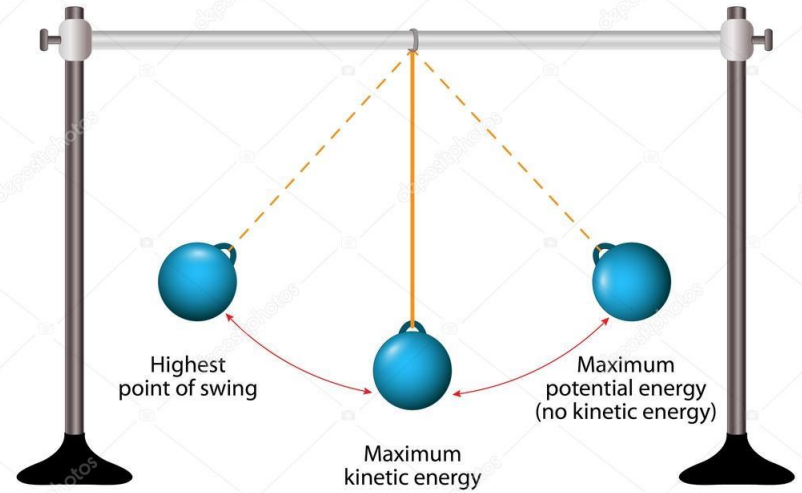


Transfert d'énergie

- Energie totale = $E_p + E_c$
- E_p : Energie potentielle : mgh
- E_c : Energie cinétique : $\frac{1}{2} mv^2$
- Travail : Force x déplacement



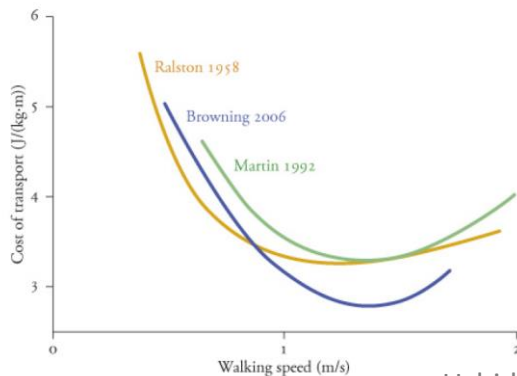
Conservation of energy



Uchida et al., *Biomechanics of Movement*, 2020

Relation vitesse – coût énergétique

- Coût énergétique de la locomotion : énergie consommée par unité de distance parcourue



Uchida et al., *Biomechanics of Movement*, 2020

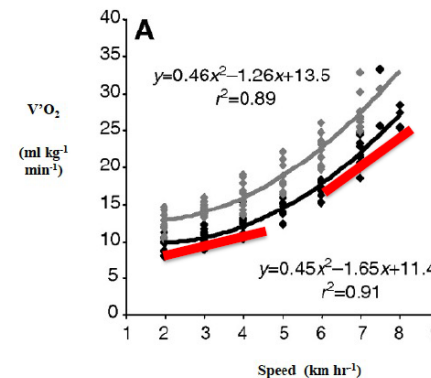
■ COUT ENERGETIQUE

$$C = \Delta VO_2 / \Delta v$$

C – Coût énergétique ($L \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)

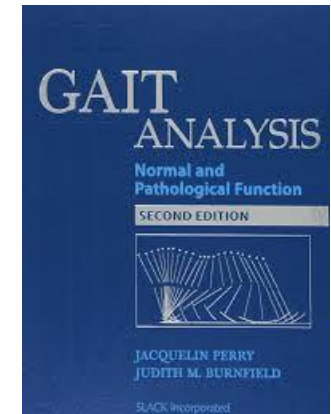
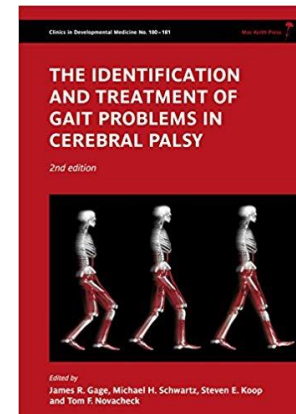
VO_2 – Consommation oxygène ($L \cdot \text{min}^{-1}$)

v – vitesse ($\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$ ou $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)

