

Locomotion et Activités Physiques

Biomécanique du membre inférieur

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**

- Anatomie – JY. Beaulieu

<https://moodle.unige.ch/course/view.php?id=3926>



- **Speakup**

<https://web.speakup.info/room/join/69890>



- **Quiz - Pingo**

pingo.coactum.de → 883735



- **Rappels**

Notions déjà abordées dans un autre cours



Objectifs

- Comprendre les concepts de biomécanique associés au système musculo-squelettique
- Connaître les outils d'évaluation du mouvement et de la force
- Appliquer les concepts biomécaniques au membre inférieur
- Connaître les fonctions du membre inférieur pour la locomotion

Plan

- Biomécanique
 - Définition
 - Le mouvement
 - Caractérisation
 - Cinématique
 - Mesure
 - Les forces
 - Caractérisation
 - Cinétique
 - Mesure
- Biomécanique du membre inférieur
 - Hanche (bassin)
 - Genou
 - Cheville (pied)

Biomécanique

- **Définition**

- Application des principes de la mécanique dans le domaine de la biologie

- **Grands domaines**

- **Comportement des corps solides**
 - **Système musculo-squeletique**
- **Comportement des liquides**
 - **Système vasculaire/cérébral**
- **Comportement des gaz**
 - **Système respiratoire**



Biomécanique

- **Système musculo-squelettique**

- Cinématique
 - Etude du mouvement
- Cinétique
 - Etude des causes qui engendrent le mouvement
- Contrôle neuromusculaire
 - Régulation et organisation du mouvement
- Mécaniques des corps déformables
 - Déformation des tissus biologiques

- **Finalités**

- Comprendre le fonctionnement et les dysfonctionnements du système (neuro)-musculo-squelettique
- Déduire les attitudes thérapeutiques

Plan

- Biomécanique

- Définition

- Le mouvement

- Caractérisation
 - Cinématique
 - Mesure

- Les forces

- Caractérisation
 - Cinétique
 - Mesure

- Biomécanique du membre inférieur

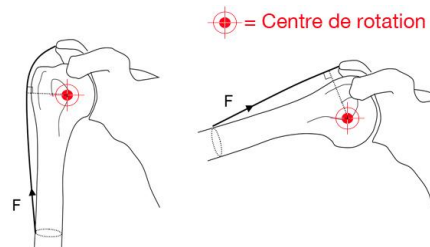
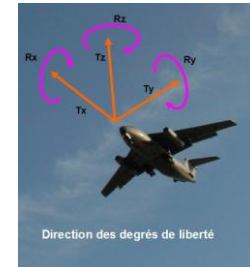
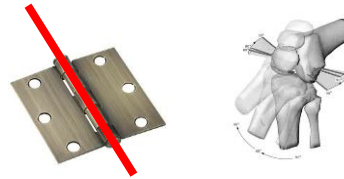
- Hanche (bassin)
 - Genou
 - Cheville (pied)

Mouvement – Définition

- **Mouvement** : action de se mouvoir, de changer de position du corps ou d'une de ses parties

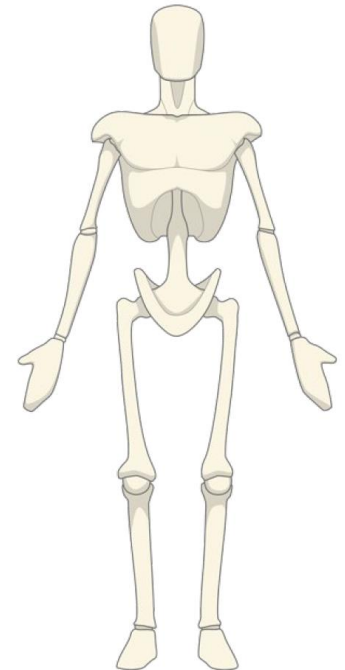
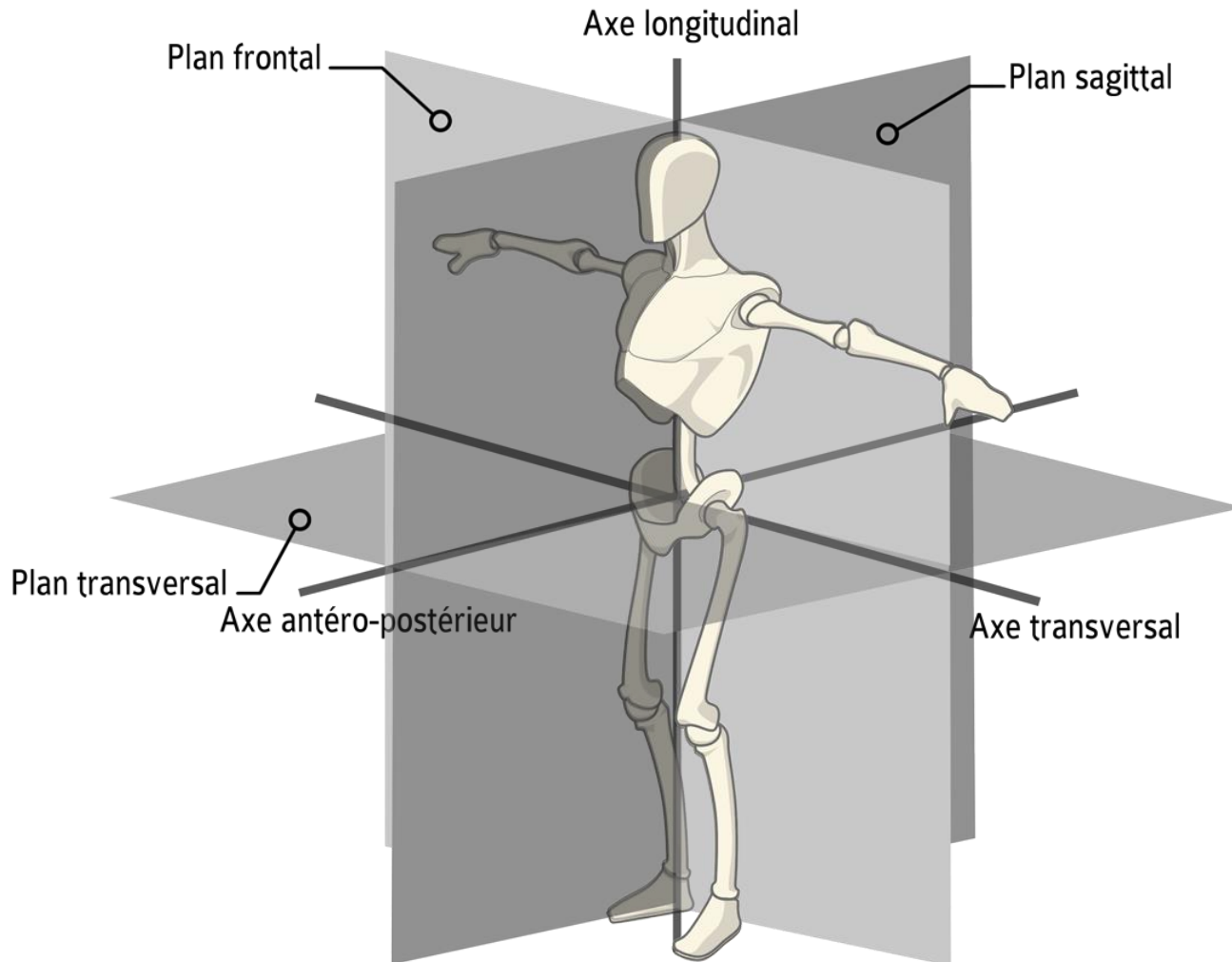
- **Type et degré de liberté**

- Translation (3DDL)
 - Le long d'un axe
- Rotation (3DDL)
 - Autour d'un axe
 - Autour d'un point





Mouvement – Plans et Axes



Position anatomique de référence

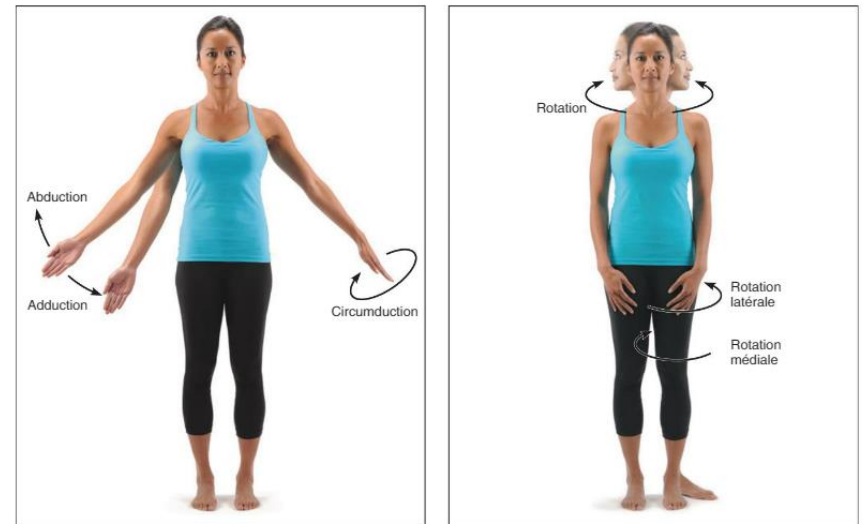


Mouvements articulaires principaux

- Flexion/Extension
 - Plan sagittal
 - Axe transversal
- Abduction/Adduction
 - Plan frontal
 - Axe antéro-postérieur
- Rotation
 - Plan transversal
 - Axe longitudinal/vertical



(d) Mouvements angulaires : flexion, extension et hyperextension de l'épaule et du genou



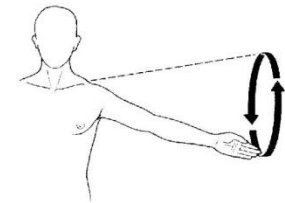
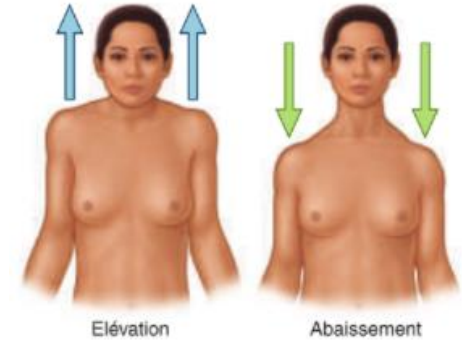
(e) Mouvements angulaires : abduction, adduction et circumduction du membre supérieur à l'épaule

(f) Rotation de la tête, du cou et du membre inférieur



Mouvements articulaires secondaires

- Élévation/abaissement
- Circumduction
 - Mouvement d'une articulation amenant le membre associé à décrire un cercle

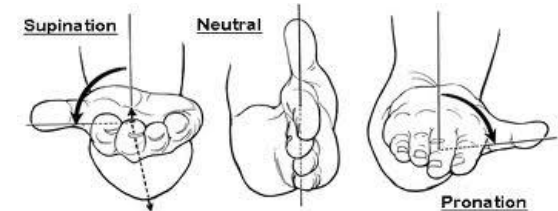




Mouvements articulaires secondaires

- Pronation/Supination

- Pronation : mouvement qui amène la paume de la main orientée vers le bas (rotation médiale)
- Supination : mouvement qui amène la paume de la main orientée vers le haut (rotation latérale)



- Inversion/Eversion

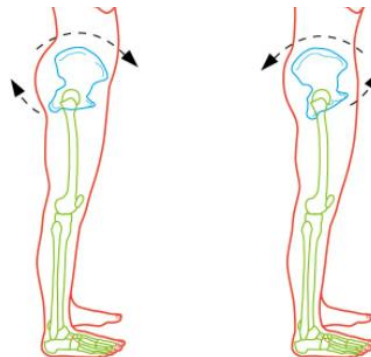
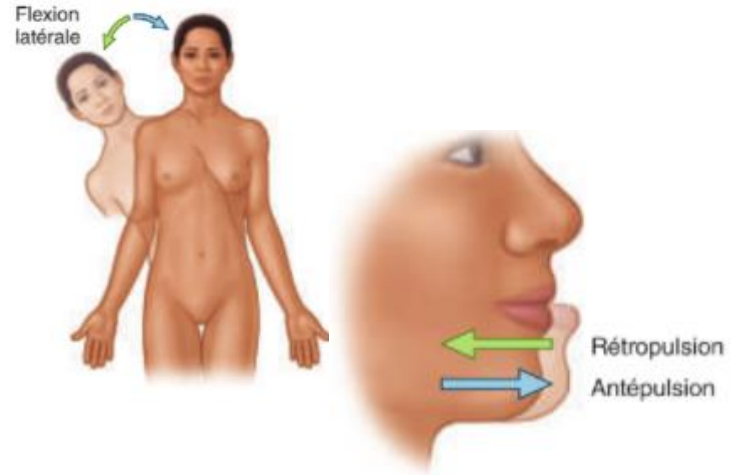
- Inversion : mouvement qui amène la face plantaire médialement (vers l'intérieur)
- Eversion : mouvement qui amène la face plantaire latéralement (vers l'extérieur)





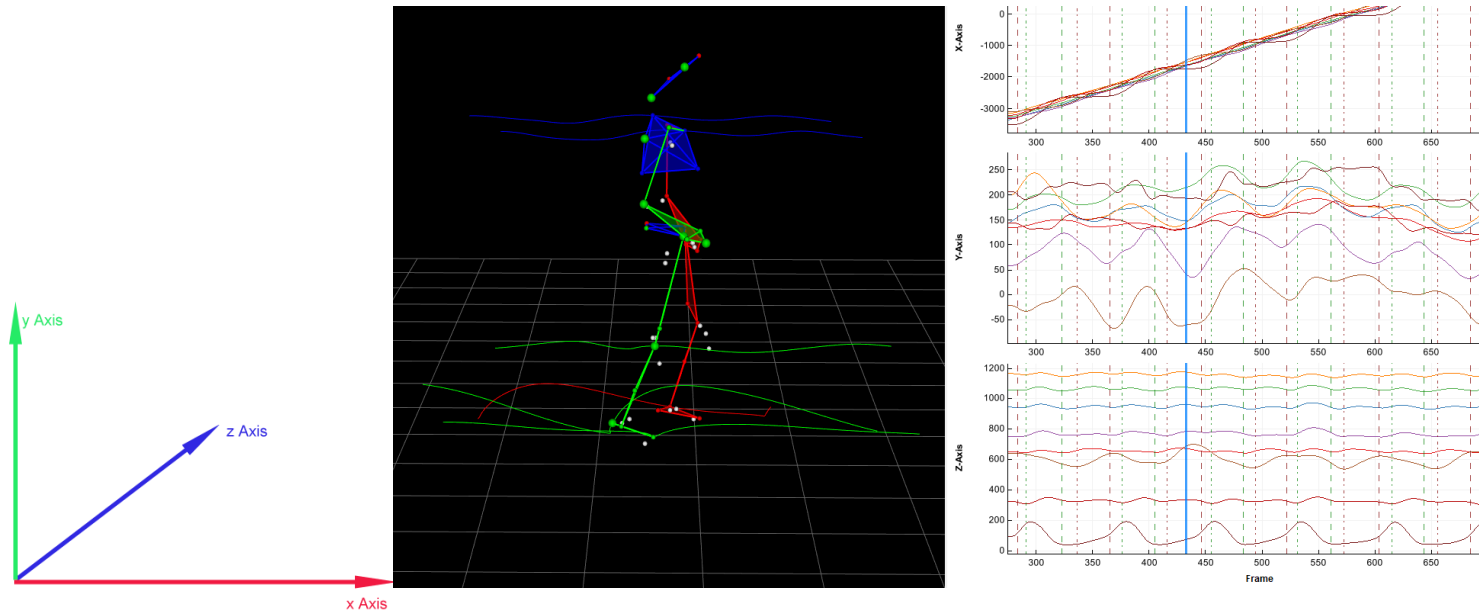
Mouvements articulaires secondaires

- Flexion latérale
- Rétropulsion/antépulsion
- Antéversion / Rétroversion



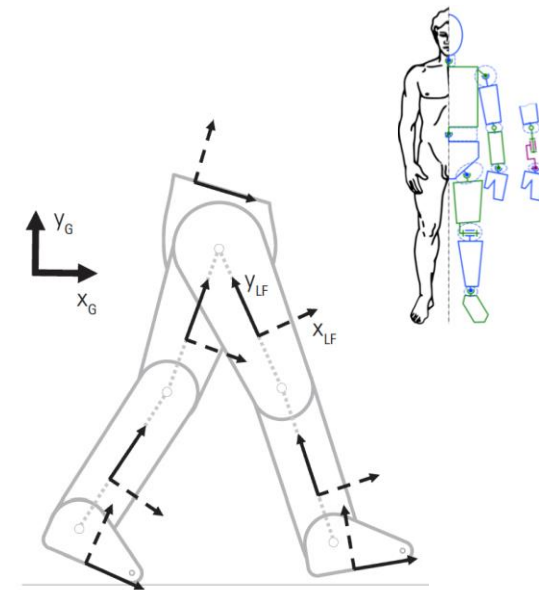
Cinématique

- Concerne : position, déplacement, trajectoire, vitesse, accélération dans un référentiel donné

