

# Thème 7: Biomécanique du membre inférieur

- généralités;
- biomécanique du genou;
- biomécanique de la hanche;
- (biomécanique de la cheville)



# Rôles et unités structurales

## ➤ rôles principaux:

- support du poids du corps;
- mouvement et locomotion;

## ➤ 4 unités structurales:

- **hanche**:

- jonction bassin - cuisse;

- **genou**:

- jonction cuisse - jambe;

- **cheville**:

- jonction jambe - pied;

- **articulation talo-calcanéenne (ou subtalaire)**:

- jonction entre le talus et le calcanéum (2 os du pied);



# Thème 7: Biomécanique du membre inférieur

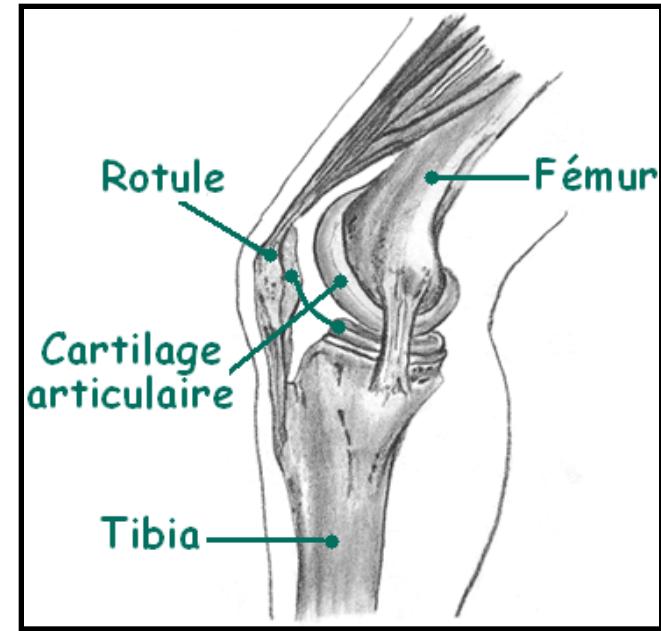
- généralités;
- biomécanique du genou;
- biomécanique de la hanche;
- (biomécanique de la cheville)



# Thème 7: Biomécanique du membre inférieur

## ➤ biomécanique du genou:

- anatomie et rôles;
- articulation tibio-fémorale et mouvements;
- articulation patello-fémorale et mouvements;
- modélisation biomécanique.

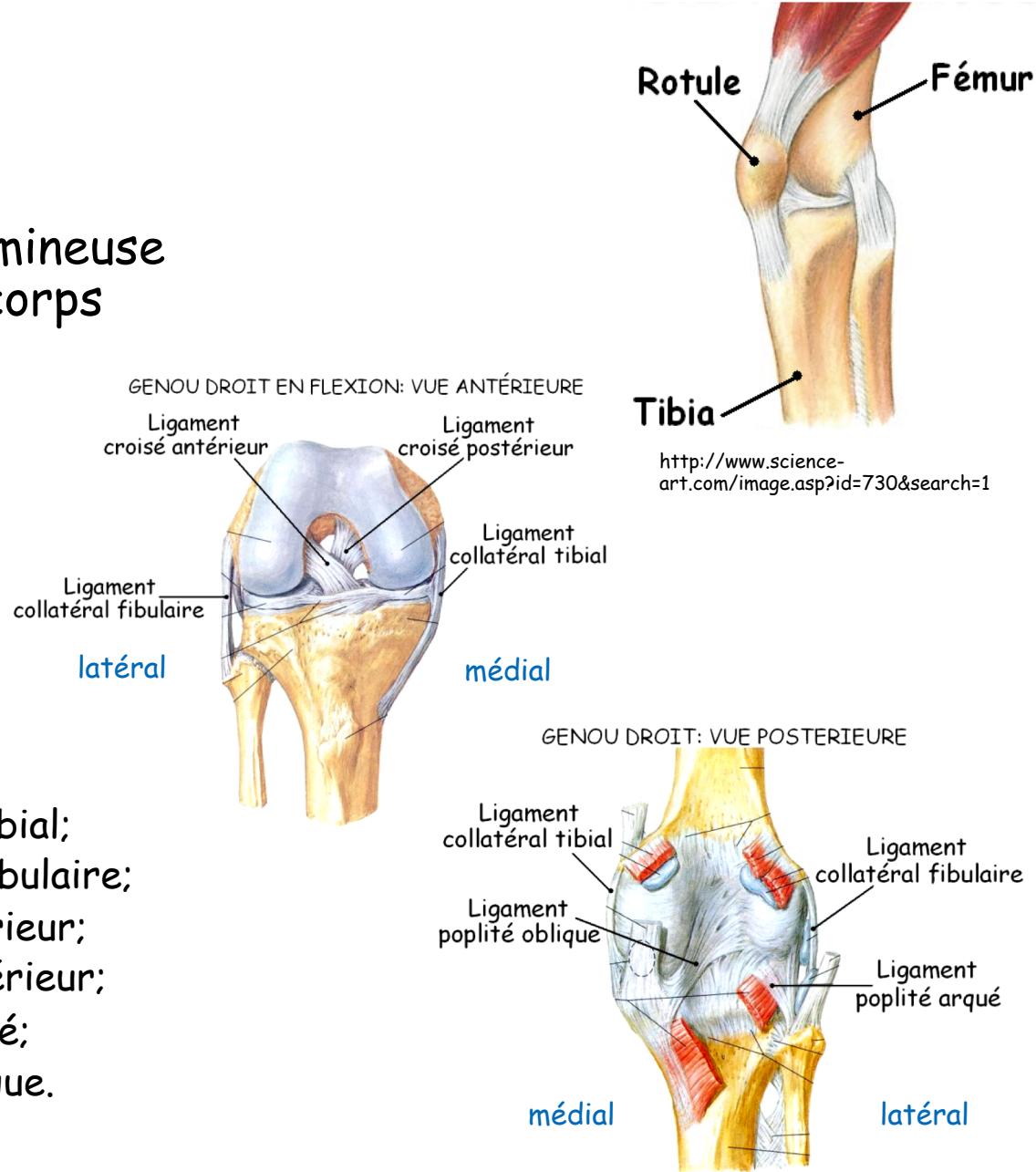


<http://www.toc-stl.com/info/knee.htm>

# Anatomie du genou

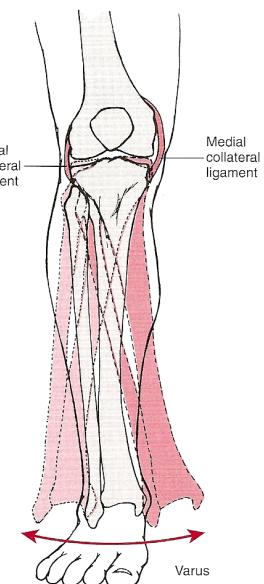
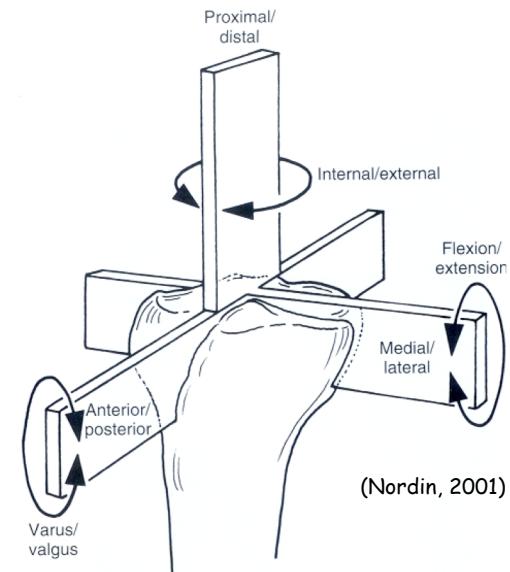
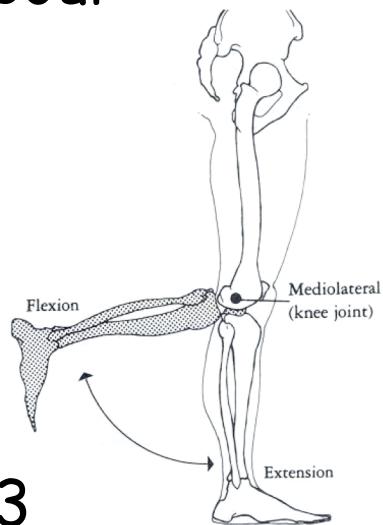
➤ articulation la plus volumineuse et la plus complexe du corps

- 3 os:
  - fémur;
  - tibia;
  - rotule (patella);
- 2 articulations:
  - tibio-fémorale;
  - patello-fémorale;
- 6 ligaments:
  - ligament collatéral tibial;
  - ligament collatéral fibulaire;
  - ligament croisé antérieur;
  - ligament croisé postérieur;
  - ligament poplité arqué;
  - ligament poplité oblique.