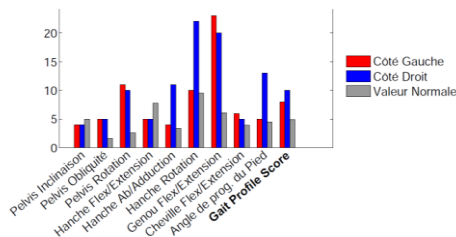
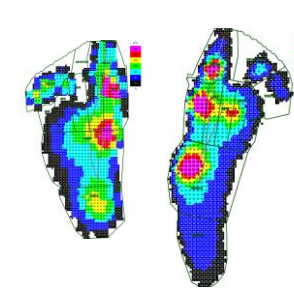
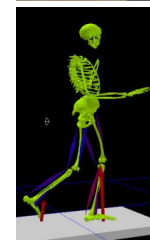
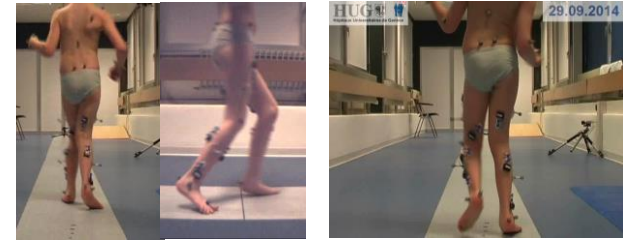
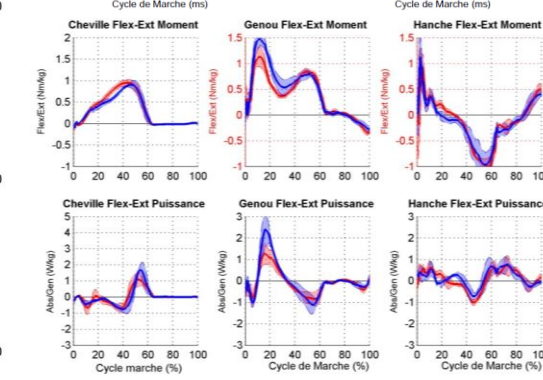
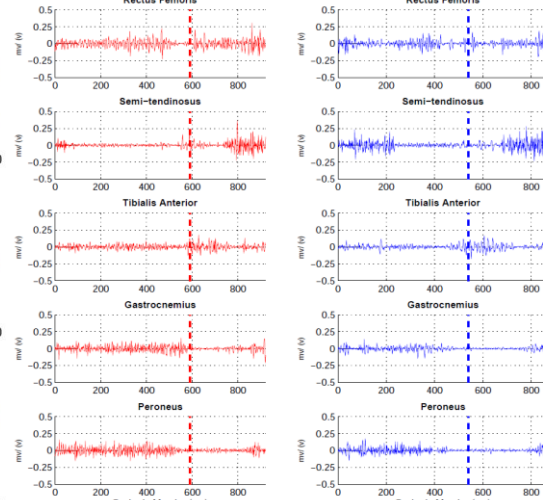
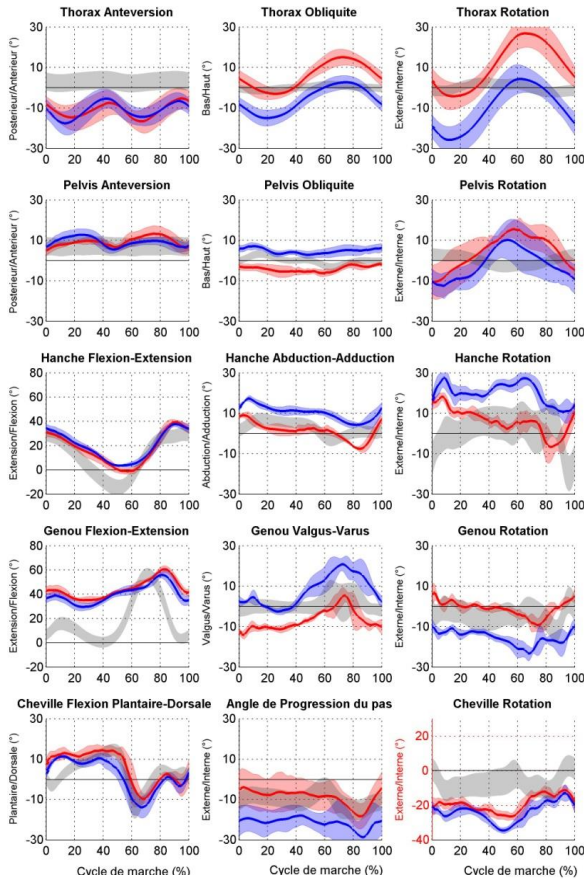
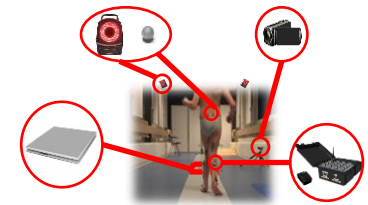