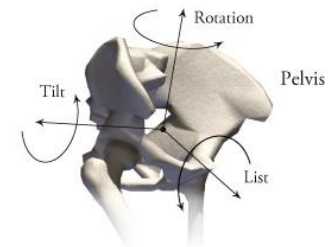


Modélisation et calcul

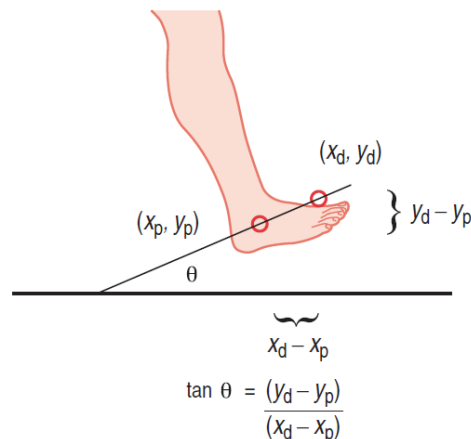
- Nécessité d'un **modèle**
 - Segments modélisés par des **corps rigides**
 - Un **référentiel** associé à chaque segment
 - Choix de **degrés de liberté** par articulation
- **Cinématique segmentaire** : orientation d'un segment par rapport au référentiel global



Baker, *Measuring Walking: A Handbook of Clinical Gait Analysis*, 2013



Uchida et al., *Biomechanics of Movement*, 2002

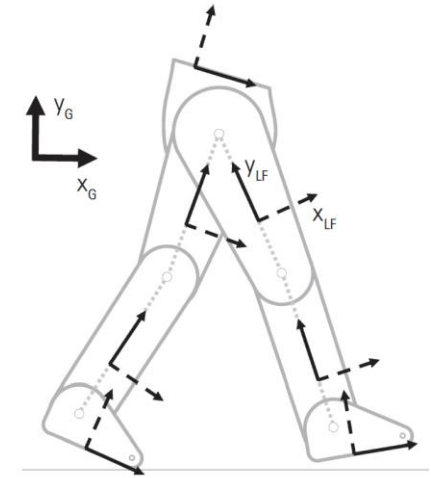
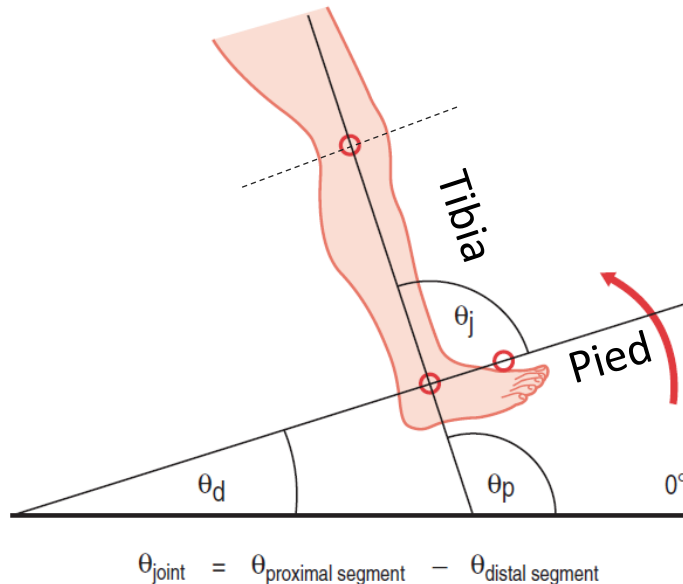


Kirtley, *Clinical Gait Analysis*, 2006

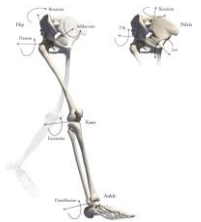


Modélisation et calcul

- **Cinématique articulaire :**
orientation d'un segment par rapport à un autre segment adjacent



Baker, *Measuring Walking: A Handbook of Clinical Gait Analysis*, 2013



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



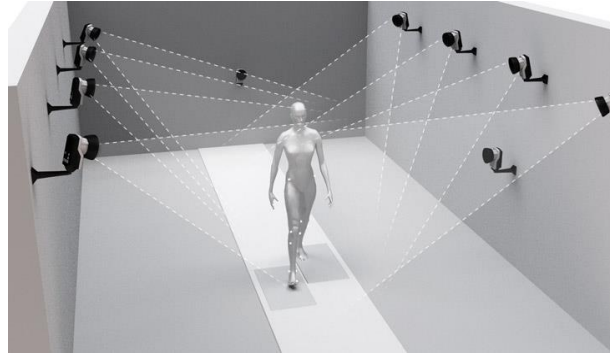
Les outils de mesures du mouvement



Vidéo



Système optoélectronique



Goniomètre



Capteurs inertiels



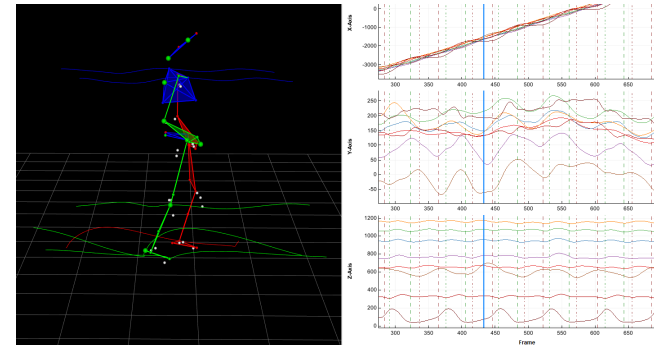
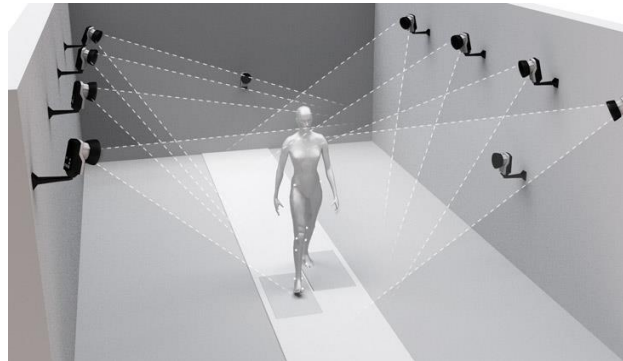
Tissu intelligent



Vidéo + IA

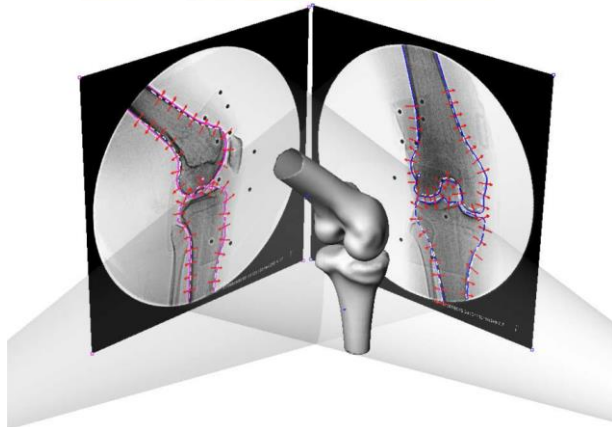


🍷 Système optoélectronique Motion capture



Les outils de mesures du mouvement (via imagerie irradiante)

Fluoroscope



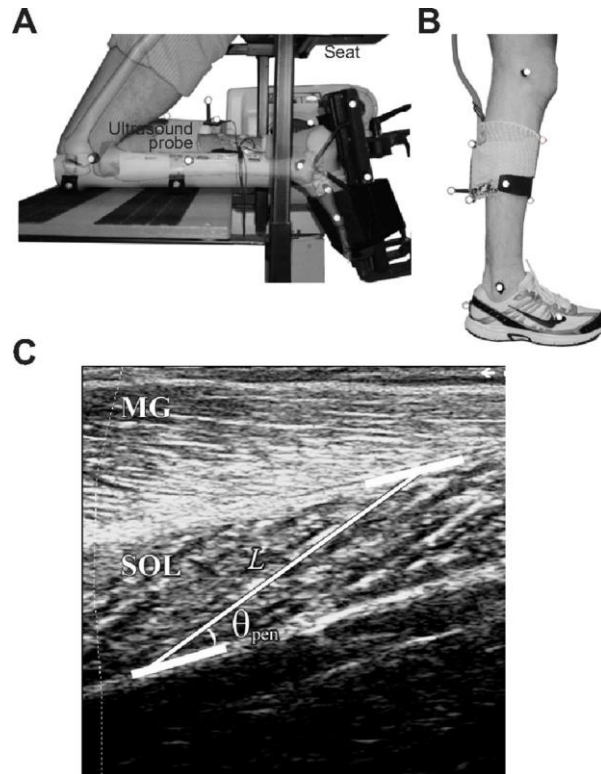
Radio dynamique



https://youtu.be/X2PLhCz0e_g

Les outils de mesures du mouvement (via imagerie non irradiante)

Ultrason



Dynamic IRM



<https://prod-images.static.radiopaedia.org/images/19752329/53bcfb8c8856db89c1faea363a5a16.jpg>

Plan

- Biomécanique

- Définition
- Le mouvement
 - Caractérisation
 - Cinématique
 - Mesure

- Les forces
 - Caractérisation
 - Cinétique
 - Mesure

- Biomécanique du membre inférieur

- Hanche (bassin)
- Genou
- Cheville (pied)

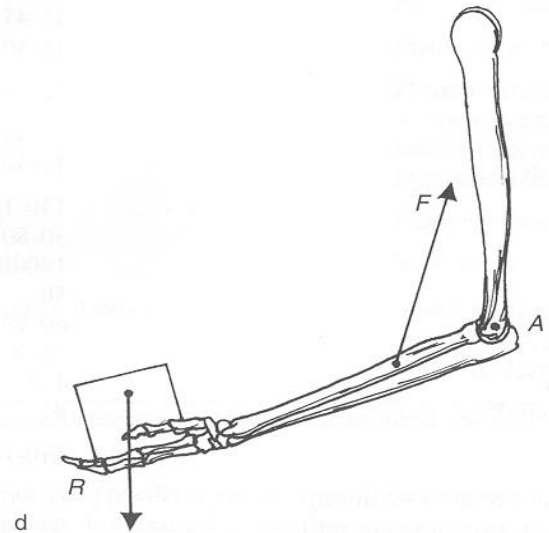
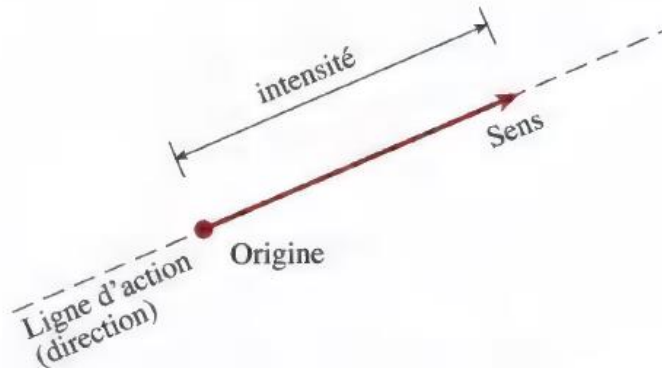
Les forces - définition

- **Définition**

- Toute cause possible capable de modifier la vitesse d'un corps ou de provoquer sa déformation (Bray et al., 1990)

- **Caractéristiques**

- Ligne d'action
- Sens
- Point d'application
- Intensité



Les forces - type

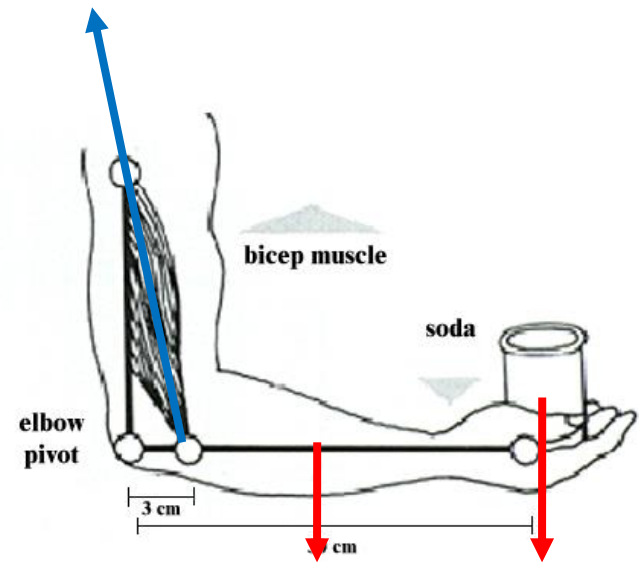
- Sources

- Forces externes

- Gravité
 - ...