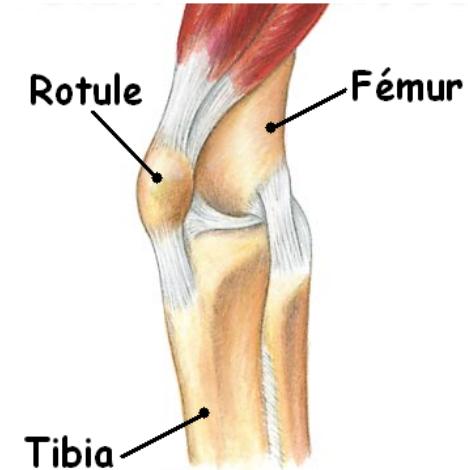
# Rôles

- transmission de charges;
- génération de couple pour les mouvements de la jambe;
- locomotion;

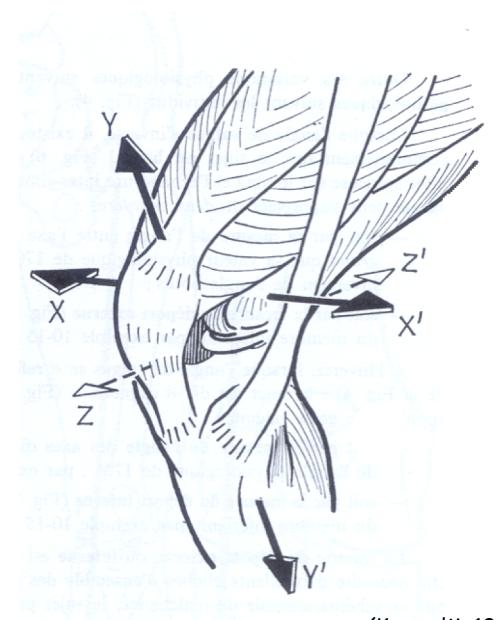


# Articulation tibio-fémorale

- articulation entre fémur et tibia;
- articulation principale du genou;
- degrés de liberté:
  - rotation  $XX'$ : flexion et extension;
  - rotation  $YY'$  : rotation interne/externe;
  - rotation  $ZZ'$  : varus/valgus;
- une des articulations les plus mobiles du corps humain.



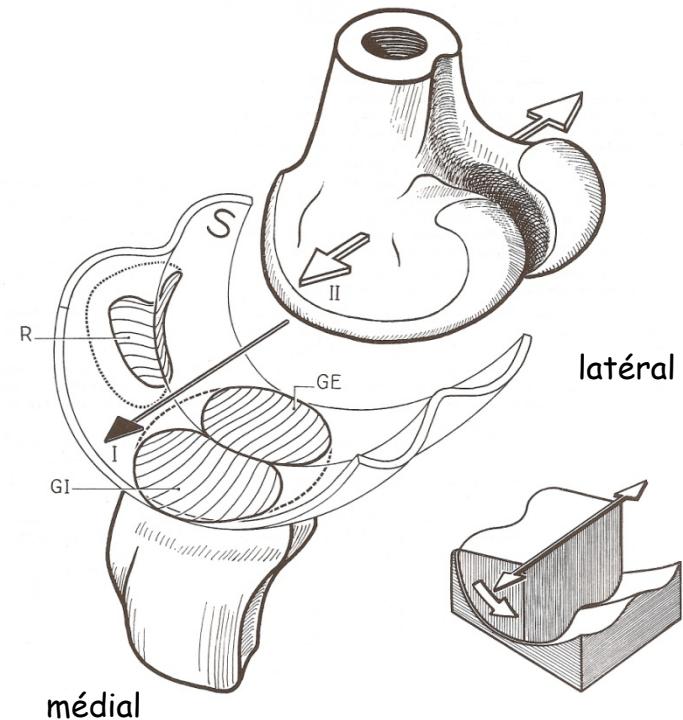
<http://www.science-art.com/image.asp?id=730&search=1>



(Kapandji, 1985)

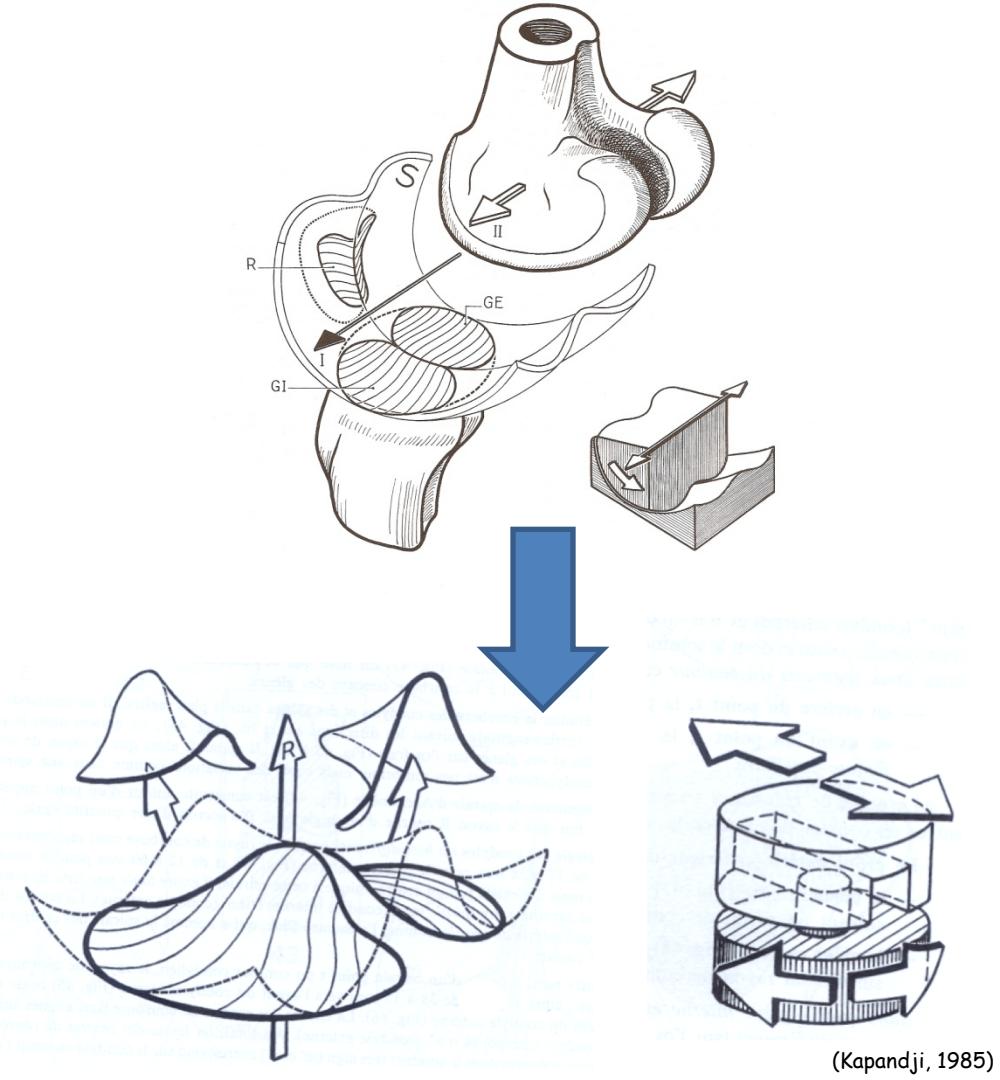
# Articulation tibio-fémorale: flexion/extension

- diarthrose presque trochléenne (ginglyme) à ~1 DDL (rot);
- surfaces articulaires:
  - condyles fémoraux convexes;
  - glènes interne et externe du tibia (concaves);
- axe principal de rotation:
  - axes I et II coïncidents pour l'articulation emboîtée;



# Articulation tibio-fémorale: rotation axiale

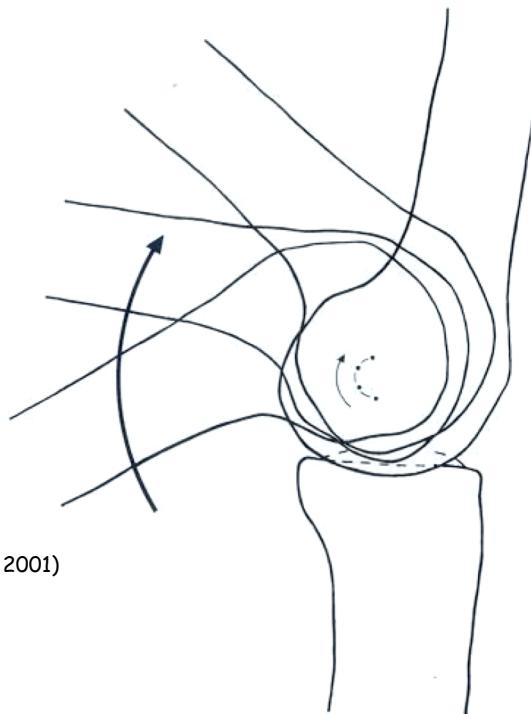
- axe secondaire de rotation:
  - rotation axiale autour de partie centrale surélevée (axe R);
  - possible en flexion du genou;
  - pas possible en extension (rotation de la hanche);



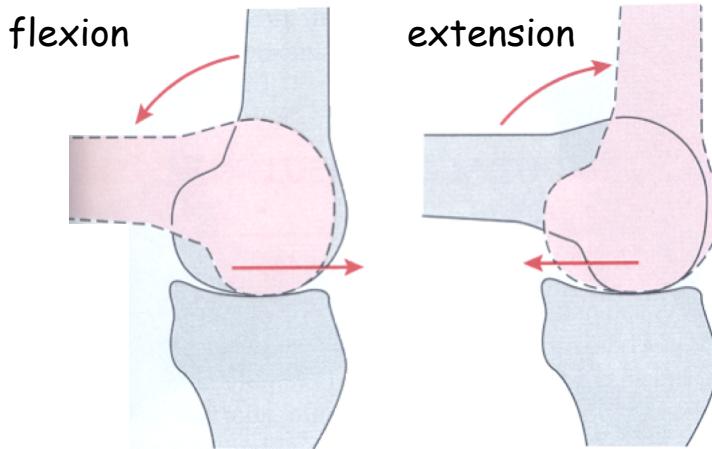
(Kapandji, 1985)

# Articulation tibio-fémorale: CIR

➤ flexion/extension:



(Nordin, 2001)



mouvement du fémur par rapport au tibia:

pendant la **flexion**:  
roulement postérieur  
et glissement antérieur

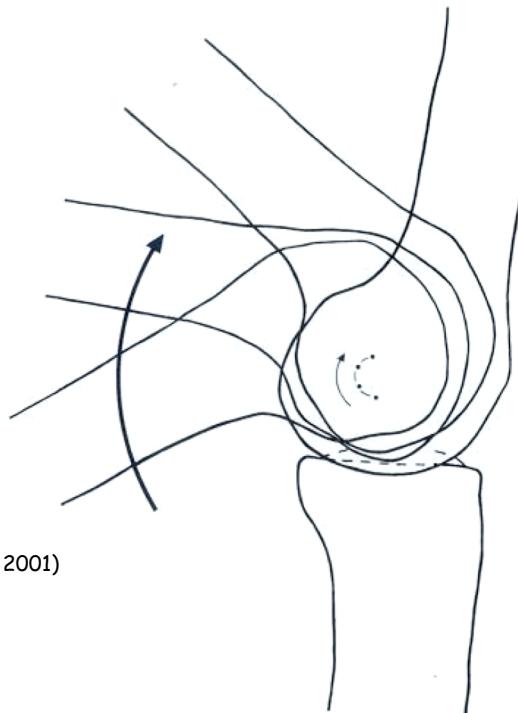
pendant l'**extension**:  
roulement antérieur et  
glissement postérieur

**genou normal:** trajectoire semi-circulaire du **CIR** ⇒ combinaison roulement et glissement

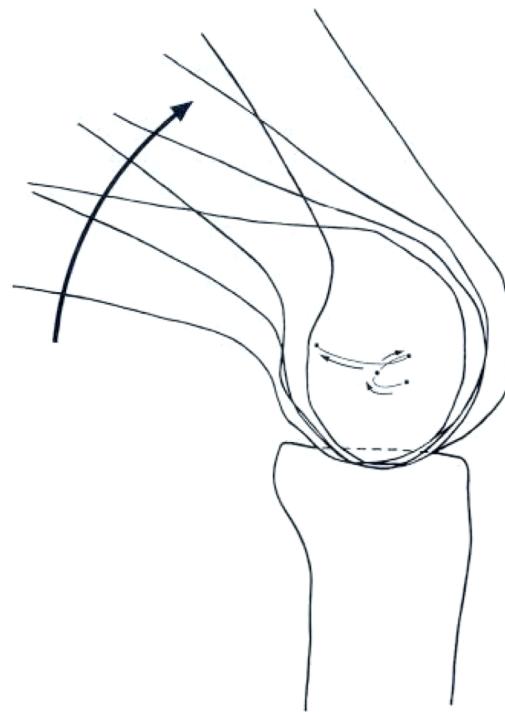
(Oatis, 2004)

# Articulation tibio-fémorale: CIR

➤ flexion/extension:



(Nordin, 2001)



genou normal: trajectoire semi-circulaire du CIR  $\Rightarrow$  combinaison roulement et glissement

genou pathologique:  
modification de la  
trajectoire semi-circulaire

# Articulation tibio-fémorale: rôles des ménisques

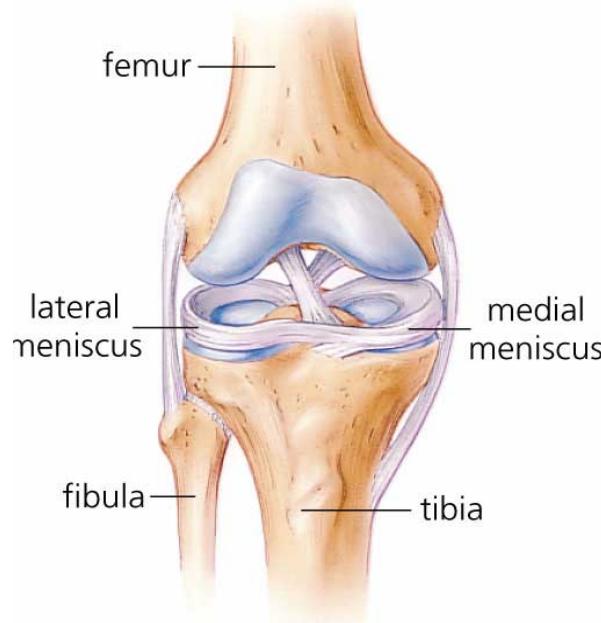
➤ fibro-cartilages (2) d'aspect semi-lunaire présents dans l'articulation tibio-fémorale;

➤ rôle primaire:

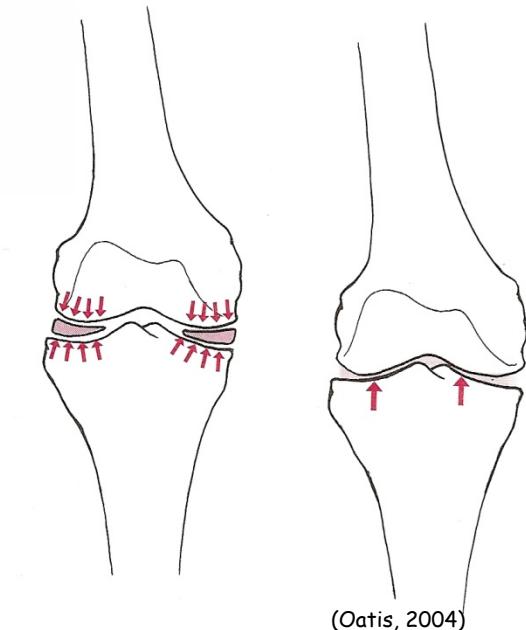
- distribution de la force sur une plus grande surface (~double);

➤ rôles secondaires:

- amortisseur élastique;
- stabilité: barrière physique pour les déplacements.



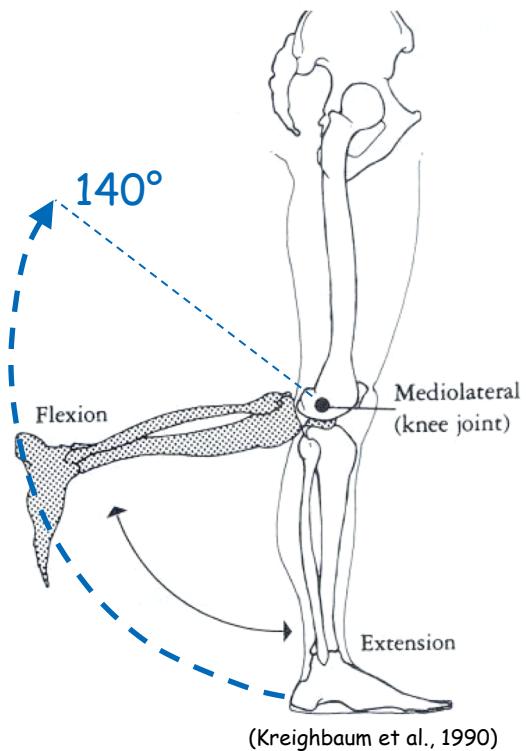
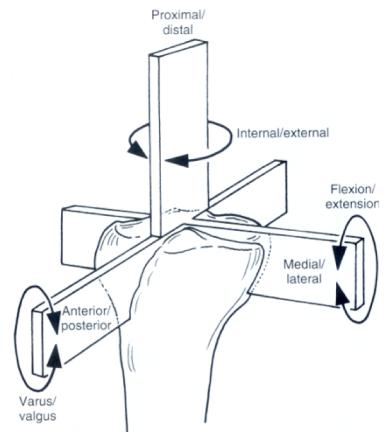
<http://www.answers.com/topic/meniscus>



(Oatis, 2004)

# Amplitude de mouvement: plan sagittal

- mouvements en flexion/extension;
- de loin la plus grande amplitude de mouvement;
- extension complète à flexion complète  
⇒  $0^\circ$  à  $140^\circ$ ;



# Mouvement/plan sagittal et activités

## Range of Tibiofemoral Joint Motion in the Sagittal Plane During Common Activities

Activity	Range of Motion from Knee Extension to Knee Flexion (Degrees)
Walking	0–67°
Climbing stairs	0–83°
Descending stairs	0–90
Sitting down	0–93
Tying a shoe	0–106
Lifting an object	0–117

<sup>a</sup>Data from Kettelkamp et al. (1970). Mean for 22 subjects. A slight difference was found between right and left knees (mean for right knee 68.1°, mean for left knee 66.7°).

<sup>b</sup>These and subsequent data from Laubenthal et al. (1972). Mean for 30 subjects.