Déterminants de la marche

- Stabilité en position debout
- Conservation d'énergie
- Passage du pied en phase oscillante
- Pré-positionnement du pied avant l'impact du pied
- Bonne propulsion
- Longueur de pas adéquate



Analyse Quantifiée de la Marche

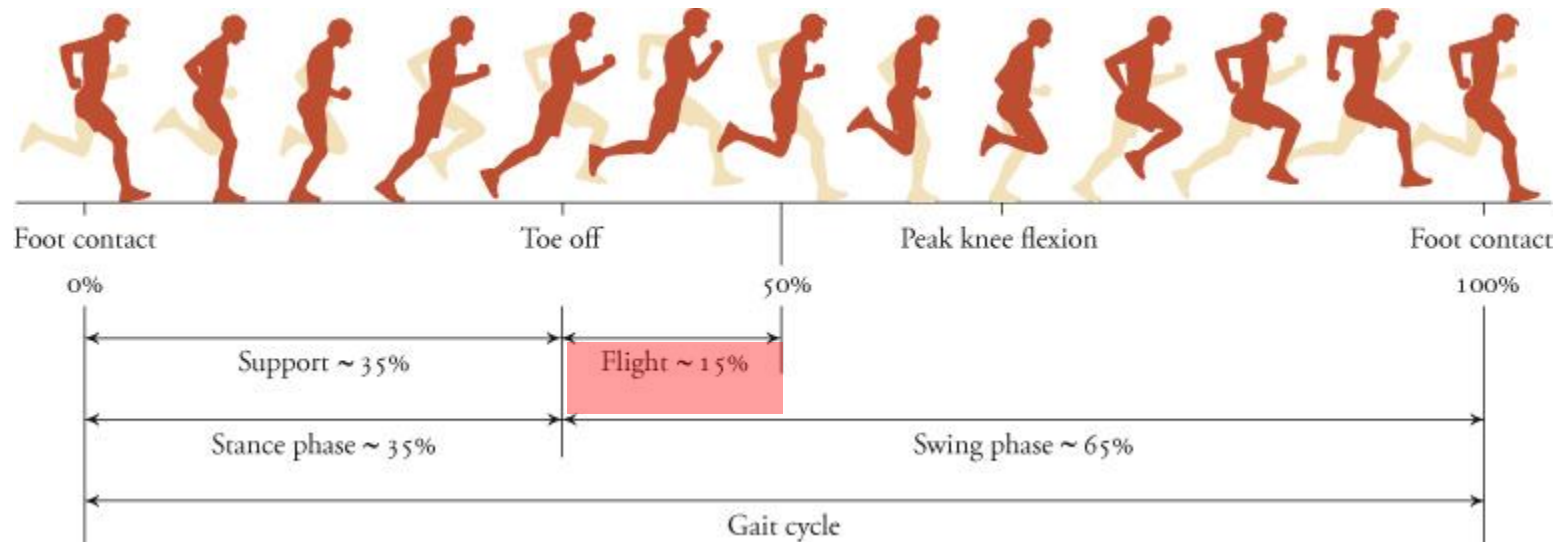


PARAMETRES	Gauche	Droite
Vitesse de marche	0.82 ± 0.15 m/s	0.84 ± 0.15 m/s
Cadence	131.69 ± 14.99 pas/min	133.37 ± 14.39 pas/min
Longueur du pas	0.32 ± 0.03 m	0.44 ± 0.05 m
Largeur du pas	0.16 ± 0.04 m	0.11 ± 0.05 m
Phase d'appui	65.96 ± 3.65 %	63.49 ± 3.1 %
Durée du pas	0.43 ± 0.06 s	0.48 ± 0.05 s
Durée d'un cycle	0.92 ± 0.11 s	0.91 ± 0.11 s
Longueur d'un cycle	0.75 ± 0.06 m	0.76 ± 0.06 m
Simple appui	36.66 ± 2.58 %	33.94 ± 3.41 %
Double appui	30.26 ± 5.36 %	30.12 ± 3.29 %