- Forces internes

- Actives (contraction)
 - Passives (étirement des structures passives)



Les forces – notion d'efficacité

- **Orientation**

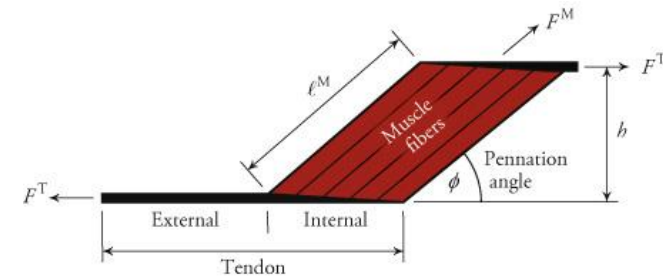
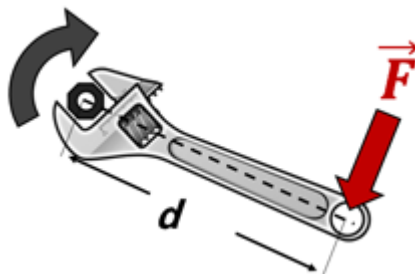
- Force efficace si elle agit dans le sens de l'action désirée

- **Bras de levier**

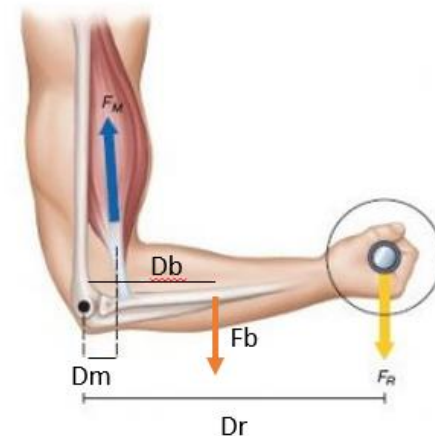
- Distance entre la ligne d'action et le pivot autour duquel la force agit

- **Moment d'une force**

- Moment = Force (F) x bras de levier (d)



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



<https://www.nfpt.com/wp-content/uploads/Muscle-Moment-Arm-300x246.jpg>

Les forces - équilibre

- Définition : État des corps maintenus en repos sous l'influence de plusieurs forces qui se contrebalancent exactement
- 1^{ère} Loi de Newton

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

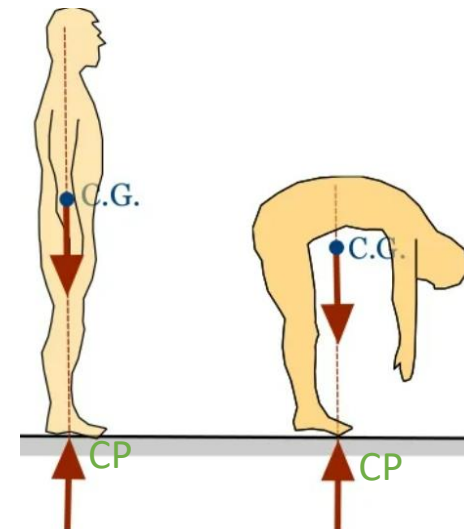
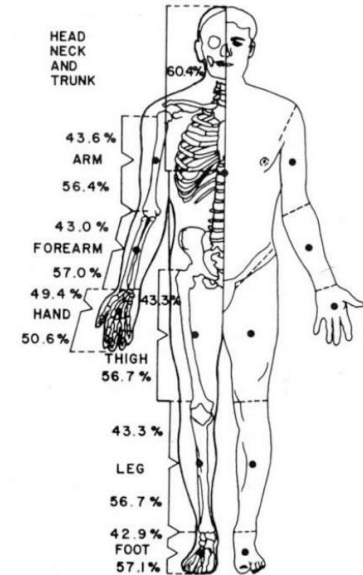
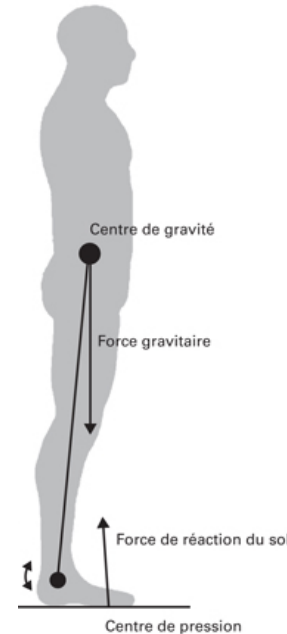
$$\sum \tau_z = 0$$



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

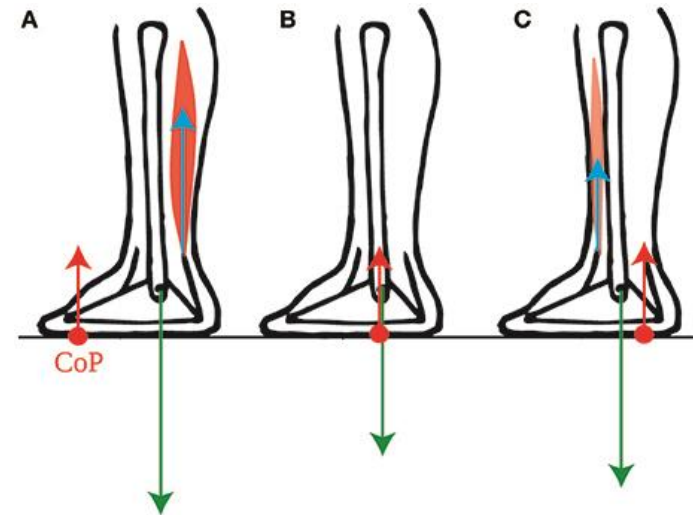
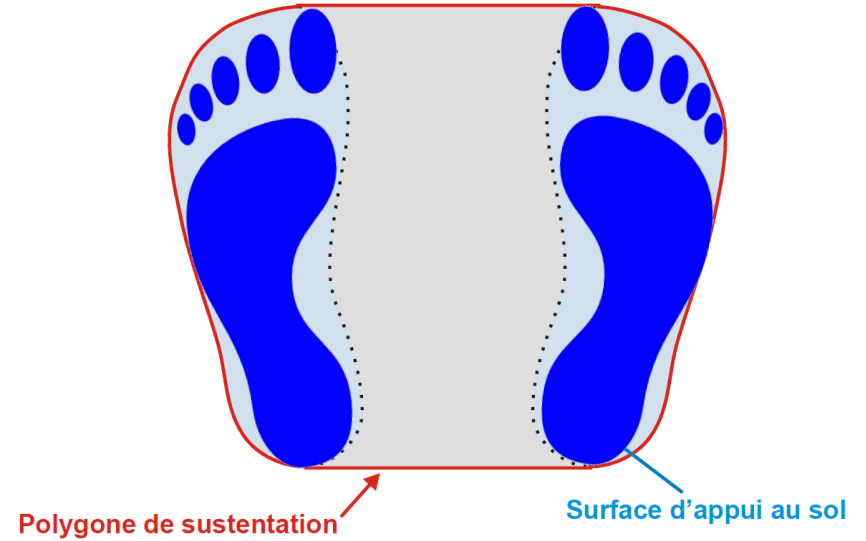
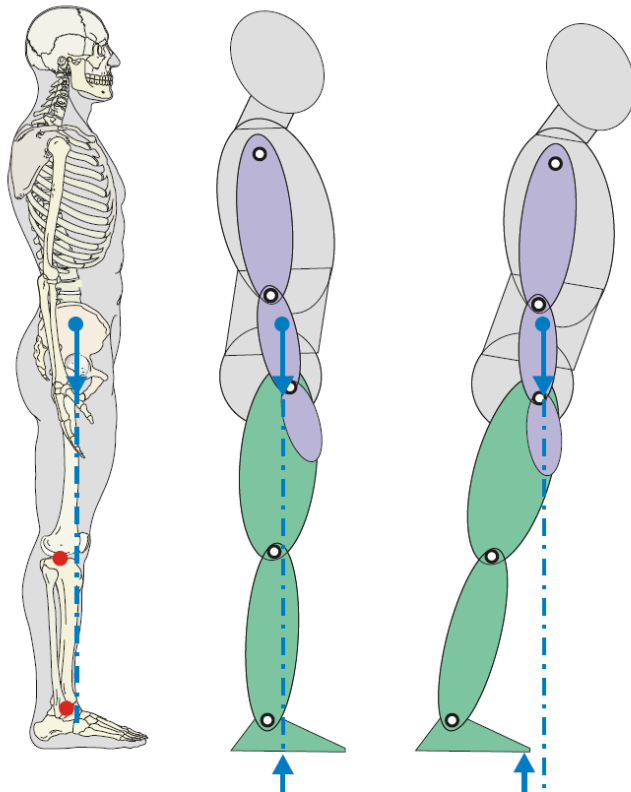
Centre de gravité

- **Centre de gravité (CG):** barycentre des masses de la personne et correspond au point d'application de la résultante des forces de gravité
- **Centre de pression (CP):** point d'application de la résultante des forces de réaction verticale au sol
- Equilibre = alignement entre CP et CG



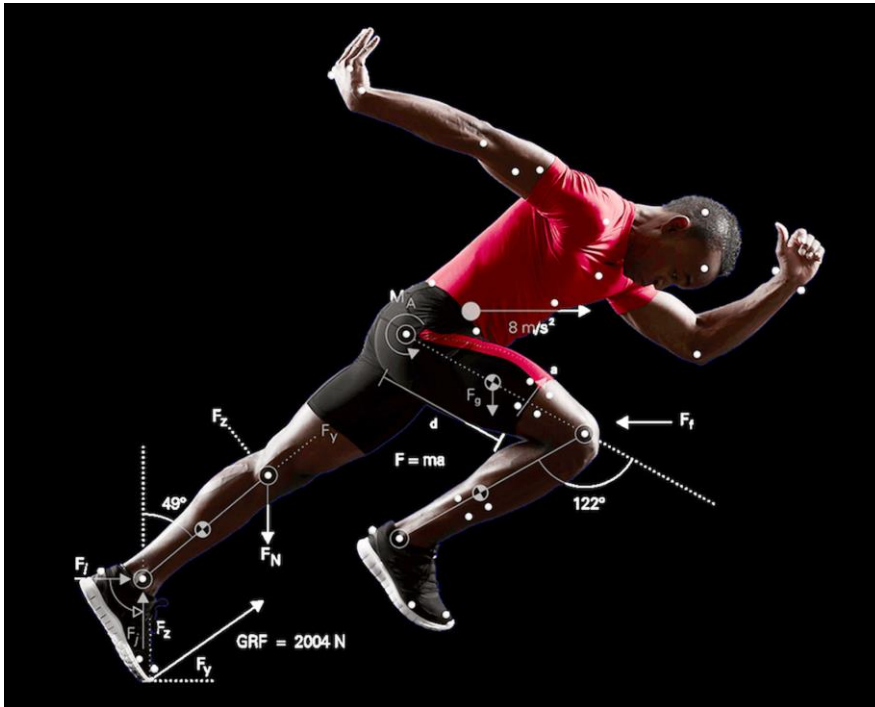
Polygone de sustentation

- Définition : correspond à la zone sur laquelle un corps repose en équilibre



Cinétique

- Concerne l'étude des forces, moments, puissances



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

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

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

Evaluation de la force musculaire

- En clinique – Echelle de la force motrice
 - Medical Research Council Scale - MRC

0 = Aucune contraction

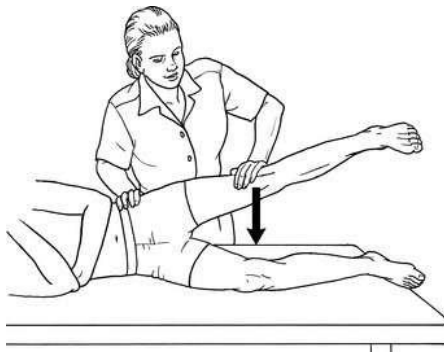
1 = Contraction visible n'entraînant aucun mouvement

2 = Contraction permettant le mouvement en l'absence de pesanteur

3 = Contraction permettant le mouvement contre la pesanteur

4 = Contraction permettant le mouvement contre la résistance

5 = Force musculaire normale



Les outils de mesures de la force

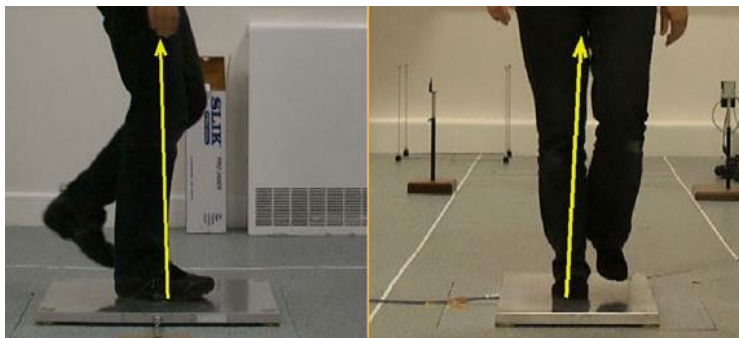
Dynamomètre



Isocinétisme



Plate-forme de force



Implants instrumentés



Plan

- Biomécanique

- Définition
- Le mouvement
 - Caractérisation
 - Cinématique
 - Mesure
- Les forces
 - Caractérisation
 - Cinétique
 - Mesure

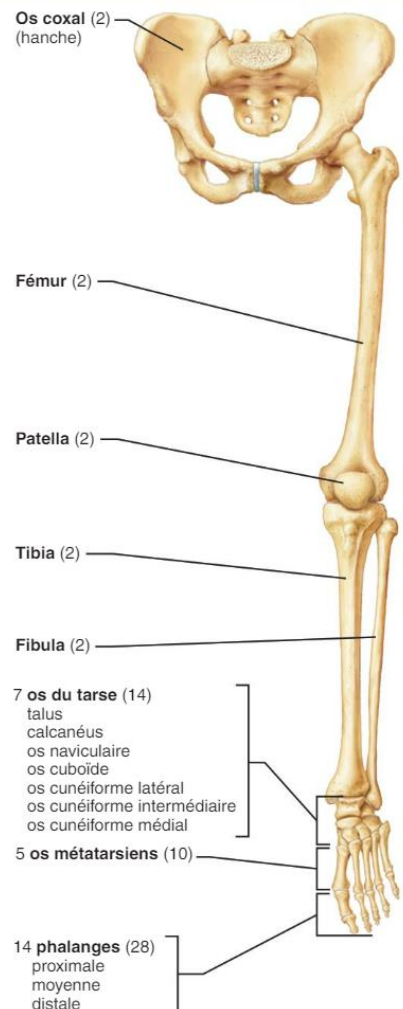
- Biomécanique du membre inférieur

- Hanche (bassin)
- Genou
- Cheville (pied)



Membre inférieur

- 4 segments
 - Bassin
 - Cuisse
 - Jambe
 - Pied
- 3 articulations principales
 - Hanche
 - Genou
 - Cheville

RÉGION DU CORPS	OS*	ILLUSTRATION	SITUATION
Ceinture pelvienne (figures 7.31 et 7.32)	Os coxal (2) (hanche)		Chaque os coxal est constitué par la fusion d'un os ilium, d'un os ischium et d'un os pubis; les os coxaux fusionnent à l'avant au niveau de la symphyse pubienne et forment avec le sacrum, en arrière, l'articulation sacro-iliaque; la ceinture composée par les deux os coxaux présente la forme d'un bassin.
Membre inférieur Cuisse (figure 7.34)	Fémur (2)		Le fémur est l'unique os de la cuisse; entre l'articulation de la hanche et le genou; le plus gros os du corps.
Genou (figure 7.34)	Patella (2)		La patella est un os sésamoïde logé dans le tendon du muscle quadriceps fémoral (à l'avant de la cuisse).
Jambe (figure 7.35)	Tibia (2)		Le tibia est l'os le plus gros et le plus interne de la jambe, entre le genou et le pied.
	Fibula (2)		La fibula est l'os latéral de la jambe; en forme de bâton.
Pied (figure 7.36)	7 os du tarse (14) talus calcaneus os naviculaire os cuboïde os cunéiforme latéral os cunéiforme intermédiaire os cunéiforme médial		Les sept os du tarse forment la partie proximale du pied; le talus se lie aux os de la jambe au niveau de l'articulation de la cheville; le calcaneus, le plus gros os du tarse, forme le talon.
	5 os métatarsiens (10)		Les os métatarsiens forment la plante du pied; cinq os numérotés de I à V à partir du gros orteil.
	14 phalanges (28) proximale moyenne distale		Les phalanges forment les orteils; trois phalanges dans les orteils II à V; deux dans l'orteil I (hallux).