(Nordin, 2001)

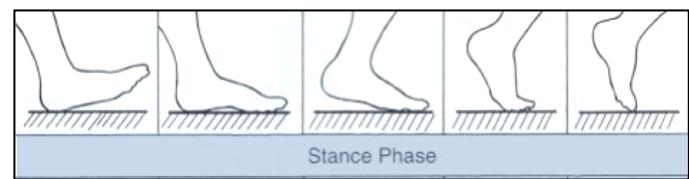
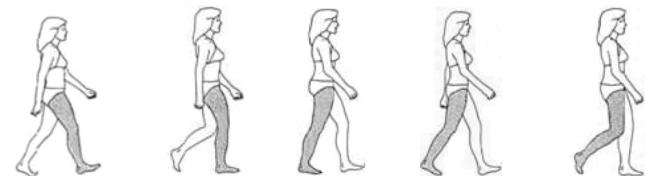
117° sont nécessaires pour les activités de tous les jours

## Amount of Knee Flexion During Stance Phase of Walking and Running

Activity	Range in Amount of Knee Flexion During Stance Phase (Degrees)
Walking	
Slow	0–6
Free	6–12
Fast	12–18
Running	18–30

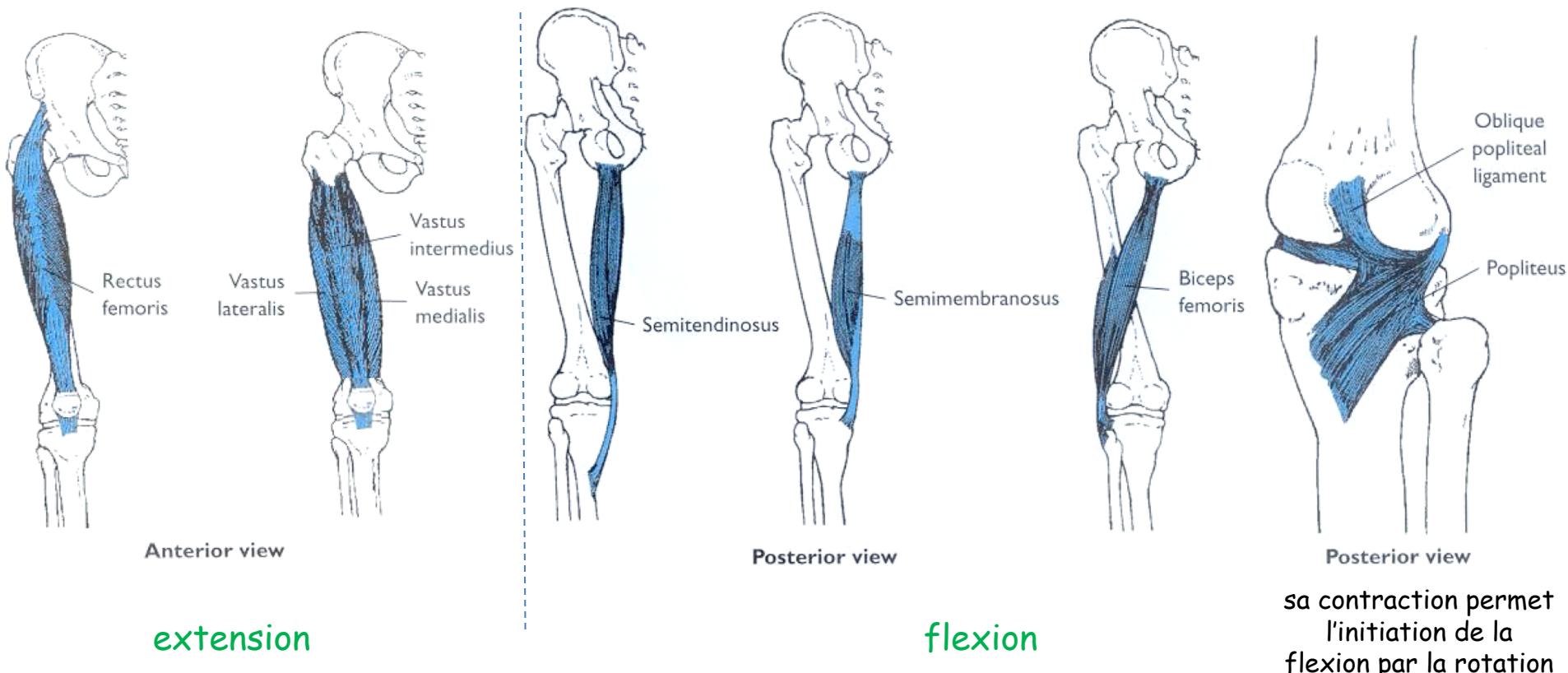
Data from Perry et al. (1977). Range for seven subjects.

flexion maximale pour les mouvements à vitesse élevée



# Amplitude de mouvement: plan sagittal

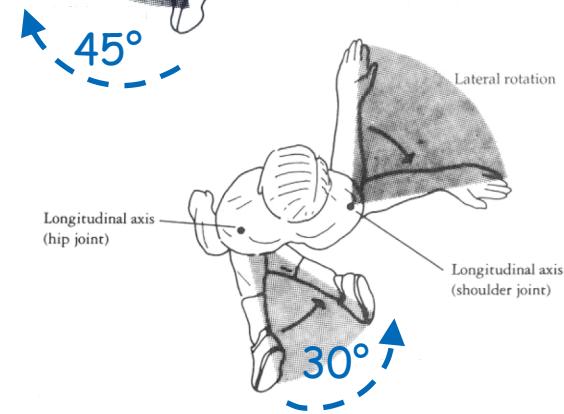
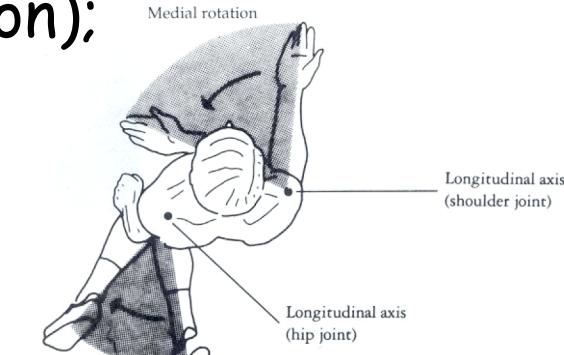
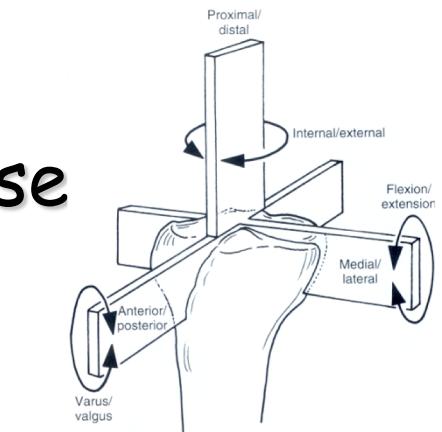
➤ principaux muscles en flexion / extension du genou:



(Hall, 2006)

# Amplitude de mouvement: plan transverse

- mouvements de rotation interne/externe;
- amplitude =  $f$ (amplitude flexion/extension);
  - extension complète: pas de rotation: butée(s) osseuse(s) reliées à l'emboîtement entre le tibia et les condyles du fémur
  - flexion 90°: rotation maximale:
    - interne: 0° à 30°
    - externe: 0° à 45°
  - flexion > 90°: amplitude rotation ↓ : restriction des tissus mous

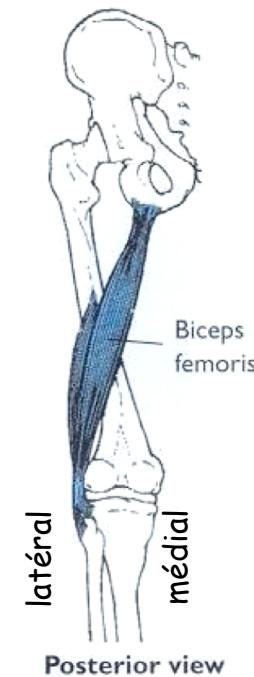
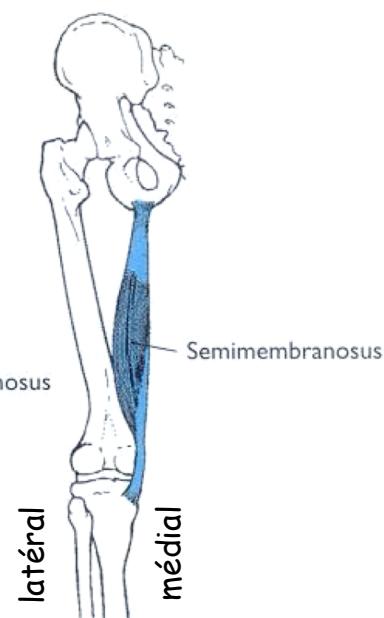
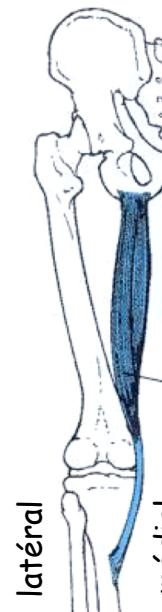
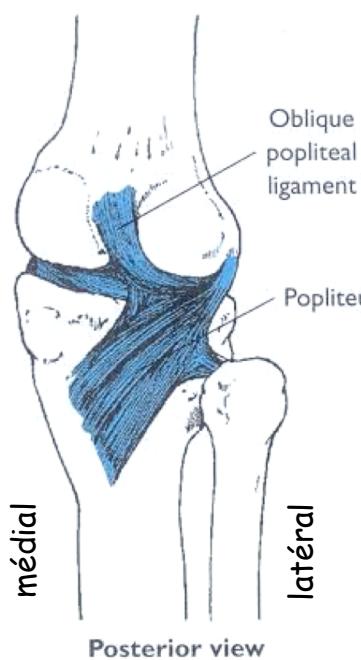


flexion à 90°

(Kreighbaum et al., 1990)

# Amplitude de mouvement: plan transverse

- principaux muscles en rotation interne / externe du genou:



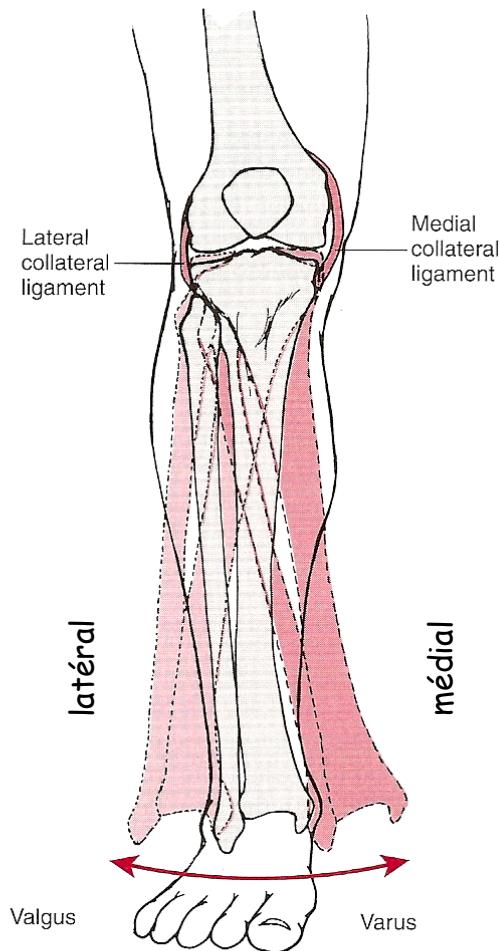
rotation interne  
(tibia p/r fémur)