Plan

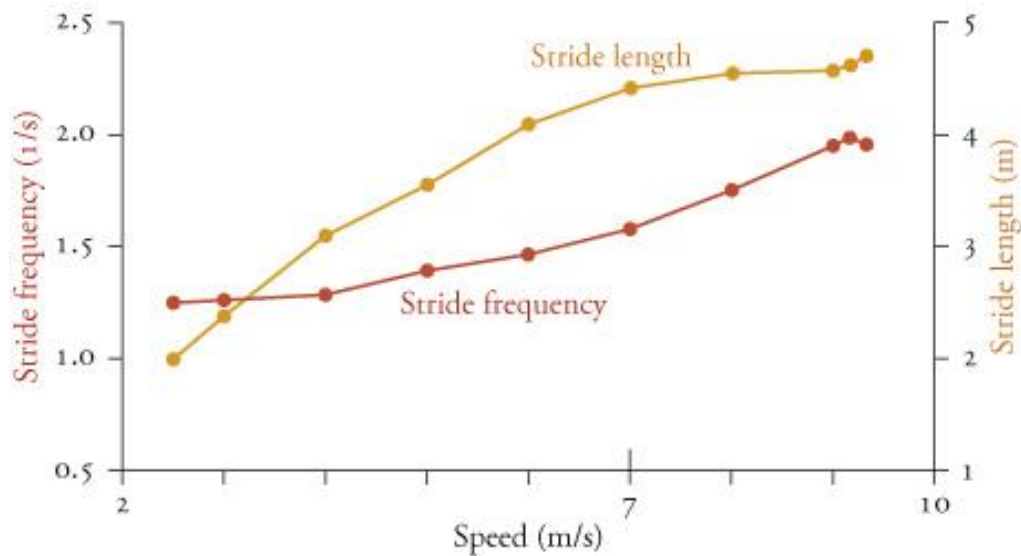
- De l'équilibre à la marche
- La marche
 - Cycle de marche
 - Paramètres spatio-temporels
 - Cinématique
 - Cinétique
 - Activité musculaire
 - Energie
 - Déterminants de la marche
 - Analyse Quantifiée de la Marche
- La course
 - Cycle de course
 - Paramètres spatio-temporels
 - Cinématique
 - Cinétique
 - Energie

Cycle de course

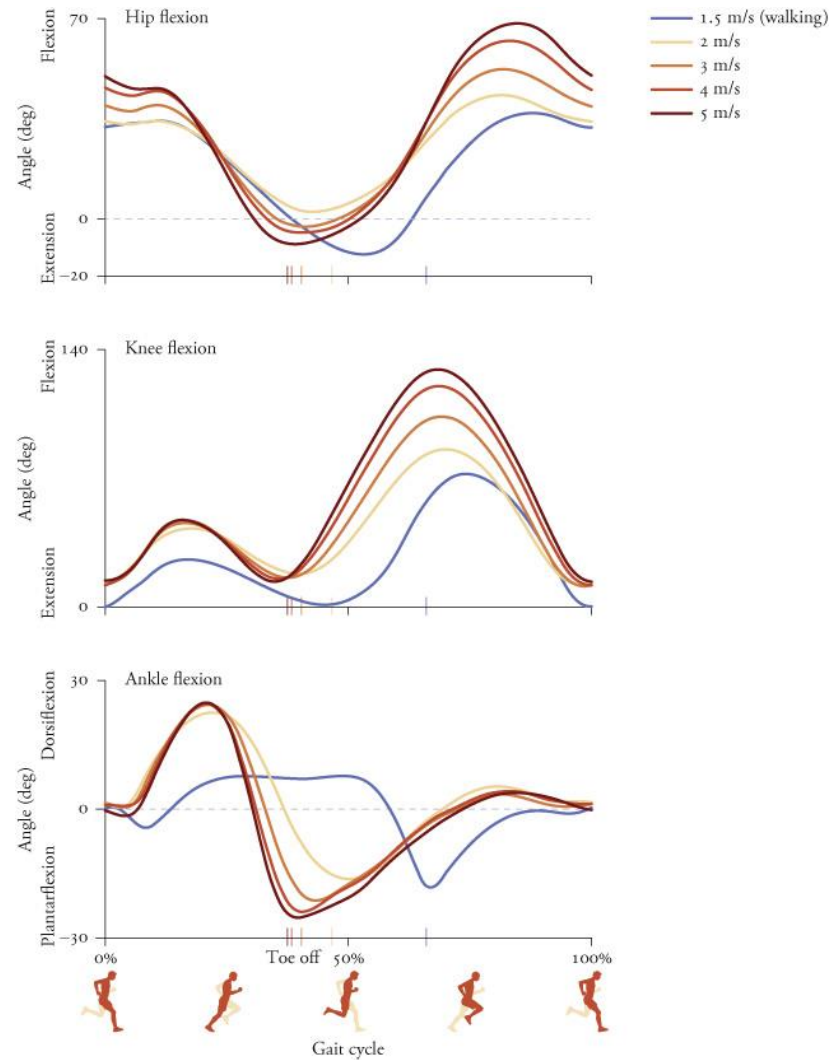


Uchida et al., *Biomechanics of Movement*, 2020

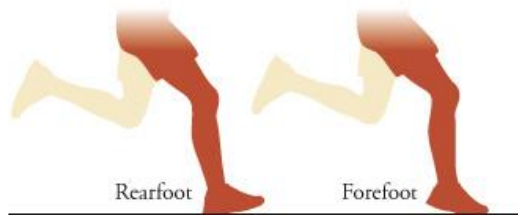
Paramètres spatio-temporels de la course