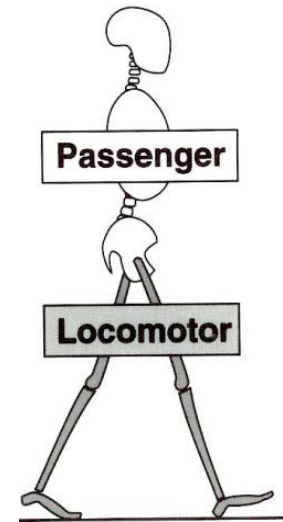
Vue antérieure de la ceinture pelvienne et du membre inférieur gauche



Hanche

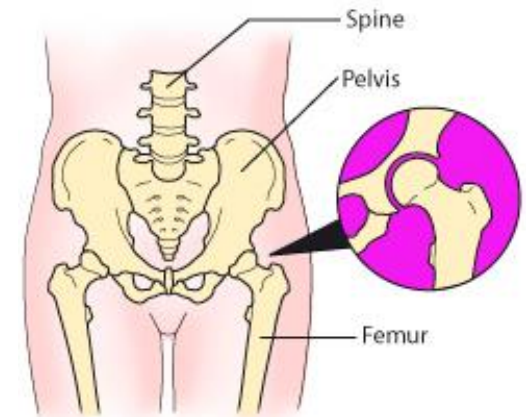
- Articulation de la hanche (coxo-fémorale)

- Située à la racine du membre inférieur
- Relie le bassin (os iliaque) au fémur (tête fémorale)
- Plus grosse articulation du corps
- Articulation **portante**
- Articulation **profonde** (protégée)



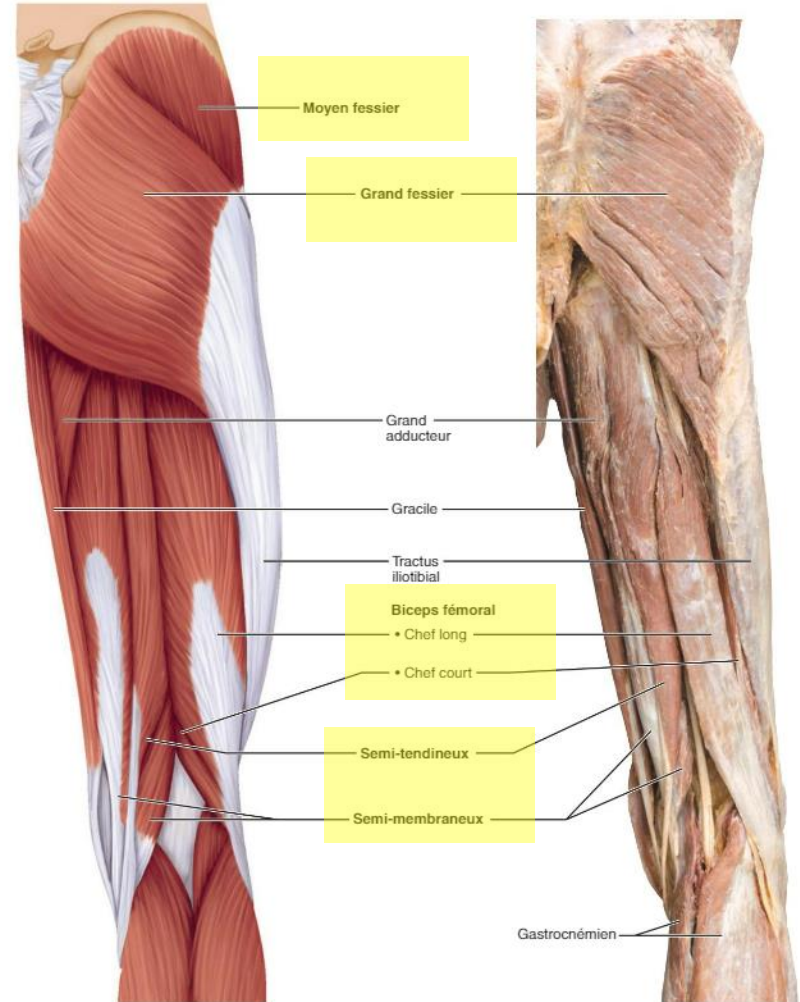
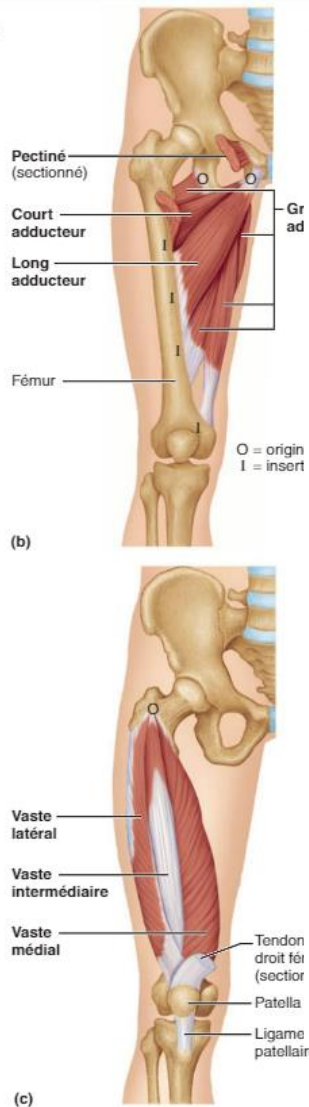
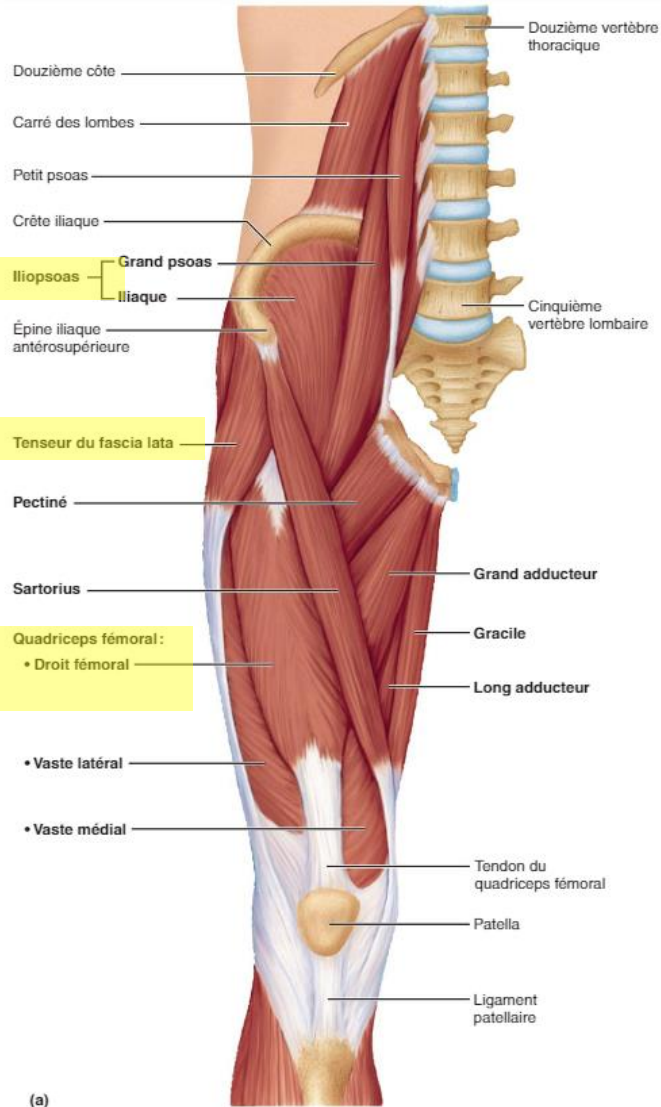
- Fonctions

- Mobilité du membre inférieur
 - Flexion
 - Orientation du MI
- Stabilité
 - Supporter le poids du corps
 - Station érigée



Hanche - muscles

Important pour la marche





Hanche - résumé de l'action des muscles

Tableau 10.17 Résumé des actions des muscles qui agissent sur la cuisse, la jambe et le pied (figure 10.26)

PREMIÈRE PARTIE: muscles qui agissent sur la cuisse et la jambe (A: agoniste)	ACTIONS À L'ARTICULATION DE LA HANCHE						ACTIONS SUR LE GENOU	
	Flexion	Extension	Abduction	Adduction	Rotation médiale	Rotation latérale	Flexion	Extension
Muscles antérieurs et médiaux								
Iliopsoas	× (A)							
Sartorius	×		×			×	×	
Grand adducteur	× (partie antérieure)	× (partie postérieure)		×	×			
Long adducteur	×			×	×			
Court adducteur	×			×	×			
Pectiné	×			×	×			
Gracile				×	×		×	
Droit fémoral	×							× (A)
Vastes								× (A)
Tenseur du fascia lata	×		×		×			
Muscles postérieurs								
Grand fessier		× (A)	×			×		
Moyen fessier			× (A)		×			
Petit fessier			×		×			
Piriforme			×			×		
Obturateur interne			×			×		
Obturateur externe			×			×		
Jumeaux inférieur et supérieur			×			×		
Carré fémoral						×		
Biceps fémoral		× (A)					× (A)	
Semi-tendineux		×					× (A)	
Semi-membraneux		×					× (A)	
Gastrocnémien							×	
Plantaire							×	
Poplité								

*Attention: l'action des muscles peut changer suivant la position de l'articulation (et rotation médiale de la jambe)

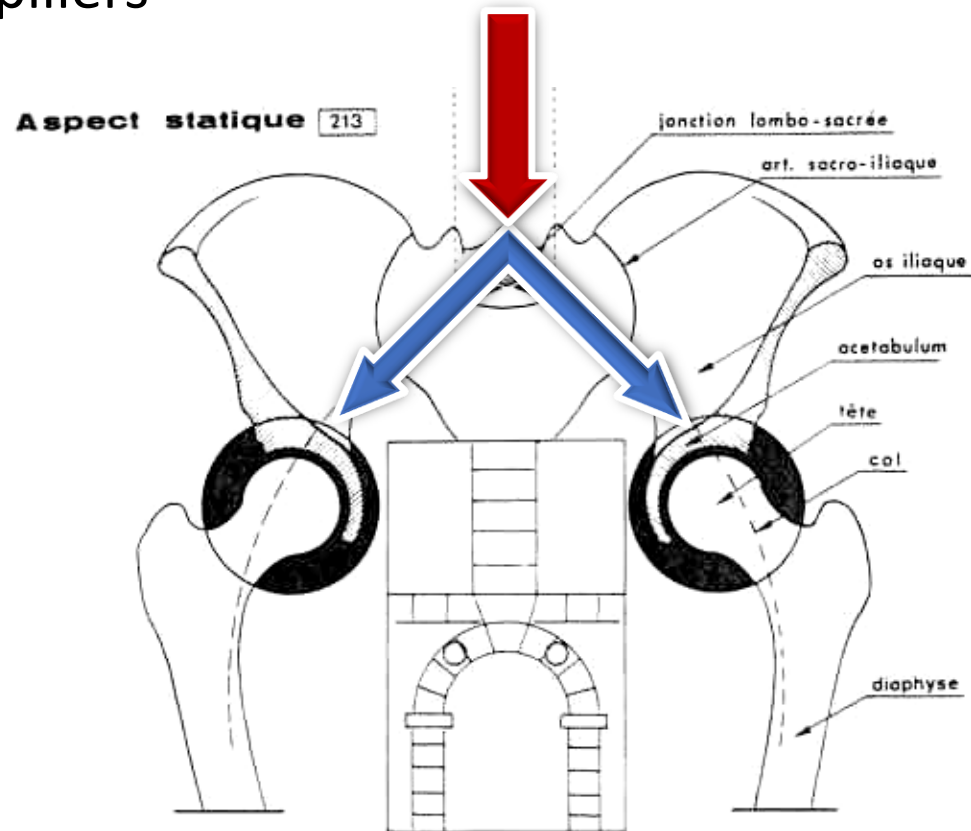
Hanche - mobilité

Mouvement max	Amplitude
Extension	15°
Flexion (Genou tendu)	120° (90°)
Abduction	45°
Adduction	30°
Rotation interne	30°
Rotation externe	60°

*Attention: les amplitudes dépendent des positions des articulations voisines en lien avec les muscles bi-articulaires
Voir : *Biomécanique des membres inférieurs – Klein, Sommerfeld – 2008 – pp226-233*
Biomécanique fonctionnelle – Dufour, Pillu – 2006 – pp127-134

Hanche - force

- Système de pont en arc d'ogive
 - Bassin = clé de voute
 - Fémurs = piliers



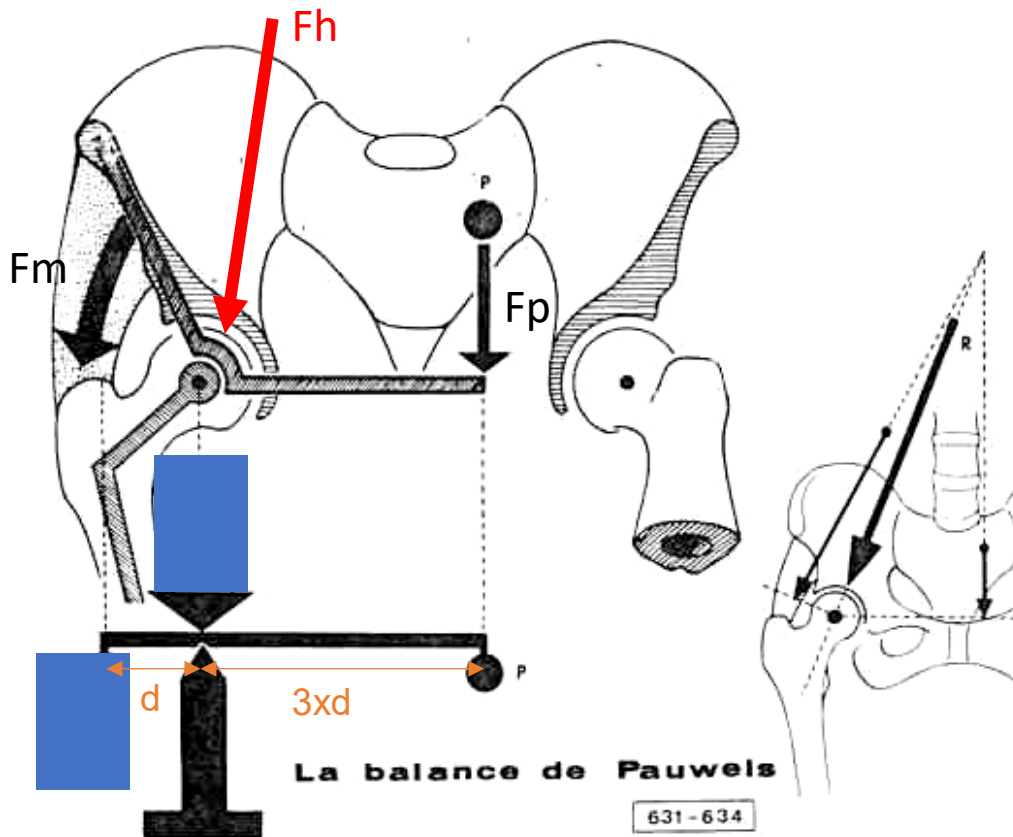


Hanche - force

pingo.coactum.de → 883735



- Balance de Pauwels



Calculer la force F_h qui s'applique sur la tête fémorale lors d'un appui unipodal