(Hall, 2006)

rotation externe  
(tibia p/r fémur)

# Amplitude de mouvement: plan frontal

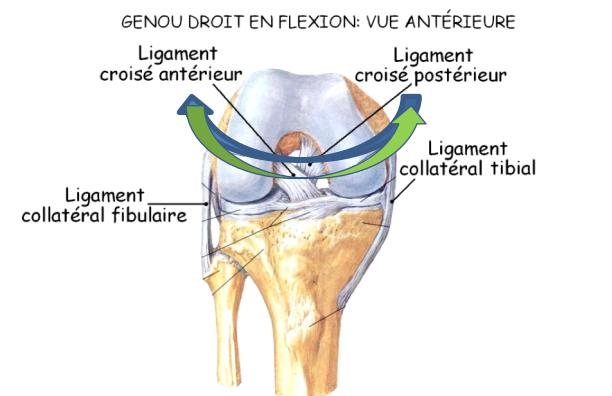
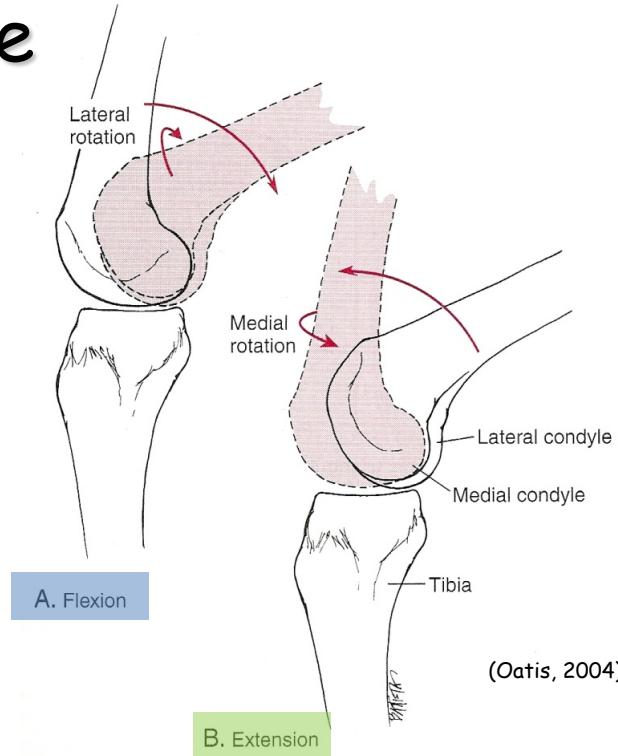
- mouvements de varus et valgus;
- amplitude =  $f$ (amplitude flexion/extension);
  - extension complète: pas de mouvement
  - flexion 30°: mouvement maximal:
    - varus/valgus: qqs degrés seulement
  - flexion > 30°: amplitude mouvement ↓  
(restriction des tissus mous)



(Oatis, 2004)

# Couplage plans sagittal/transverse

- couplage entre flexion/extension et rotation interne/externe (« *screw-home mechanism* »):
  - avec la **flexion** du genou, **rotation externe** du fémur (p/r tibia) (**LCA**);
  - avec l'**extension** du genou, **rotation interne** du fémur (p/r tibia) (**LCP**);
  - élément clé de la stabilité en position debout;
  - **couplage** ⇒ tension accrue dans les **ligaments croisés** ⇒ **meilleure stabilité de l'articulation**



# Modélisation biomécanique: genou

donné:

- o forces externes:  $W_1, W_0$
- o paramètres géométriques:  $a, b, c, \theta, \beta$

demandé:

- o forces internes :  $F_M, F_J$

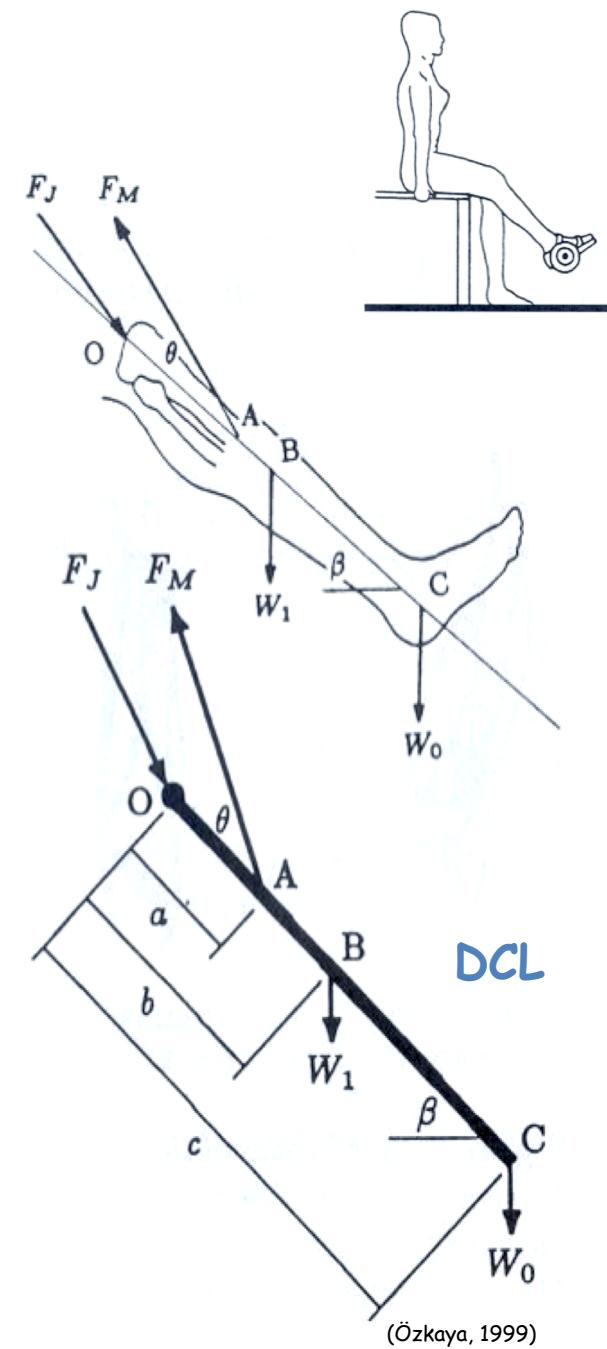
où       $O$ : point de contact à l'articulation

$W_1$ : poids de la jambe

$W_0$ : poids de la botte d'entraînement

$F_M$ : tension exercée par le quadriceps  
sur le tibia       $\Rightarrow 1$  inconnue

$F_J$ : force de réaction à l'articulation  
sur le tibia       $\Rightarrow 2$  inconnues



(Özkaya, 1999)

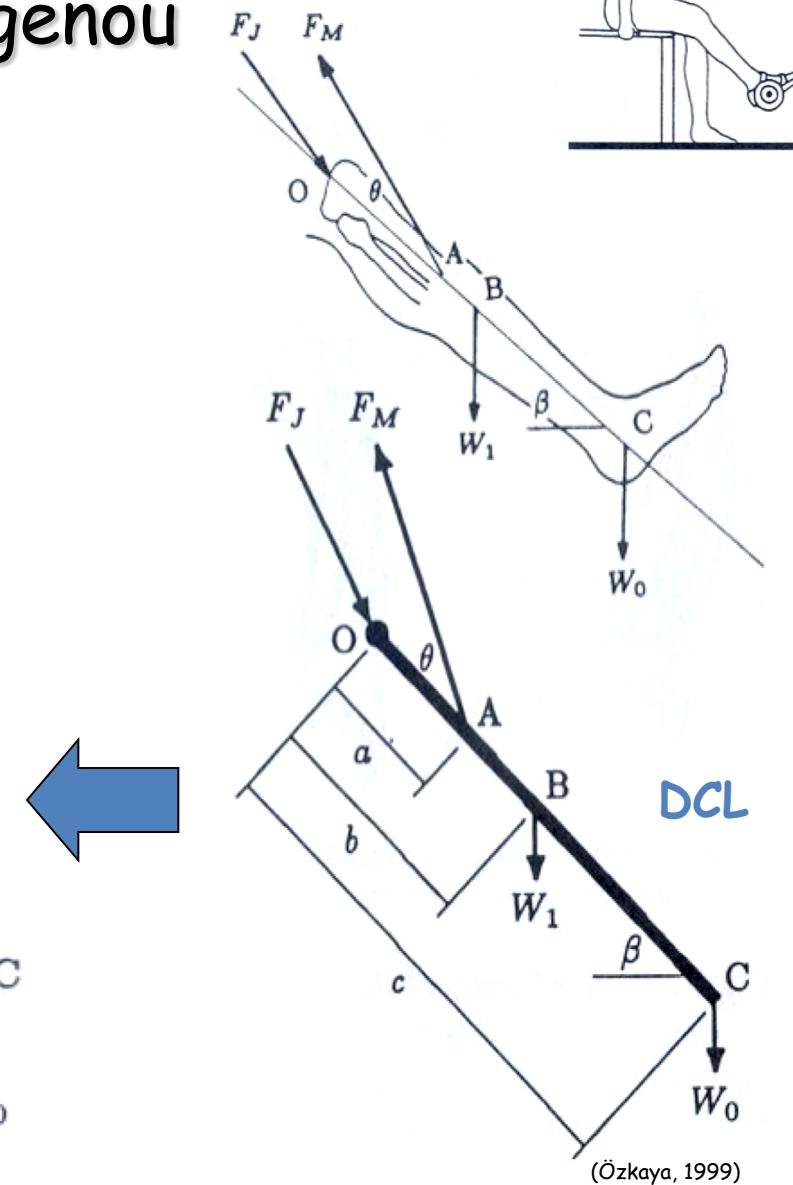
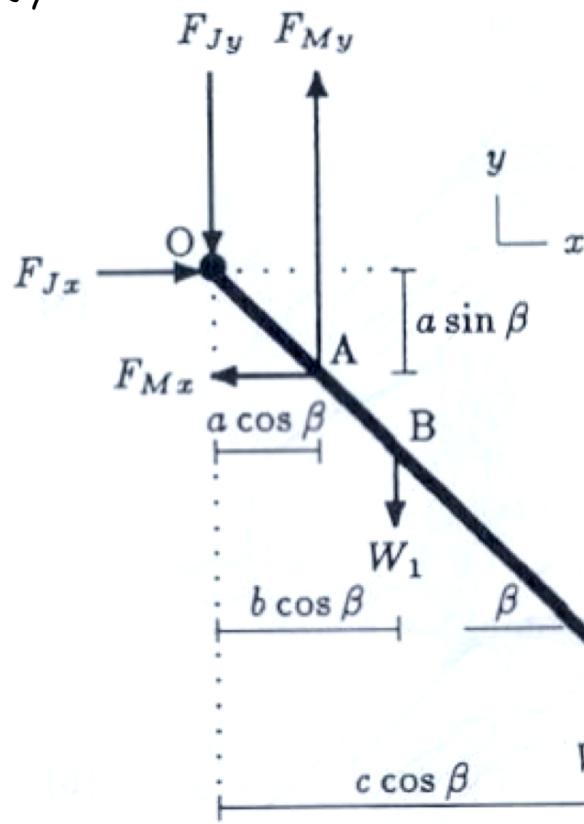
# Modélisation biomécanique: genou