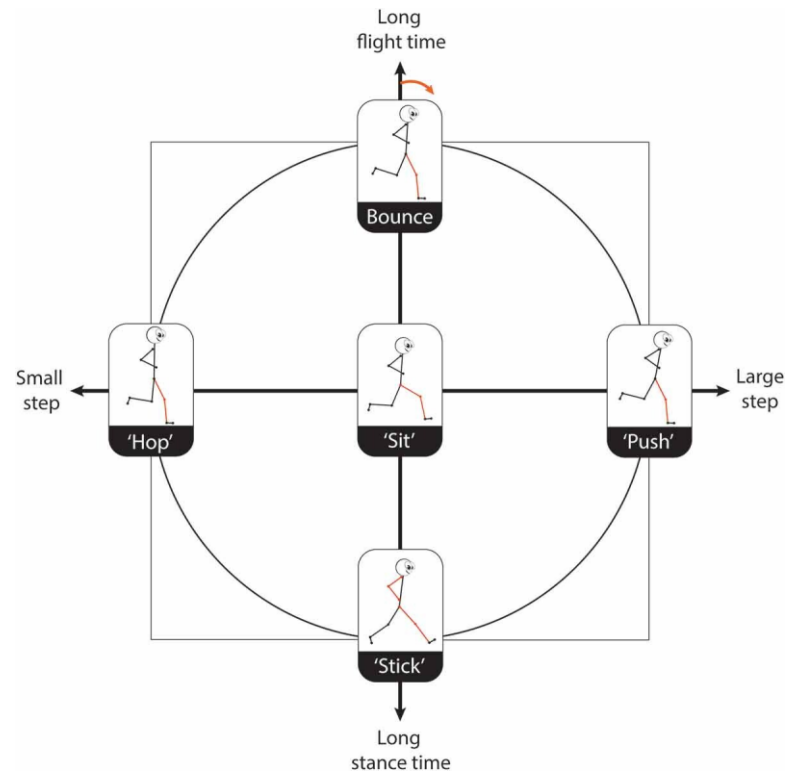
Cinématique de la course



Patterns de course



Uchida et al., *Biomechanics of Movement*, 2020



SPORTS BIOMECHANICS
2024, VOL. 23, NO. 4, 516-554
<https://doi.org/10.1080/14763141.2021.1873411>