- A) 1xPoids du corps
- B) 3xPoids du corps
- C) 4xPoids du corps
- D) 6xPoids du corps

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

$$\sum \tau_z = 0$$



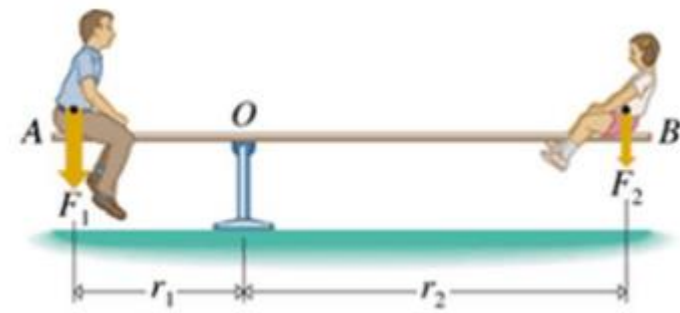
Hanche - force

Force totale = P + Fabducteur

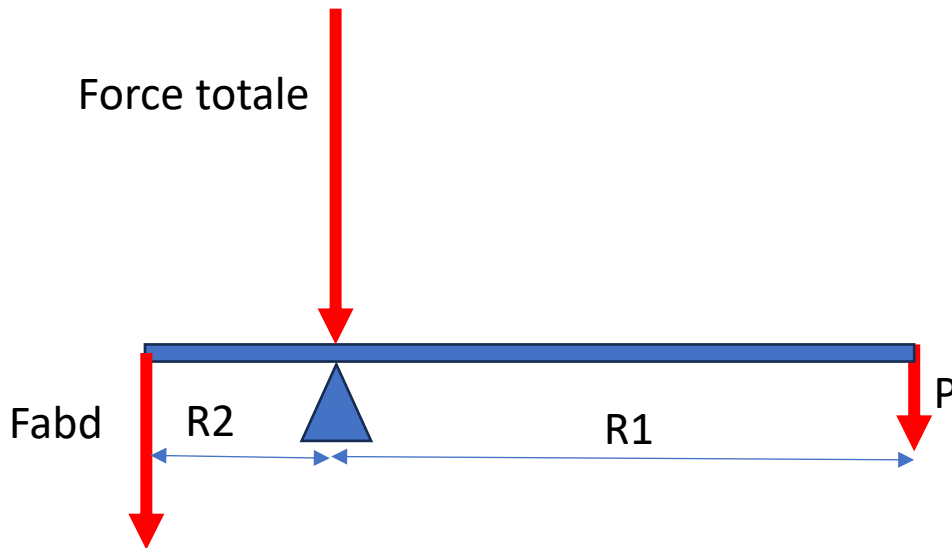
Equilibre : $P \times R1 = Fabd \times R2$

Si R1 diminue, et que P et R2 sont fixes, alors, Fabd diminue.

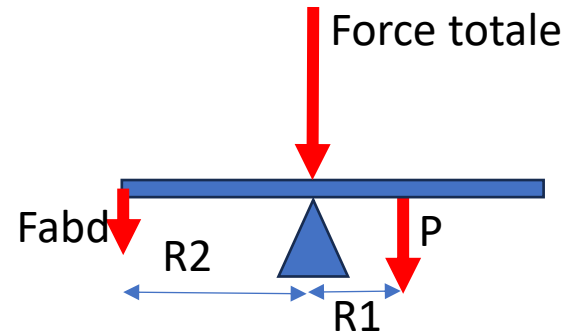
Si Abd diminue, la force totale diminue



Force totale



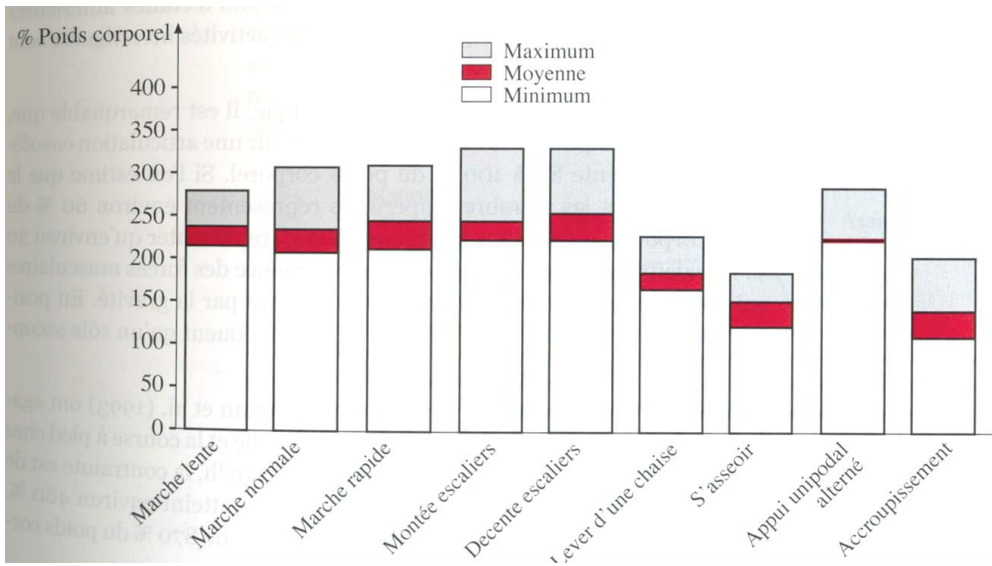
A) Sans se pencher



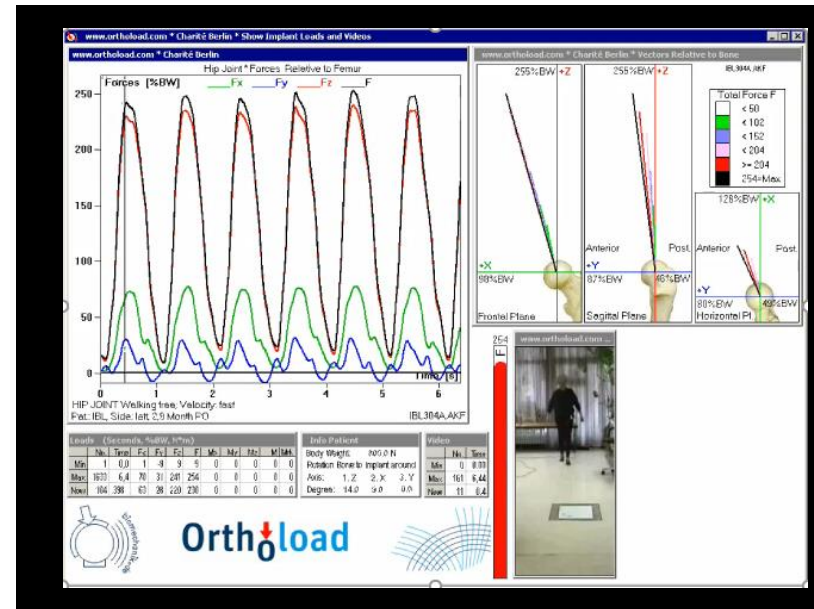
B) En se penchant

Hanche - force

□ Contraintes lors de la locomotion



Biomécanique des membres inférieurs – Klein, Sommerfeld – 2008

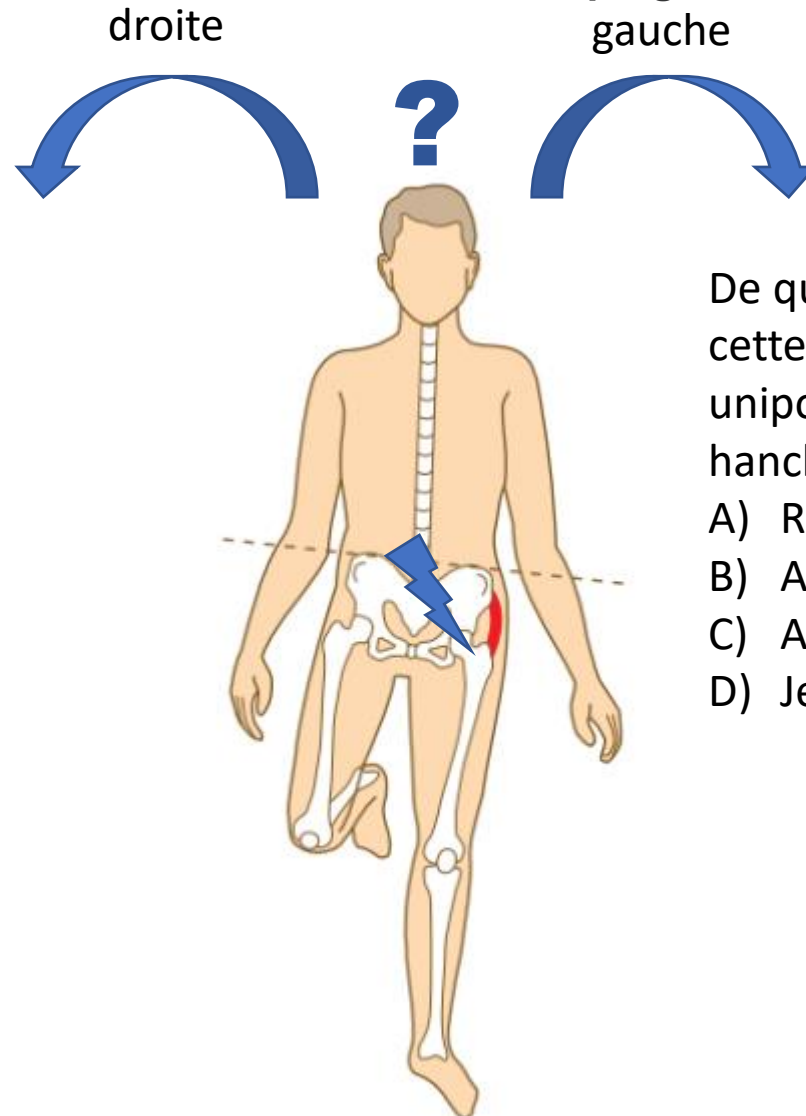


<http://orthoload.com/database/>

Hanche - douleur



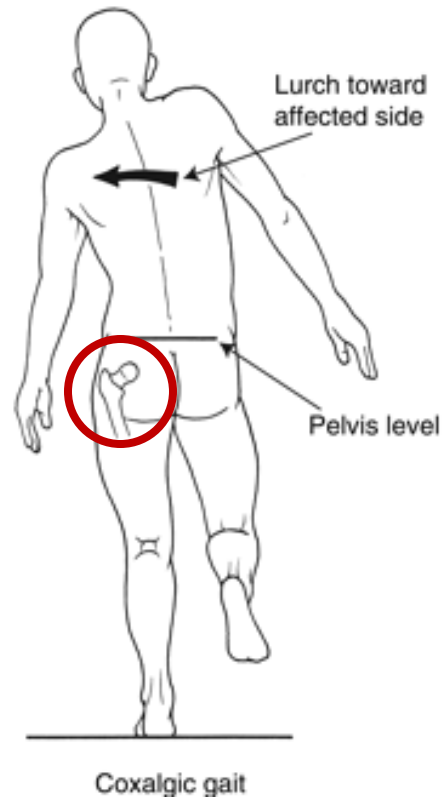
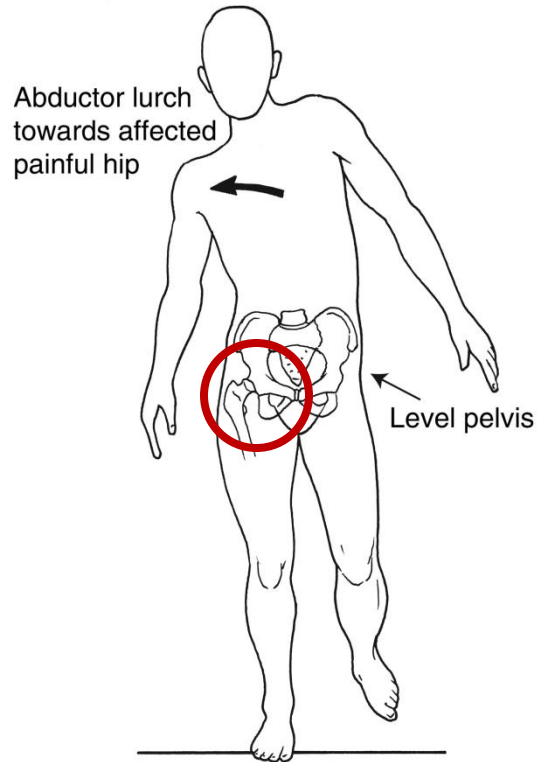
pingo.coactum.de → 883735
gauche



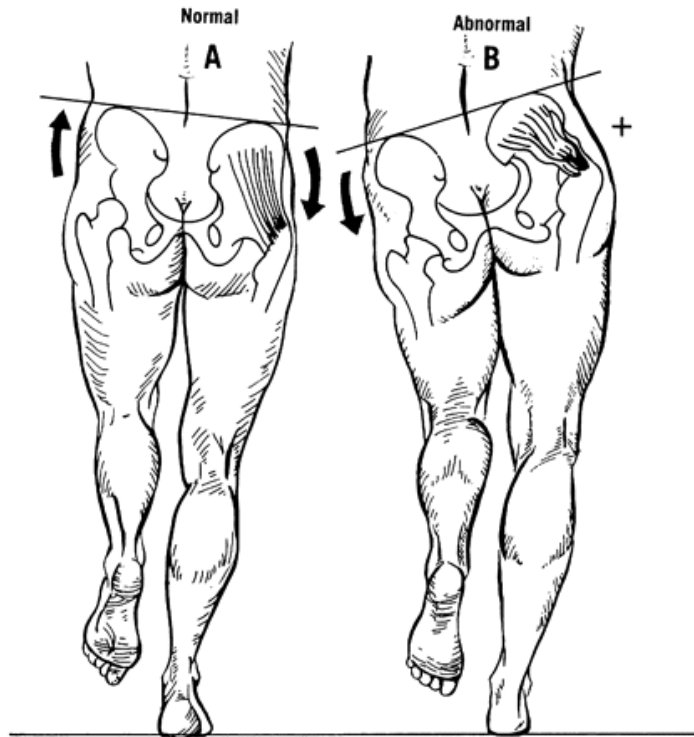
De quel côté va se pencher
cette personne en appui
unipodal si elle a mal à la
hanche gauche ?