décomposition des forces:

$$F_M = F_{Mx} + F_{My} \rightarrow F_{Mx} = F_M \cos(\theta + \beta)$$

$$F_J = F_{Jx} + F_{Jy}$$

$$F_{Jy} \quad F_{My}$$



# Modélisation biomécanique: genou

équilibre (corps rigide 2D): 3 équations

$$\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0 \quad \sum M_z = 0$$

$\sum M_O = 0 :$

$$(a \cos \beta) F_{My} - (a \sin \beta) F_{Mx} - (b \cos \beta) W_1 - (c \cos \beta) W_0 = 0$$

$$F_M = \frac{(b W_1 + c W_0) \cos \beta}{a [\cos \beta \sin(\theta + \beta) - \sin \beta \cos(\theta + \beta)]} \rightarrow F_M = 1381 \text{ N,}$$

$\sum F_x = 0 :$

$$F_{Jx} = F_{Mx} = F_M \cos(\theta + \beta) = 691 \text{ N}$$

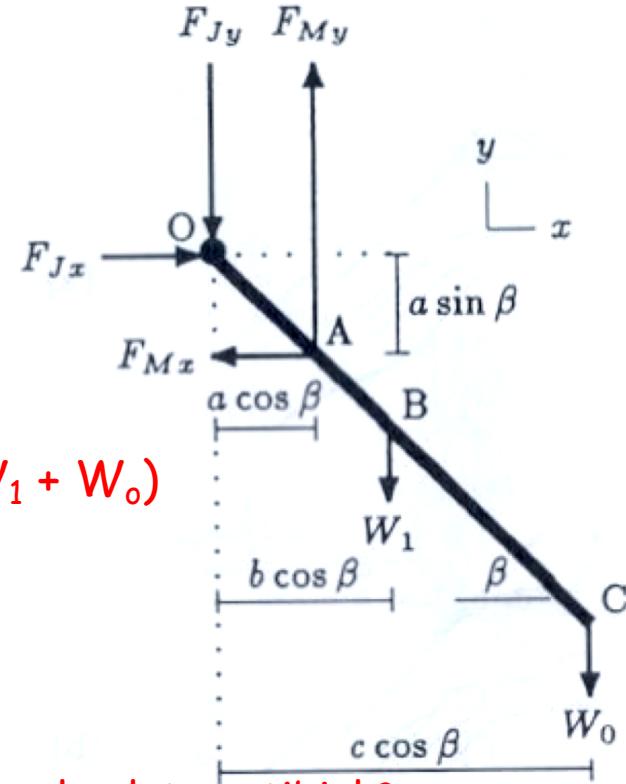
$\sum F_y = 0 :$

$$F_{Jy} = F_{My} - W_0 - W_1$$

$$F_{Jy} = F_M \sin(\theta + \beta) - W_0 - W_1 = 946 \text{ N}$$

$$F_J = \sqrt{(F_{Jx})^2 + (F_{Jy})^2} \rightarrow F_J = 1171 \text{ N}$$

$a = 12 \text{ cm}, b = 22 \text{ cm}, c = 50 \text{ cm}$   
 $W_1 = 150 \text{ N}, W_0 = 100 \text{ N}$   
 $\theta = 15^\circ, \beta = 45^\circ$



Quelles sont les composantes de compression/cisaillement sur le plateau tibial ?

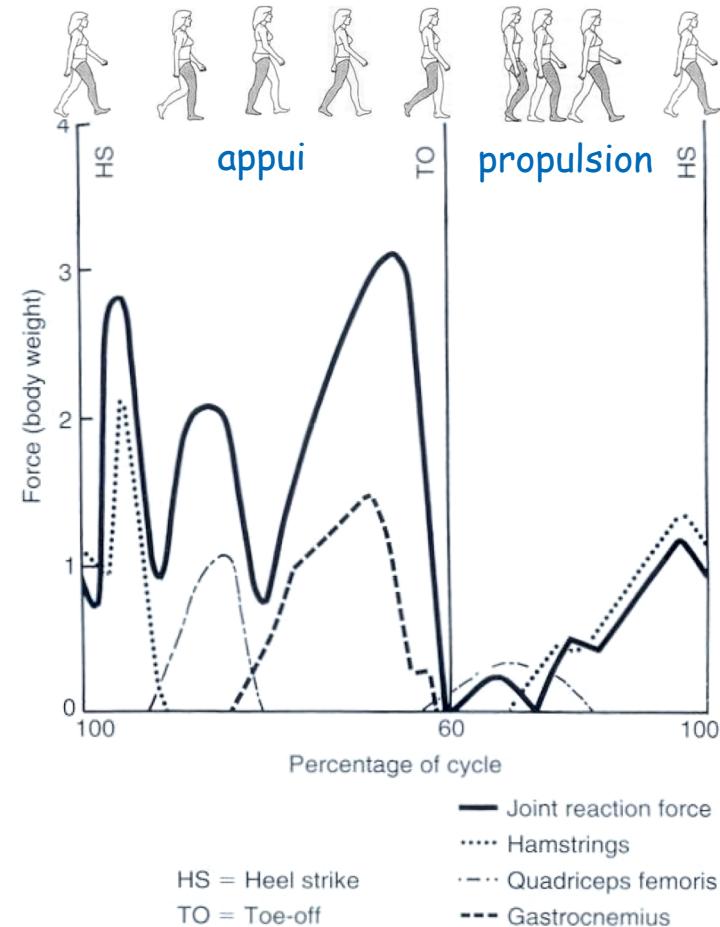
(Özkaya, 1999)

# Force de réaction: cycle de la marche/activités

➤ forces de réaction transmises à travers le plateau tibial durant la marche (1 cycle);

- phase d'appui: force de réaction =
  - plusieurs fois le poids du corps;
  - coïncidente avec contractions musculaires;
- phase de propulsion: force de réaction  $\leq$  poids du corps;

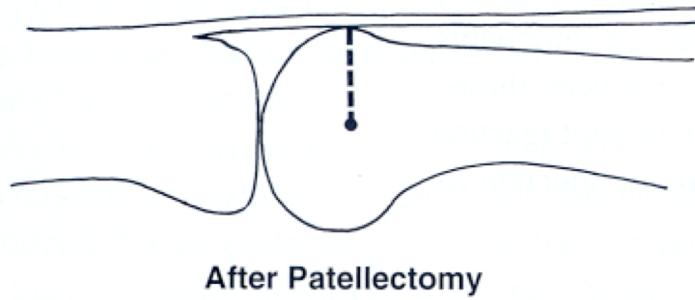
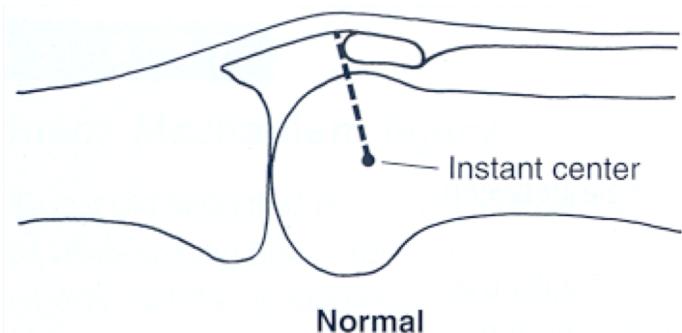
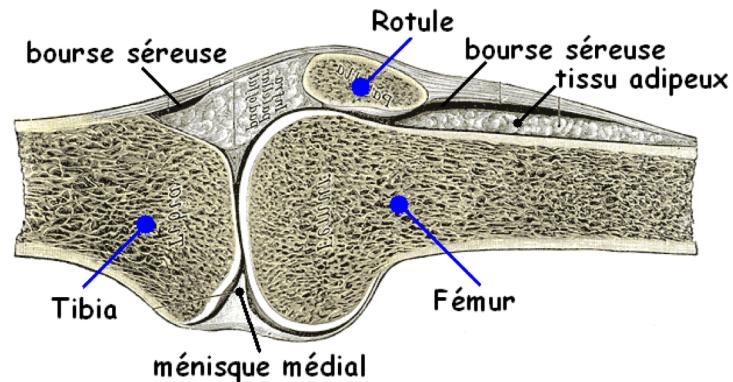
- marche: 3 - 3.5 BW;
- montée escalier: 4 BW;
- squat: 5 BW



(Nordin, 2001)

# Articulation patello-fémorale

- articulation entre fémur et rotule;
- rôles de la rotule:
  - bras de levier pour le muscle quadriceps en extension;
  - protection de l'articulation.