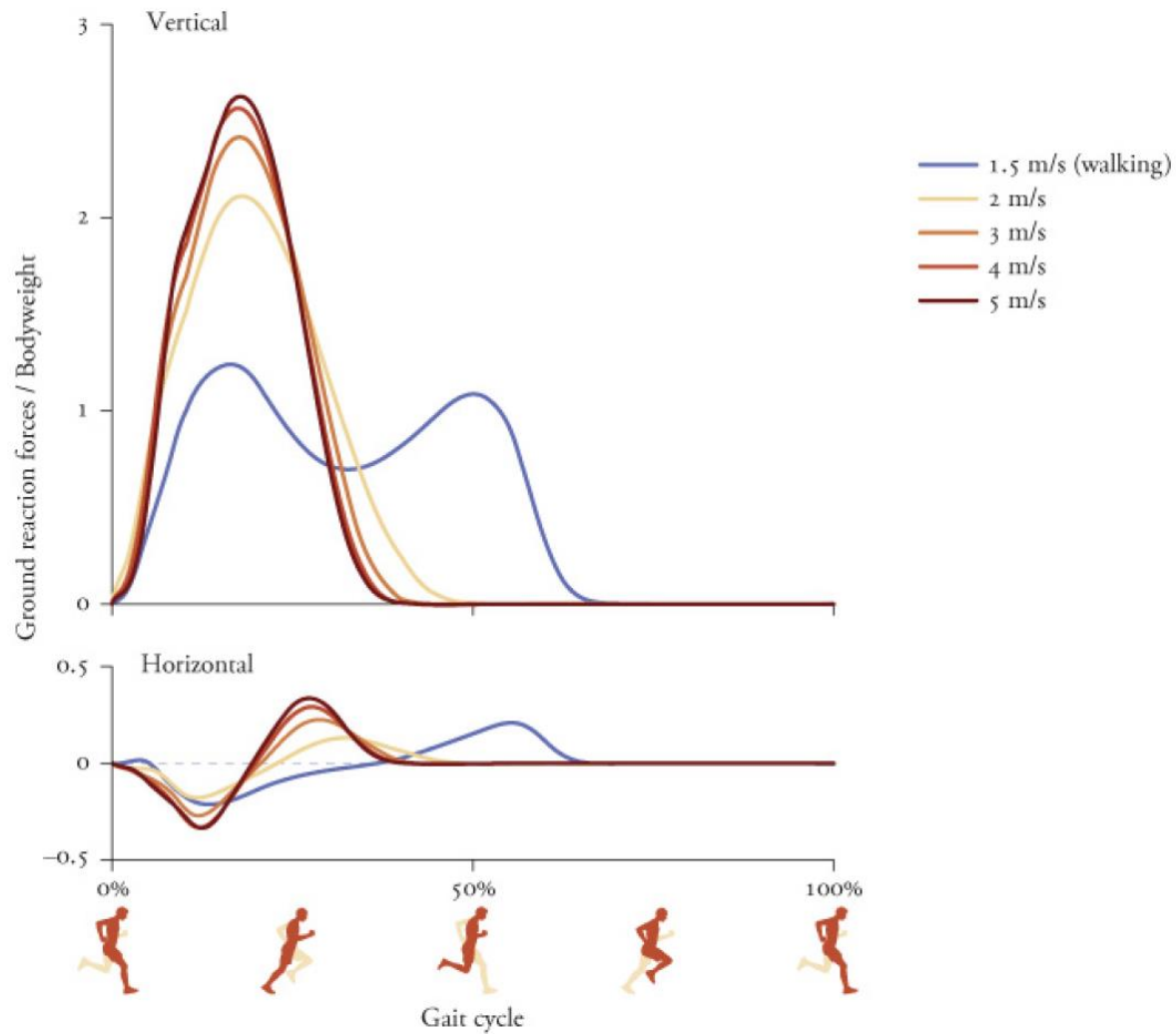
 **Routledge**
Taylor & Francis Group

 OPEN ACCESS  Check for updates

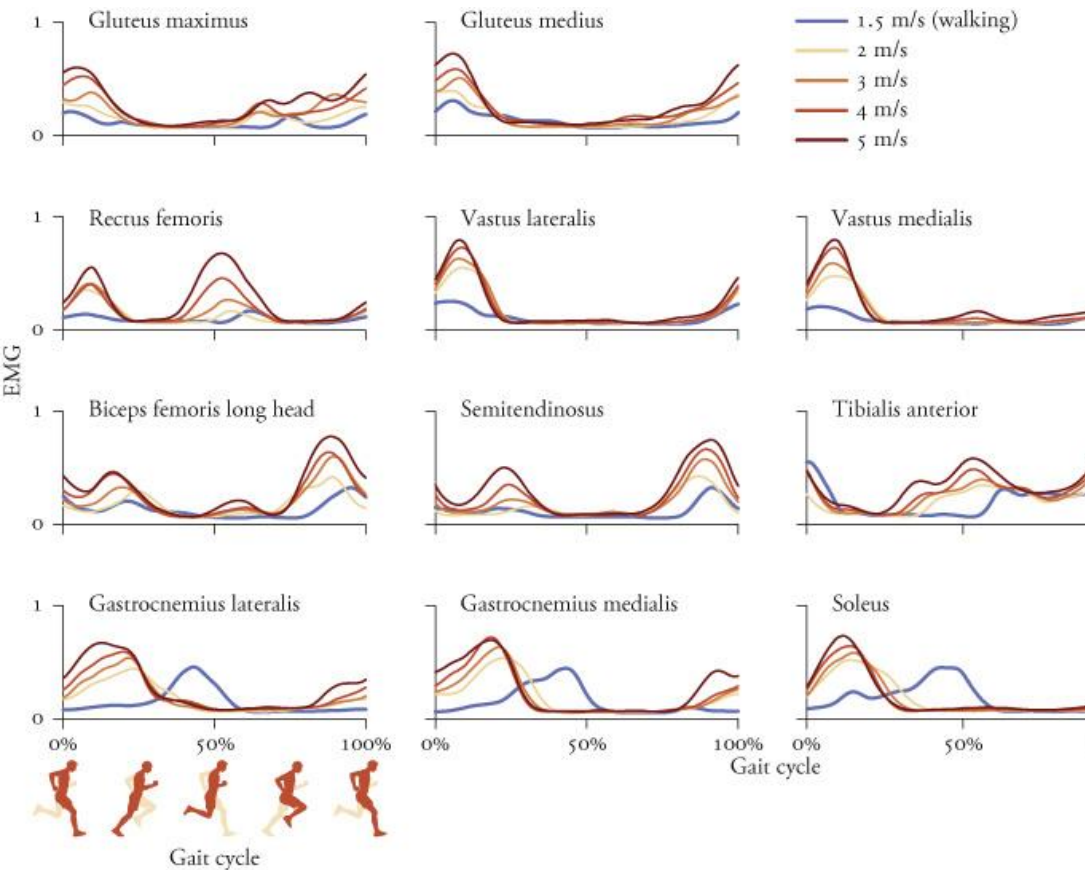
The biomechanics of running and running styles: a synthesis