- A) Reste droite
- B) A gauche
- C) A droite
- D) Je ne sais pas

Hanche - douleur



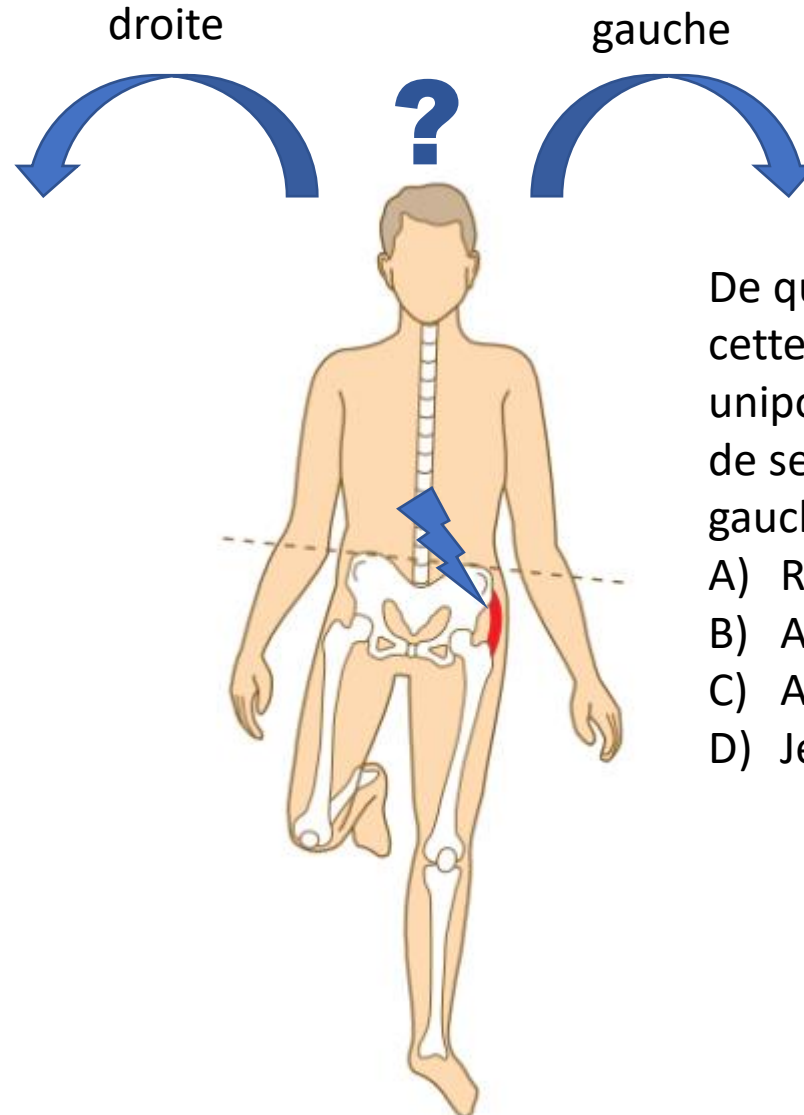
Hanche - faiblesse





Hanche - faiblesse

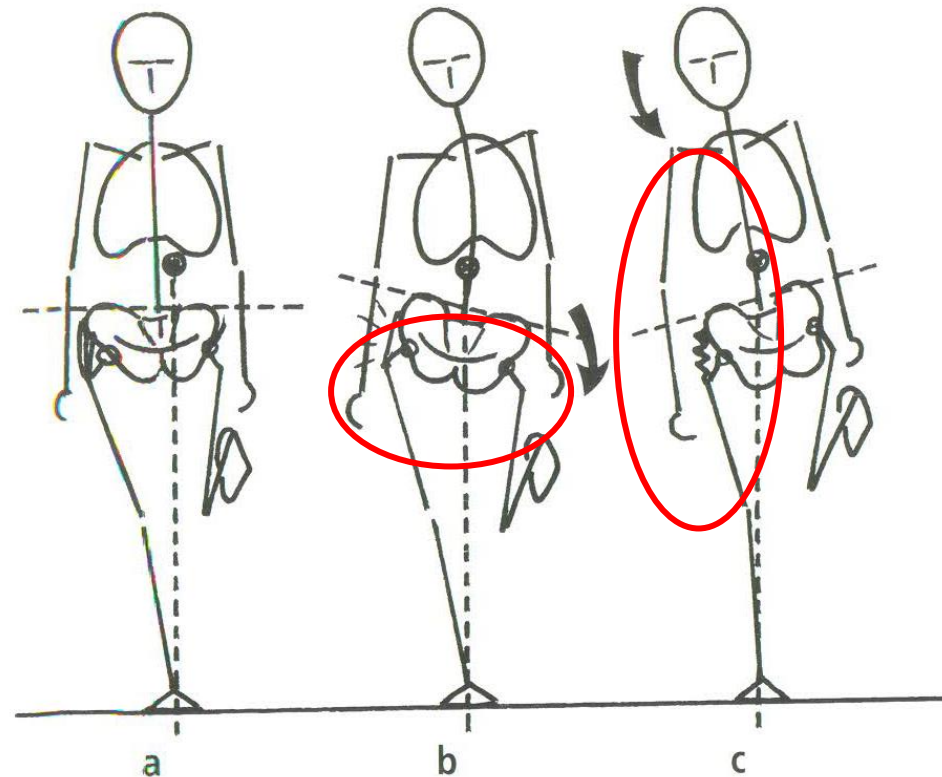
pingo.coactum.de → 883735
gauche



De quel côté va se pencher cette personne en appui unipodal si elle a une faiblesse de ses abducteurs de la hanche gauche ?

- A) Reste droite
- B) A gauche
- C) A droite
- D) Je ne sais pas

Hanche - faiblesse



Signe de Trendelenburg (b) : en position debout en appui monopodal, bascule du bassin en raison d'une insuffisance des muscles fessiers

Boiterie de Duchenne (c) : à la marche, boiterie de décharge avec inclinaison latérale du tronc du côté de l'articulation atteinte lors de la charge de la hanche atteinte

Plan

- Biomécanique
 - Définition
 - Le mouvement
 - Caractérisation
 - Cinématique
 - Mesure
 - Les forces
 - Caractérisation
 - Cinétique
 - Mesure
- Biomécanique du membre inférieur
 - Hanche (bassin)
 - Genou
 - Cheville (pied)



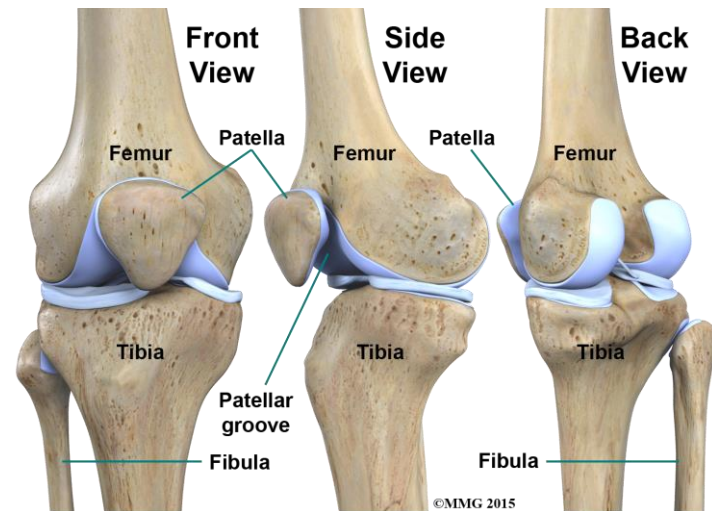
Genou

- Fonctions principales

- Stabilité : Stabilisation lors de la mise en charge
- Mobilité : Progression du membre inférieur dans le plan sagittal

- Os

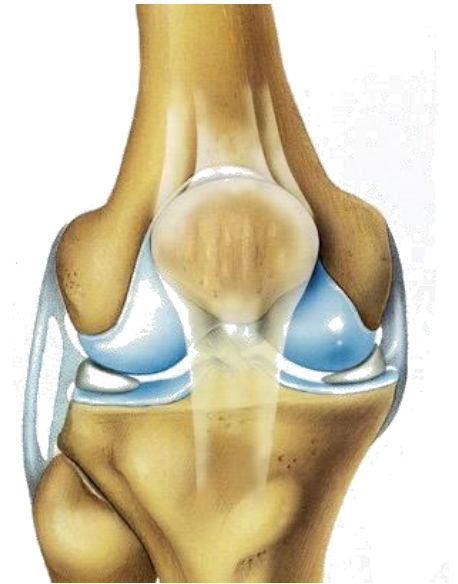
- Fémur
- Tibia
- Patella





Genou - articulation

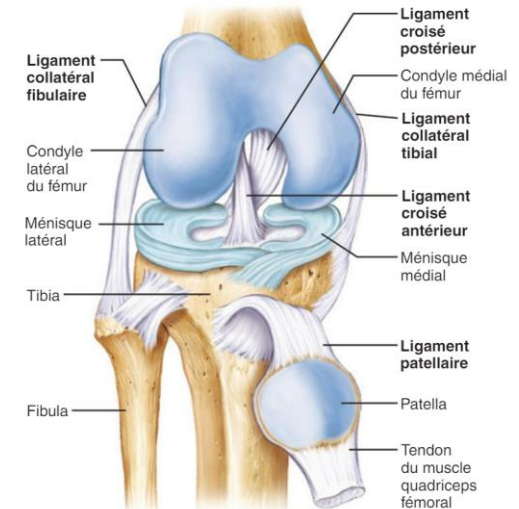
- Volumineuse et complexe
- Mouvement principal de flexion / extension
 - Mouvements associés dans les 3 plans
- 2 articulations
 - Femoro-tibiale
 - Femoro-patellaire



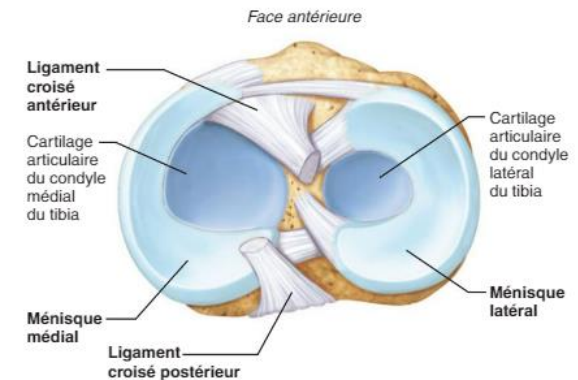
Genou – ligaments - ménisques



- Ligaments
 - Collatéraux
 - Limitent les rotations en extension
 - Croisés (LCA + LCP)
 - Limitent les déplacements antéro-postérieurs
 - Limitent la rotation médiale
- Ménisques
 - Améliorent la stabilité (cale)
 - Améliorent la congruence
 - Répartissent les contraintes



Anatomie et physiologie humaines, Elaine Marieb, Katja Hoehn, 2019

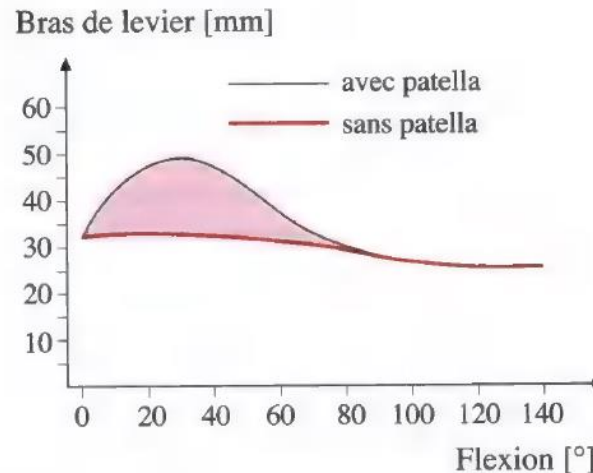
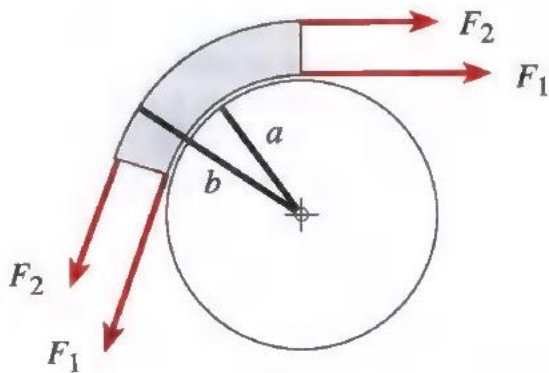
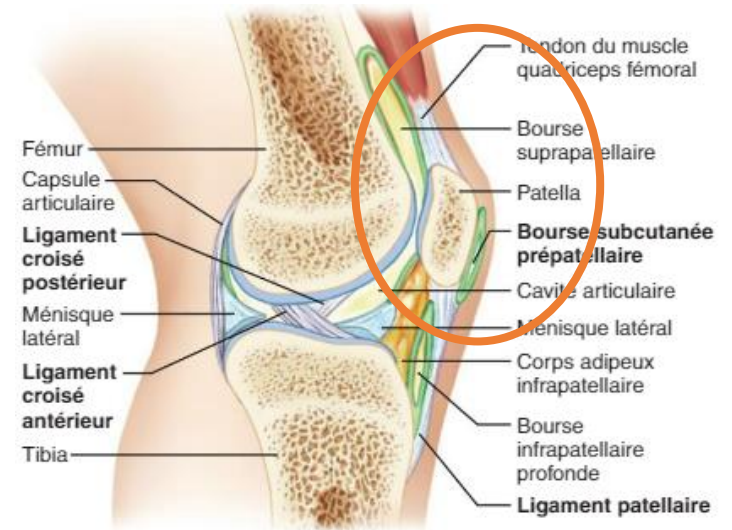