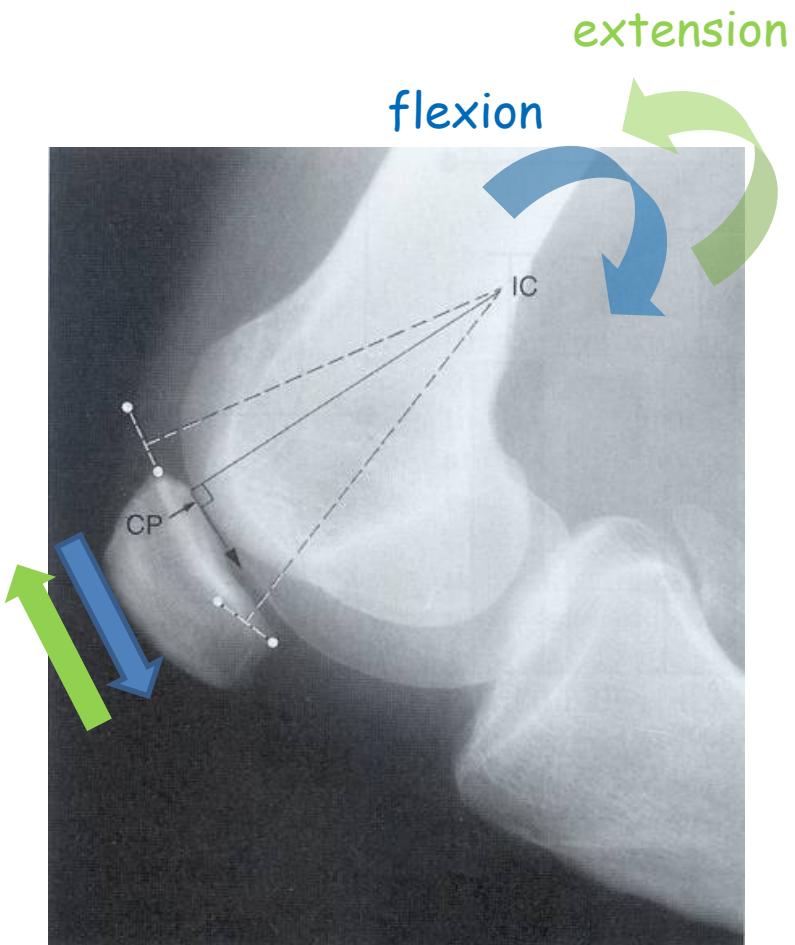


(Nordin, 2001)

# Articulation patello-fémorale

## ➤ plan sagittal:

- contact avec la face médiale du fémur uniquement;
- en **flexion**: glissement distal de la rotule sur le fémur;
- en **extension**: glissement proximal de la rotule sur le fémur.



(Nordin, 2001)

# Modélisation biomécanique: rotule

donné:

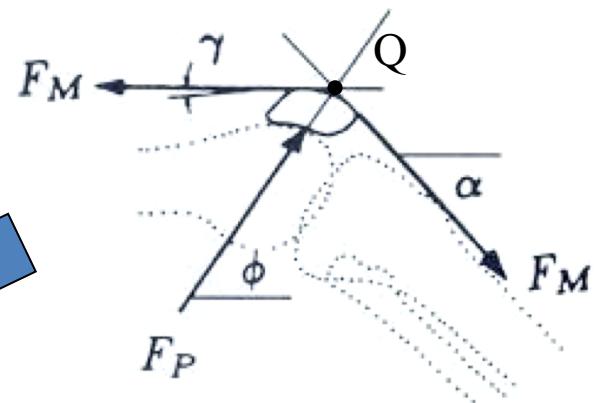
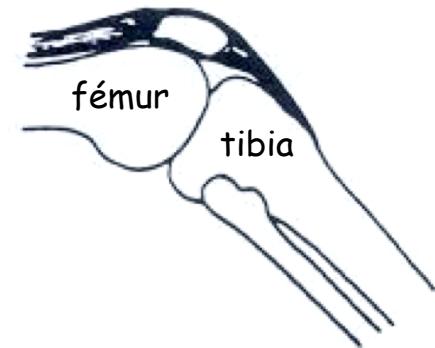
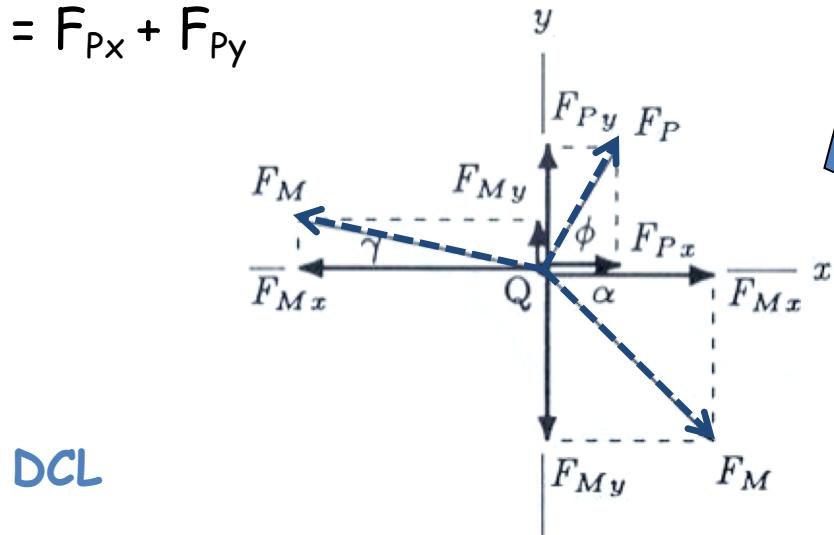
- paramètres géométriques:  $\alpha, \gamma$
- force musculaire quadriceps:  $F_M$

demandé:

- force de réaction à l'articulation patello-fémorale:  $F_P \Rightarrow 2$  inconnues ( $F_P$  et  $\phi$ )

décomposition des forces:

$$F_P = F_{Px} + F_{Py}$$



(Özkaya, 1999)

# Modélisation biomécanique: rotule

équilibre (particule 2D): 2 équations

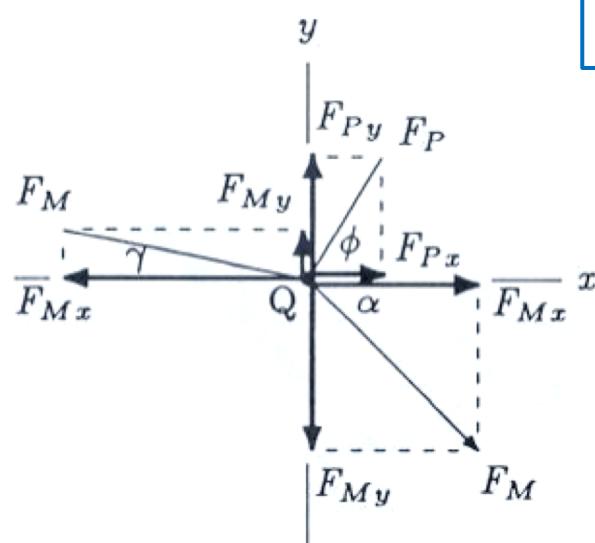
$$\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0$$

$$\sum F_x = 0 :$$

$$F_P \cos \phi = F_M (\cos \gamma - \cos \alpha) = F_{Px}$$

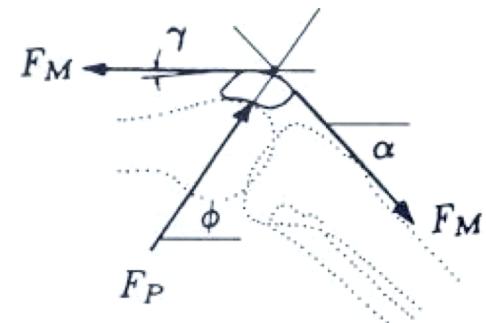
$$\sum F_y = 0 :$$

$$F_P \sin \phi = F_M (\sin \alpha - \sin \gamma) = F_{Py}$$



$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{F_{Py}}{F_{Px}} \right)$$

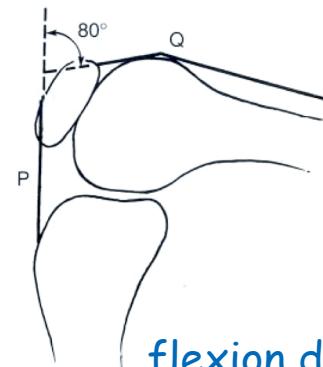
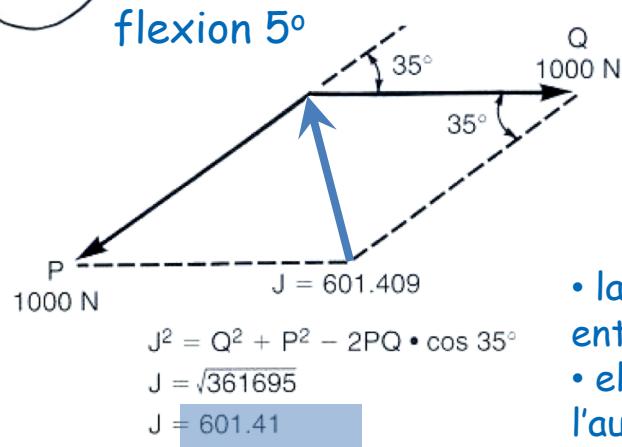
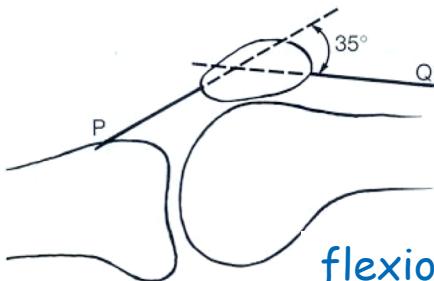
$$F_P^2 = (F_{Px}^2 + F_{Py}^2)$$