Ben T. van Oeveren , Cornelis J. de Ruiter , Peter J. Beek 
and Jaap H. van Dieën 

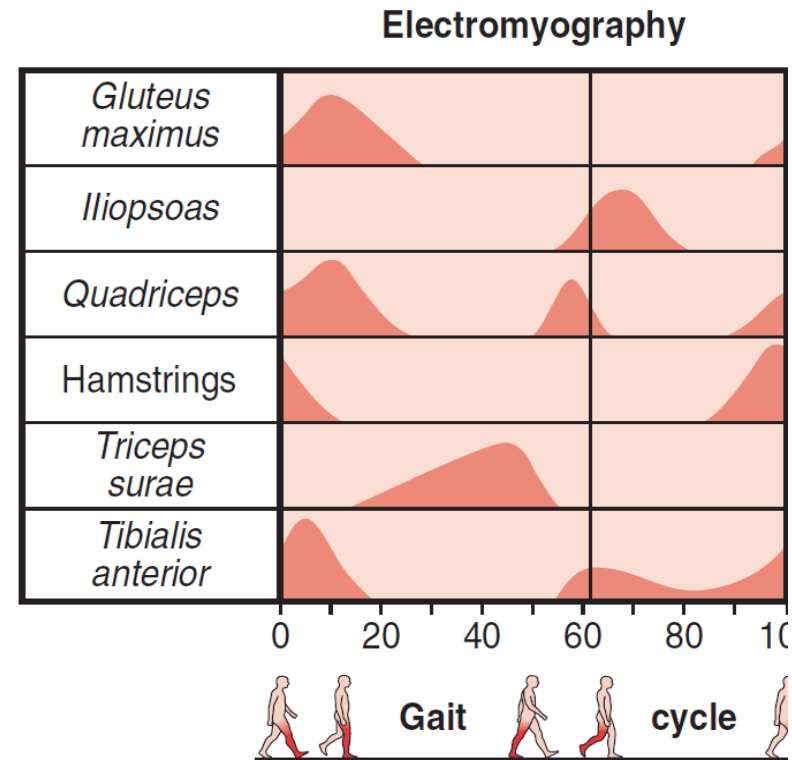
Cinétique de la course



Activité musculaire



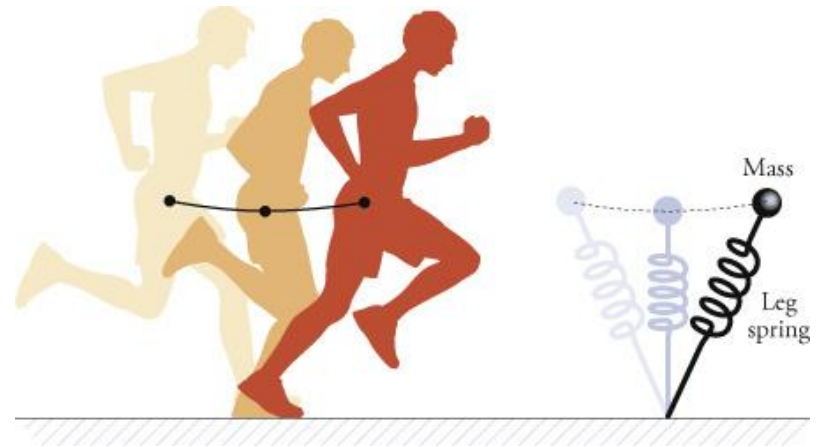
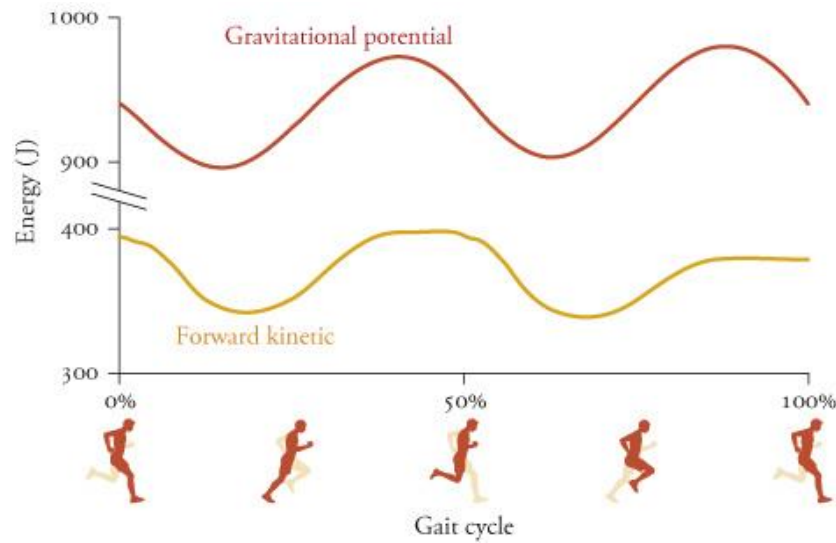
COURSE