Anatomie et physiologie humaines, Elaine Marieb, Katja Hoehn, 2019

Genou - patella

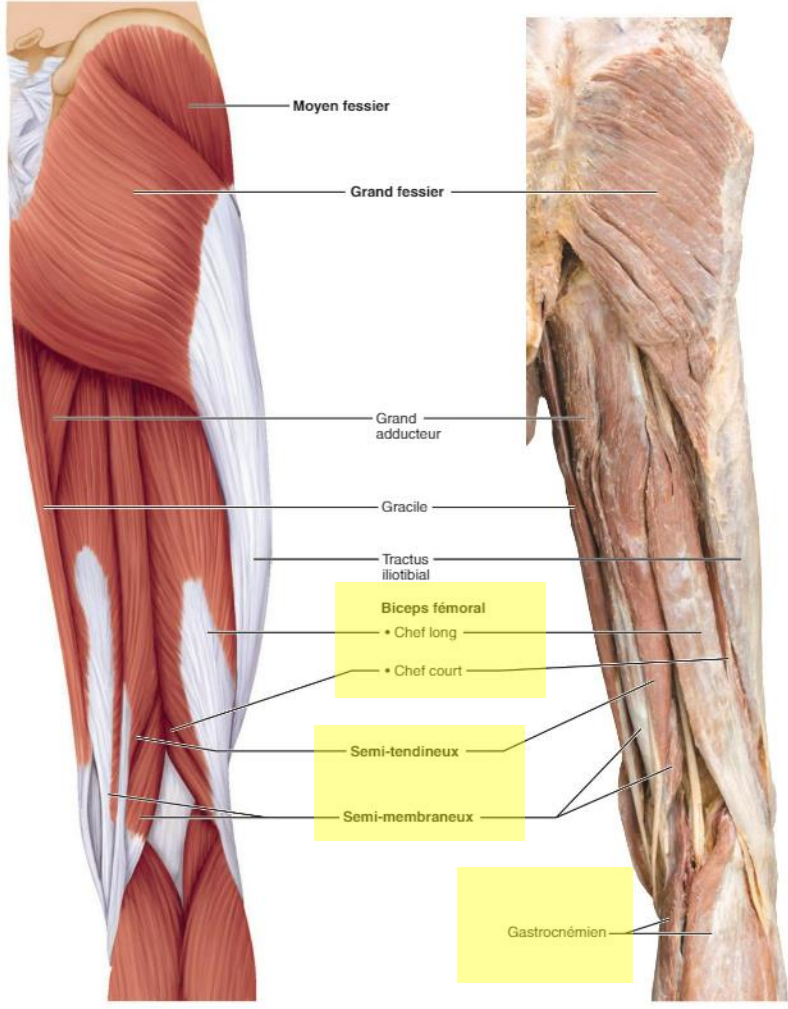
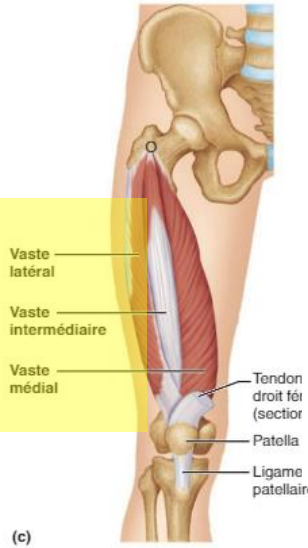
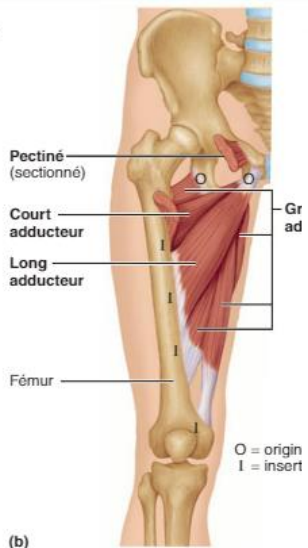
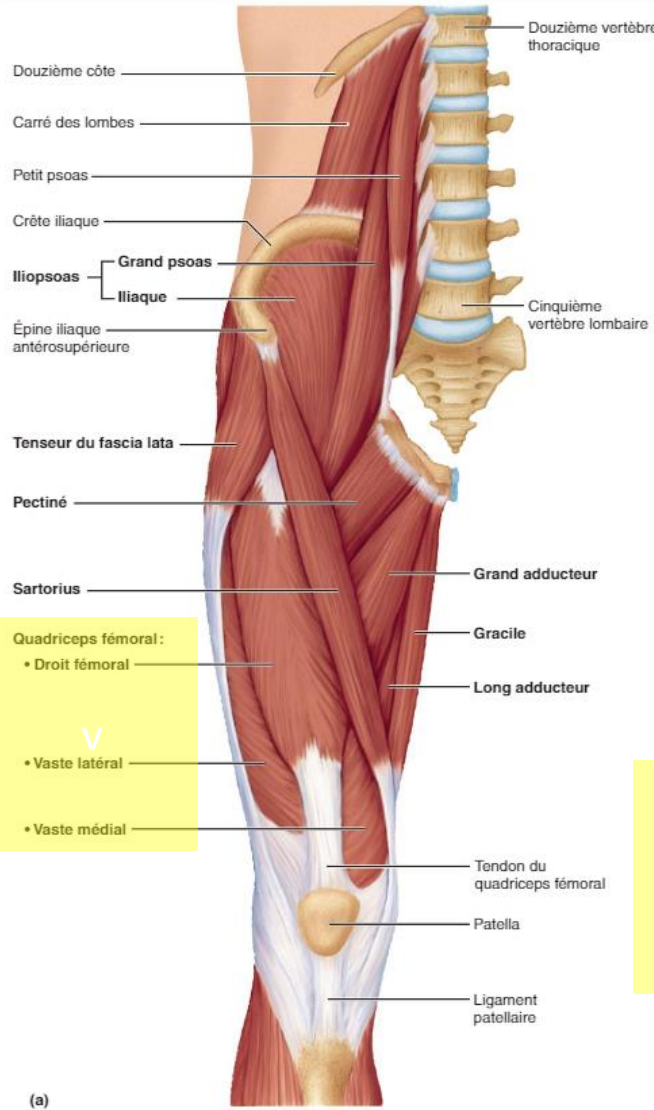
- Fonction

- Améliore le glissement du tendon patellaire
- Augmentation du bras de levier du quadriceps
- Protège articulation du genou





Genou – muscles



(a)

(b)

(c)



Genou - résumé de l'action des muscles

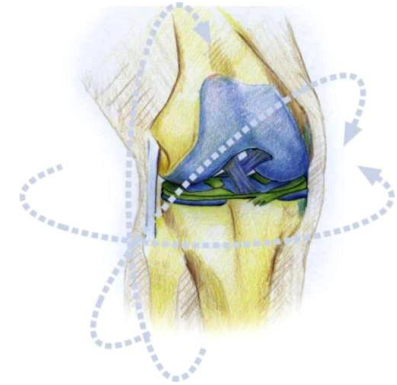
Tableau 10.17 Résumé des actions des muscles qui agissent sur la cuisse, la jambe et le pied (figure 10.26)

PREMIÈRE PARTIE: muscles qui agissent sur la cuisse et la jambe (A: agoniste)	ACTIONS À L'ARTICULATION DE LA HANCHE						ACTIONS SUR LE GENOU	
	Flexion	Extension	Abduction	Adduction	Rotation médiale	Rotation latérale	Flexion	Extension
Muscles antérieurs et médiaux								
Iliopsoas	× (A)							
Sartorius	×		×			×	×	
Grand adducteur	× (partie antérieure)	× (partie postérieure)		×	×			
Long adducteur	×			×	×			
Court adducteur	×			×	×			
Pectiné	×			×	×			
Gracile				×	×		×	
Droit fémoral	×							× (A)
Vastes								× (A)
Tenseur du fascia lata	×		×		×			
Muscles postérieurs								
Grand fessier		× (A)	×			×		
Moyen fessier			× (A)		×			
Petit fessier			×		×			
Piriforme			×			×		
Obturateur interne			×			×		
Obturateur externe			×			×		
Jumeaux inférieur et supérieur			×			×		
Carré fémoral						×		
Biceps fémoral		× (A)					× (A)	
Semi-tendineux		×					× (A)	
Semi-membraneux		×					× (A)	
Gastrocnémien							×	
Plantaire							×	
Poplité							×	
							×	(et rotation médiale de la jambe)

Genou - mouvement

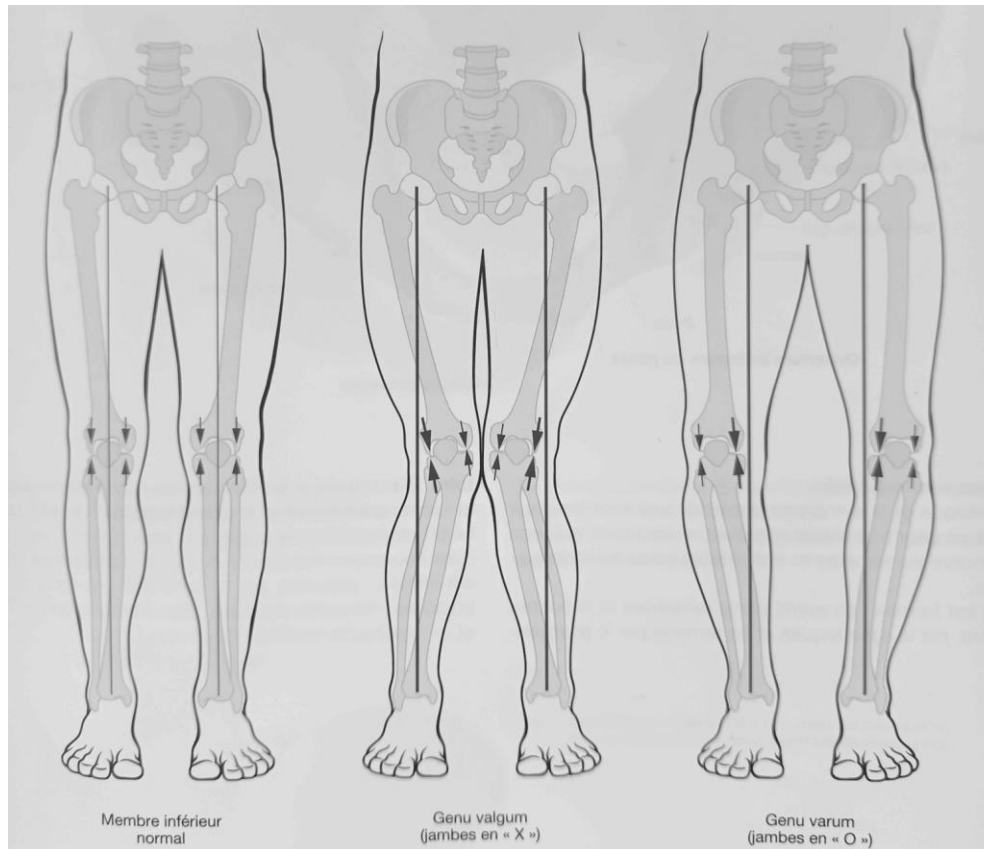
- 6 degrés de liberté

Mouvements	Amplitude
Flexion/Extension	0-150°
Rotation Int/Ext	25-30° en flexion
Abduction/Adduction	6-8°
Translation AP	5-10 mm
Translation ML	1-2 mm
Translation PD	5-10 mm



Genou - force

- Axe mécanique



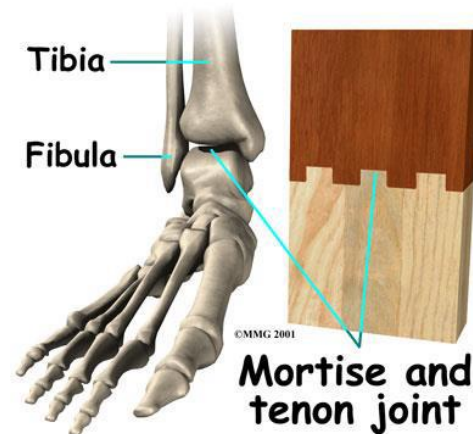
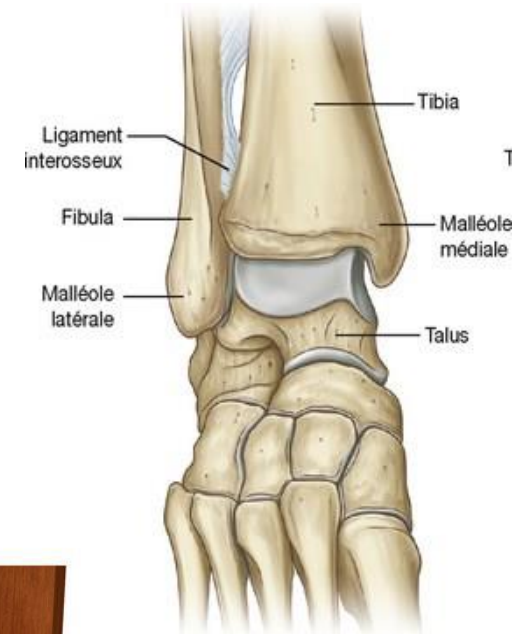
Plan

- Biomécanique
 - Définition
 - Le mouvement
 - Caractérisation
 - Cinématique
 - Mesure
 - Les forces
 - Caractérisation
 - Cinétique
 - Mesure
- Biomécanique du membre inférieur
 - Hanche (bassin)
 - Genou
 - Cheville (pied)



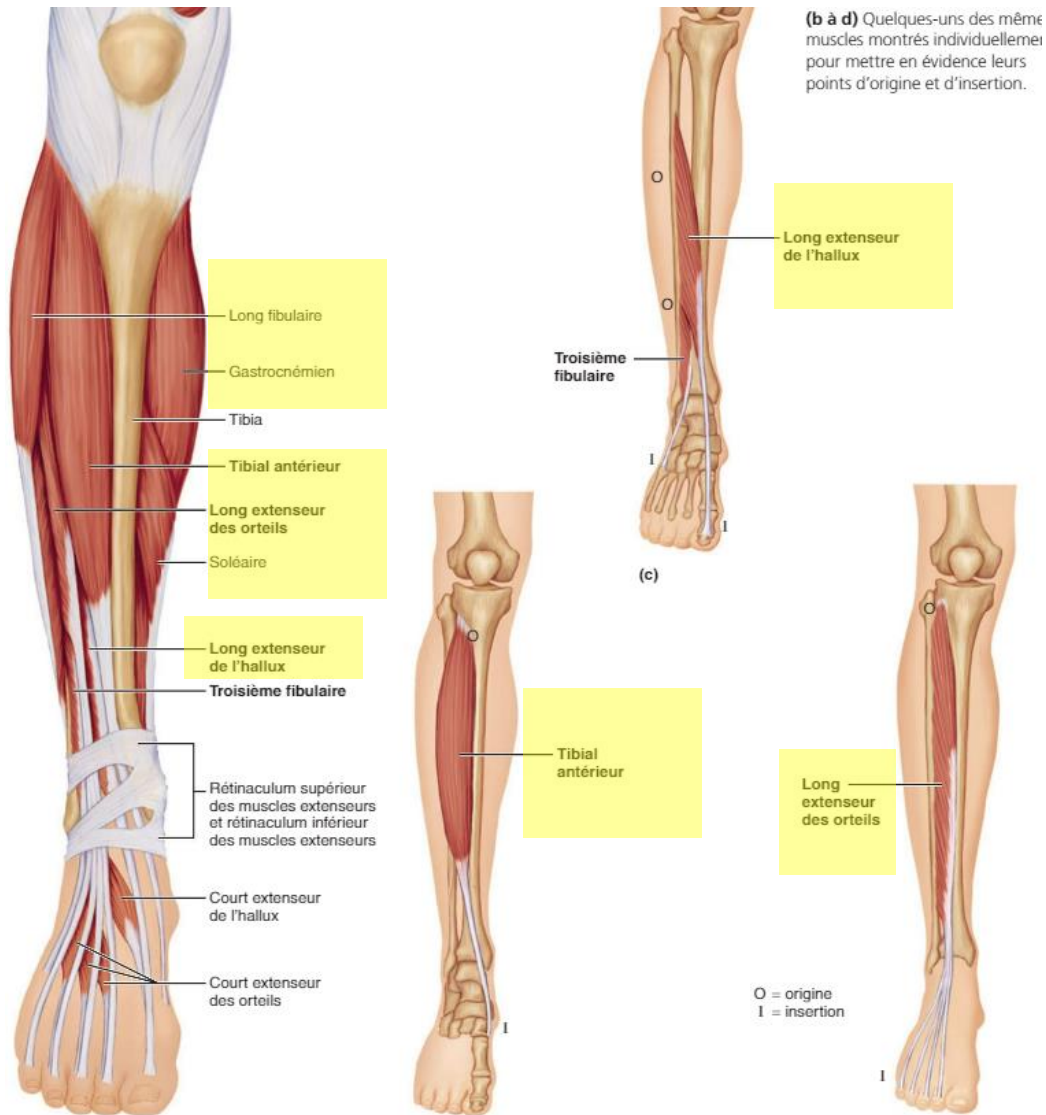
Cheville

- Fonction
 - Permet le mouvement principal de flexion/extension
 - Rôle primordiale pour la marche
 - Supporte le poids du corps
- Os
 - Tibia, Fibula, Talus
- Articulation
 - Talo-crurale



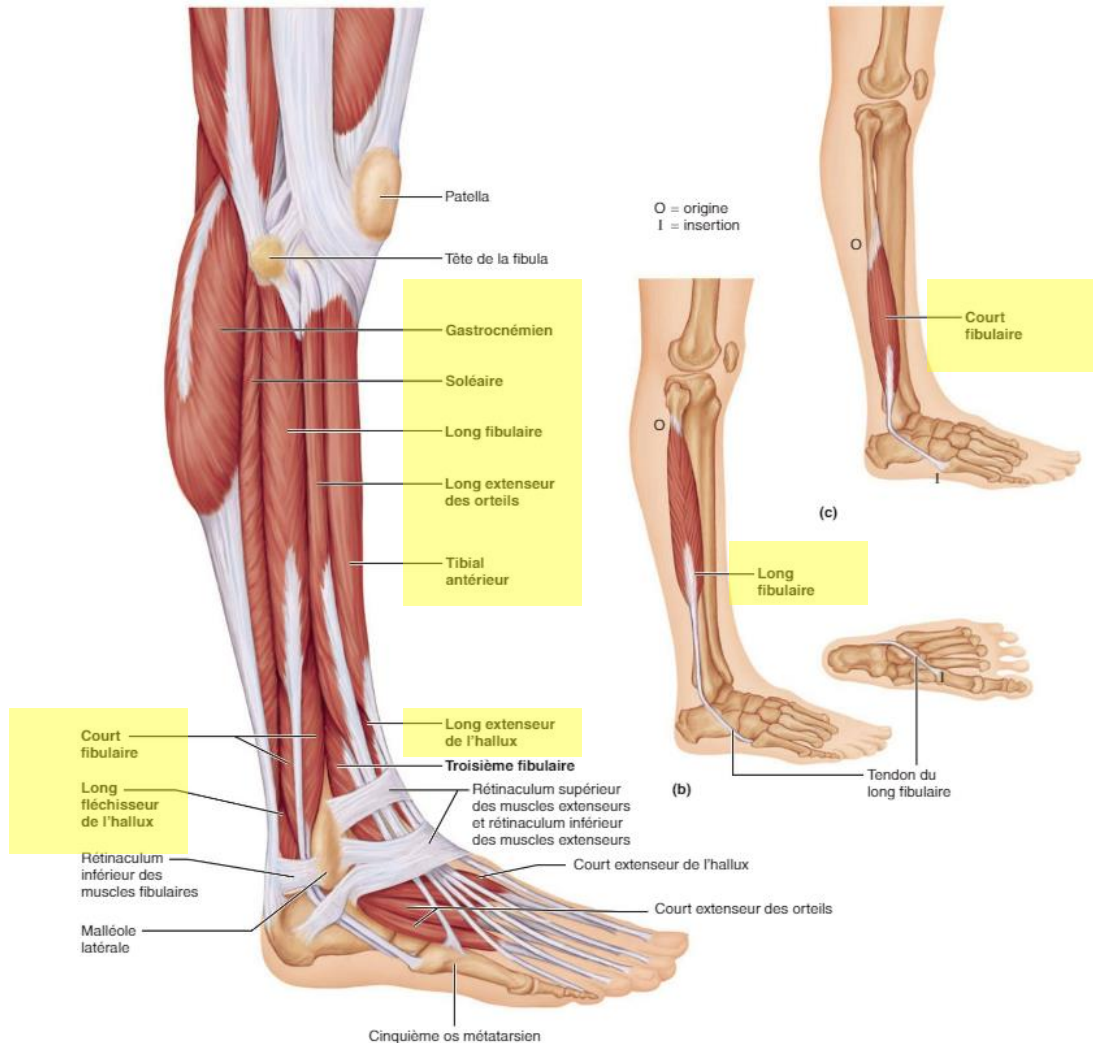


Cheville - muscles



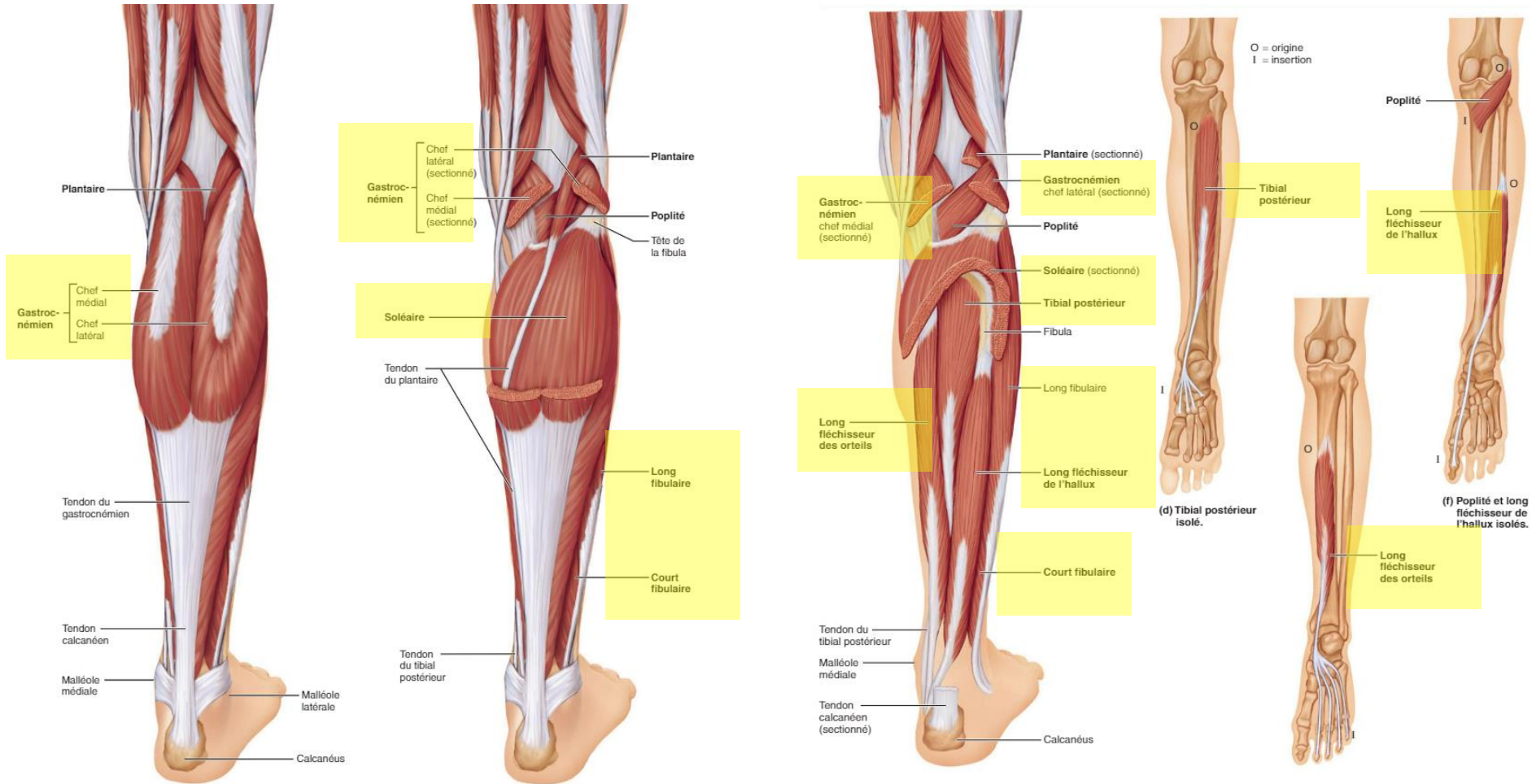


Chevilles - muscles





Cheville – muscles





Cheville - résumé de l'action des muscles

DEUXIÈME PARTIE: muscles qui agissent sur la cheville et sur les orteils

	ACTIONS À L'ARTICULATION DE LA CHEVILLE				ACTIONS SUR LES ORTEILS	
	Flexion plantaire	Dorsiflexion	Inversion	Éversion	Flexion	Extension
Loge antérieure						
Tibial antérieur		× (A)	×			
Long extenseur des orteils		×				× (A)
Troisième fibulaire		×		×		
Long extenseur de l'hallux		×	× (faible)			× (gros orteil)
Loge latérale						
Court et long fibulaires	×			×		
Loge postérieure						
Gastrocnémien	× (A)					
Soléaire	× (A)					
Plantaire	×					
Long fléchisseur des orteils	×		×		× (A)	
Long fléchisseur de l'hallux	×		×		× (hallux)	
Tibial postérieur	×		× (A)			



Cheville - mouvement

- Flexion dorsale 20-30°
- Flexion plantaire (Extension) 30-50°

Flexion dorsale

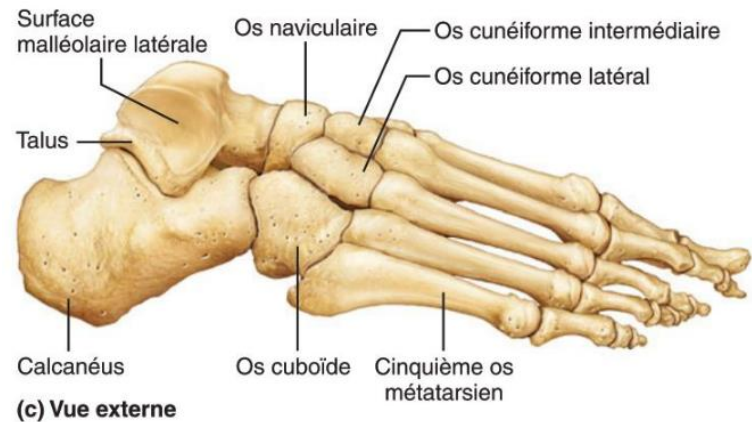


Flexion plantaire



Pied

- Fonctions
 - Supporte le poids du corps
 - Absorbe les chocs
 - Adaptation du pied au sol
 - Propulsion (transmission de force)
- De nombreuses structures
 - 26 os
 - 16 articulations
 - 107 ligaments
 - 20 muscles

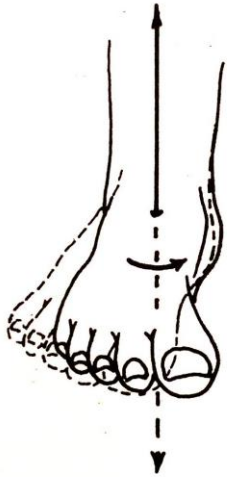


Anatomie et physiologie humaines, Elaine Marieb, Katja Hoehn, 2019



Pied – mouvement

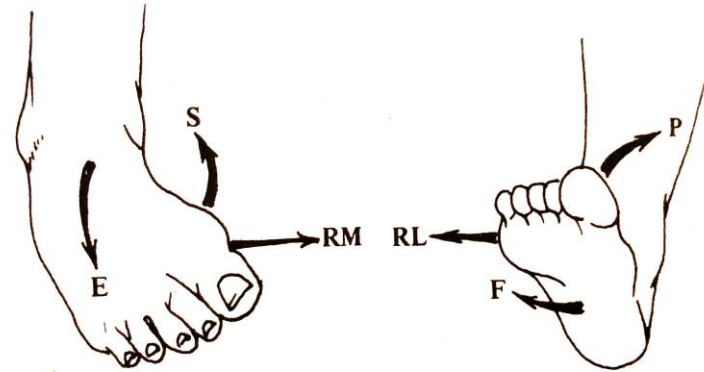
(articulation subtalaire entre talus et calcanéus)



ROTATION MÉDIALE 15°

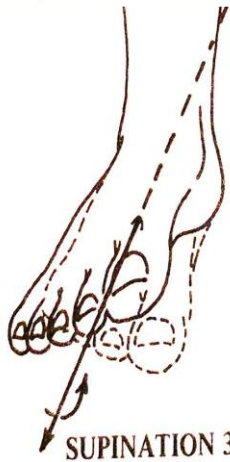


ROTATION LATÉRALE 45°

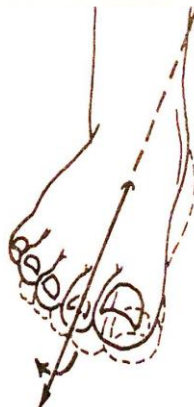


INVERSION

EVERSION



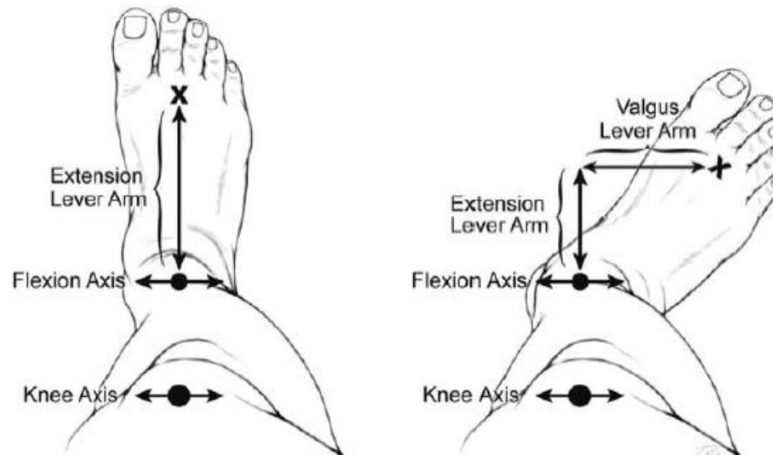
SUPINATION 35°



PRONATION 25°

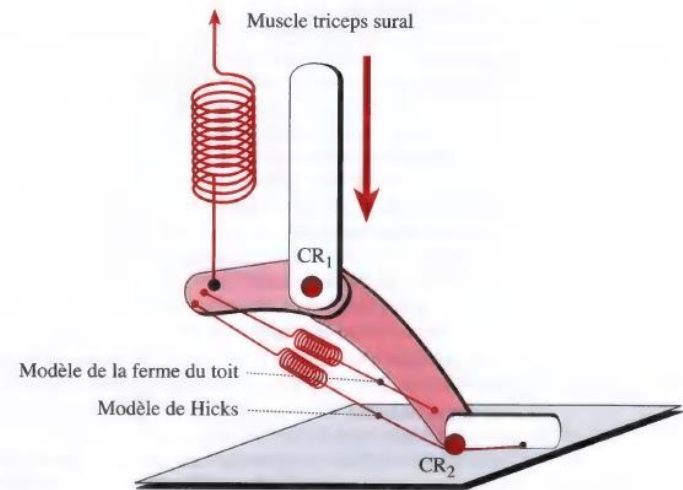
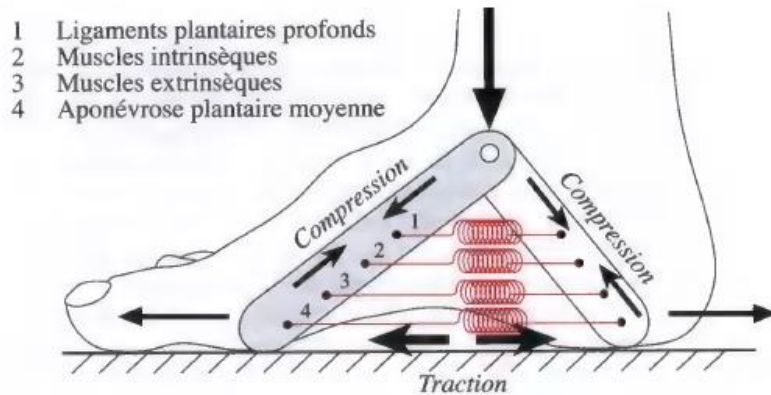
Pied - force

- Le pied est un bras de levier



Pied - force

- Voute plantaire
 - Amortisseur
 - Emmagasine et restitue de l'énergie



Biomécanique des membres inférieurs – Klein, Sommerfeld – 2008

Conclusions

- Biomécanique
 - Cinématique → mouvement
 - Cinétique → force
- Biomécanique du membre inférieur
 - Hanche
 - Mobilité du membre inférieur
 - Stabilité du haut du corps
 - Balance de Pauwels (importance des abducteurs de hanche dans le plan frontal)
 - Genou
 - Mobilité plan sagittal
 - Stabilité lors de la mise en charge
 - Absorption des chocs
 - Cheville/pieds
 - Support du poids du corps
 - Absorption des chocs
 - Adaptation au terrain
 - Propulsion lors de la marche

Speakup

<https://web.speakup.info/room/join/69890>