MARCHE

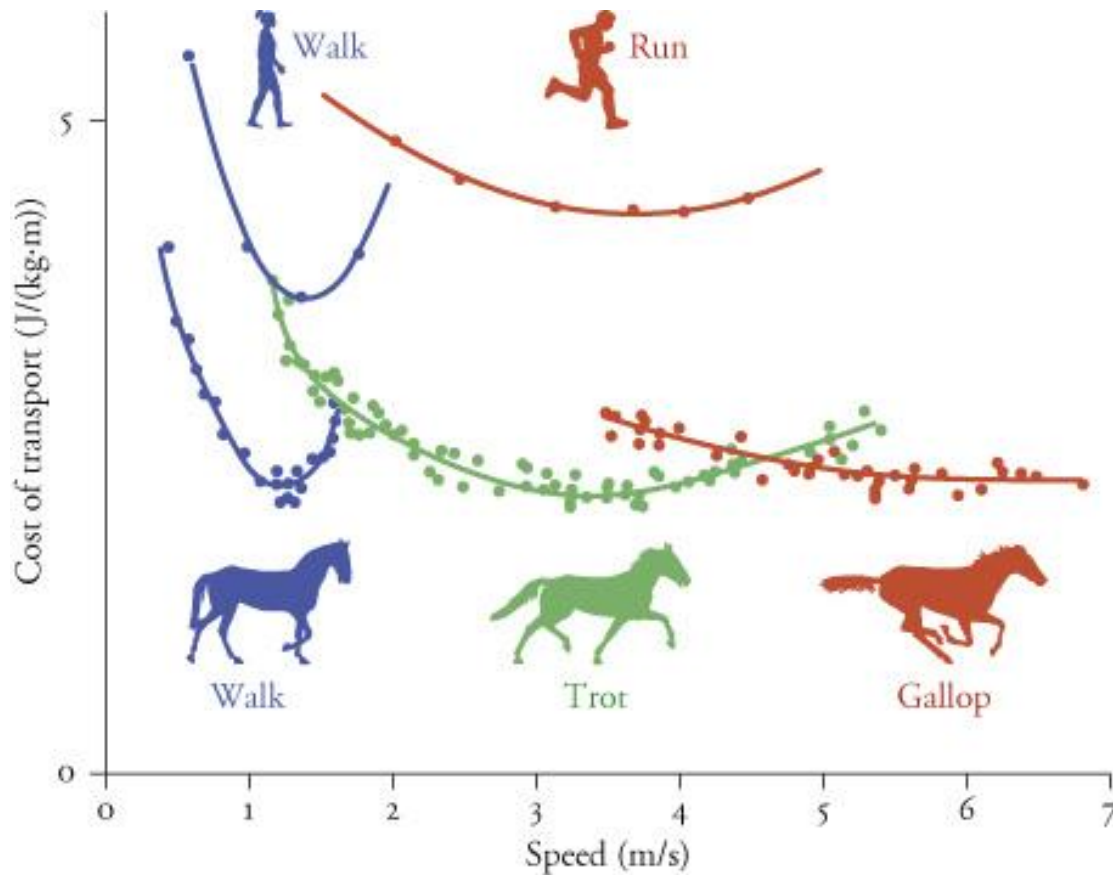
Uchida et al., *Biomechanics of Movement*, 2020

Modèle simple de la course



Uchida et al., *Biomechanics of Movement*, 2020

Coût énergétique



Uchida et al., *Biomechanics of Movement*, 2020



Uchida et al., *Biomechanics of Movement*, 2020

Speakup

- <https://web.speakup.info/room/join/92645>