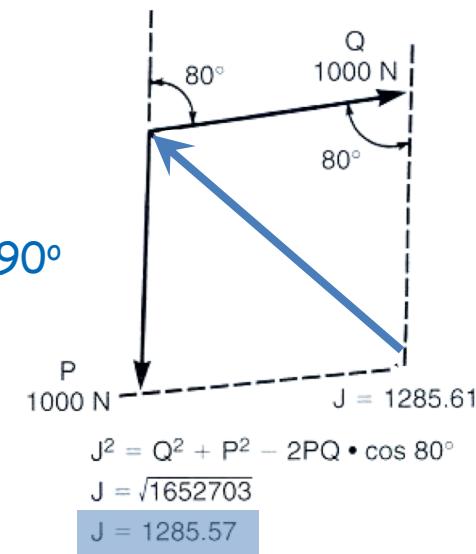
(Özkaya, 1999)

# Analyse statique

- force de réaction à l'articulation patello-fémorale dépend du degré de flexion/extension;
- plus la flexion ↑, plus la force de réaction ↑



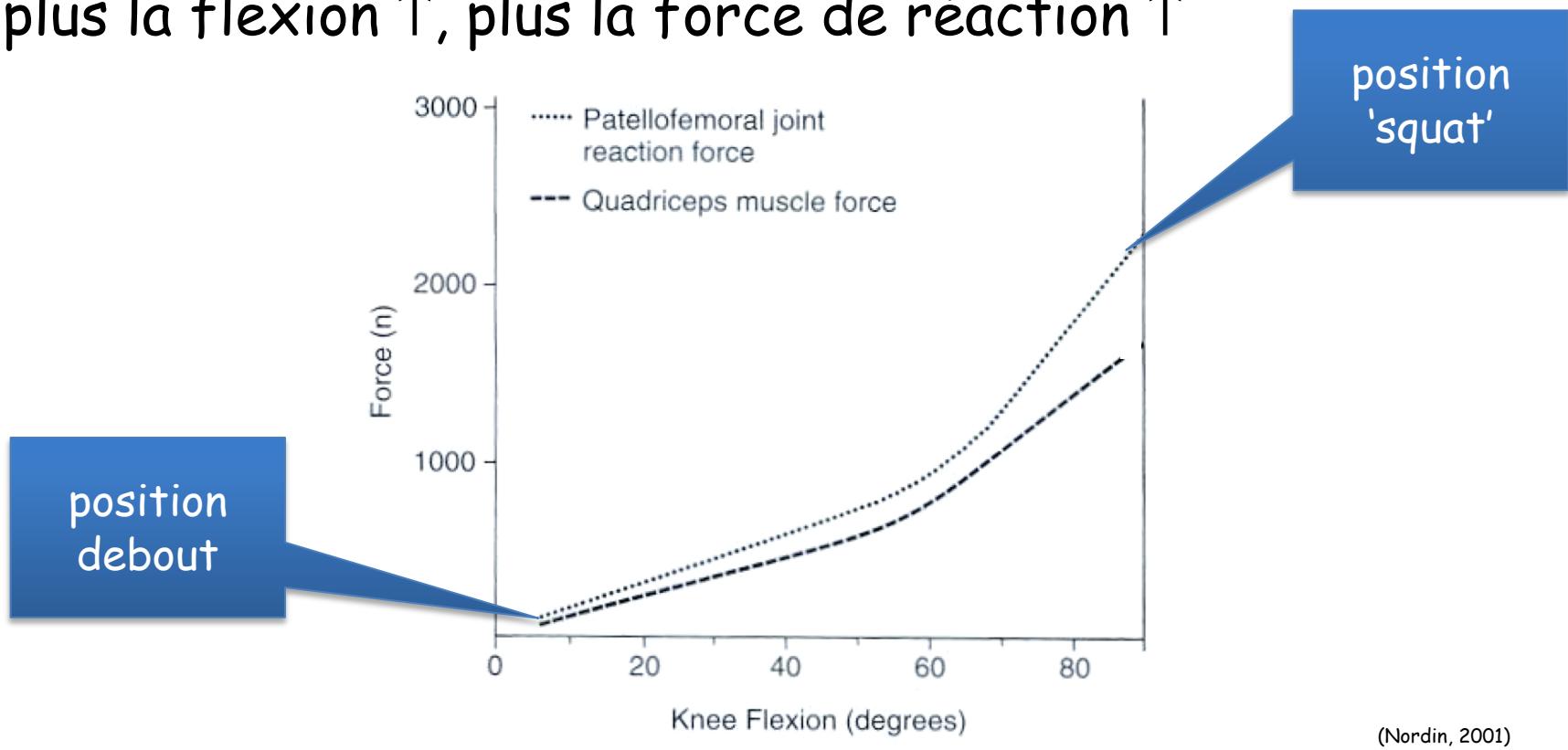
flexion de 90°



- la force de réaction double entre 5° et 90° de flexion;
- elle est compensée par l'augmentation de surface de contact.

# Articulation patello-fémorale : force de réaction

- force de réaction à l'articulation fémoro-patellaire est fonction du degré de flexion/extension;
- plus la flexion ↑, plus la force de réaction ↑



(Nordin, 2001)

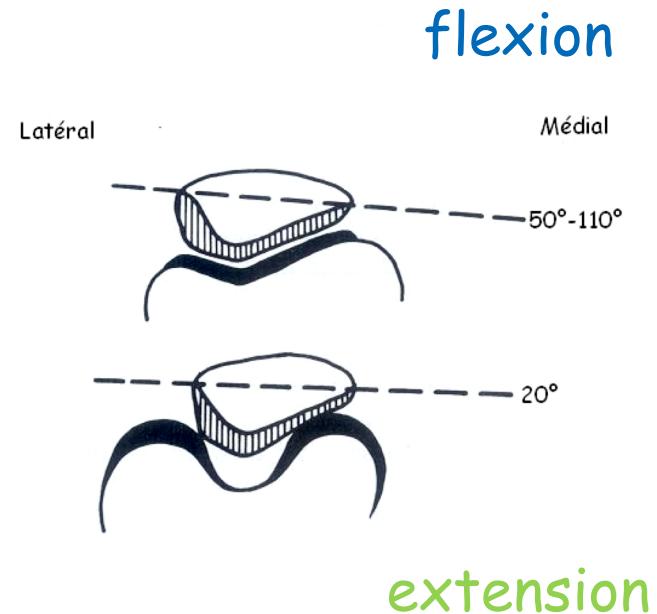
# Articulation patello-fémorale : force de contact

- Walking: 0.5 bw
- Stair climbing: 3.3 bw
- Squat: 7.6 bw
- Rising from chair: 3.1 bw
- Jumping: 20 bw

bw = poids du corps (body weight)

# Articulation patello-fémorale : contact rotule/fémur

- aire de contact rotule et fémur =  
 $f(\text{amplitude flexion/extension})$ :
  - aire de contact augmente avec la flexion;
    - **flexion**: rotule enfoncée dans le sillon patellaire;
    - **extension**: rotule en contact avec facettes latérale et médiale du fémur.



# Thème 7: Biomécanique du membre inférieur

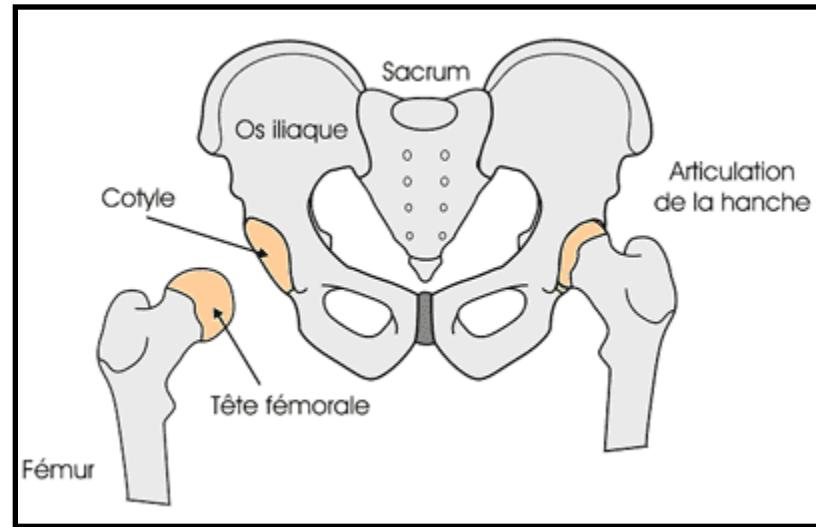
- généralités;
- biomécanique du genou;
- biomécanique de la hanche;
- (biomécanique de la cheville)



# Thème 7: Biomécanique du membre inférieur

## ➤ biomécanique de la hanche:

- anatomie et rôles;
- articulation coxo-fémorale et mouvements;
- modélisation biomécanique.

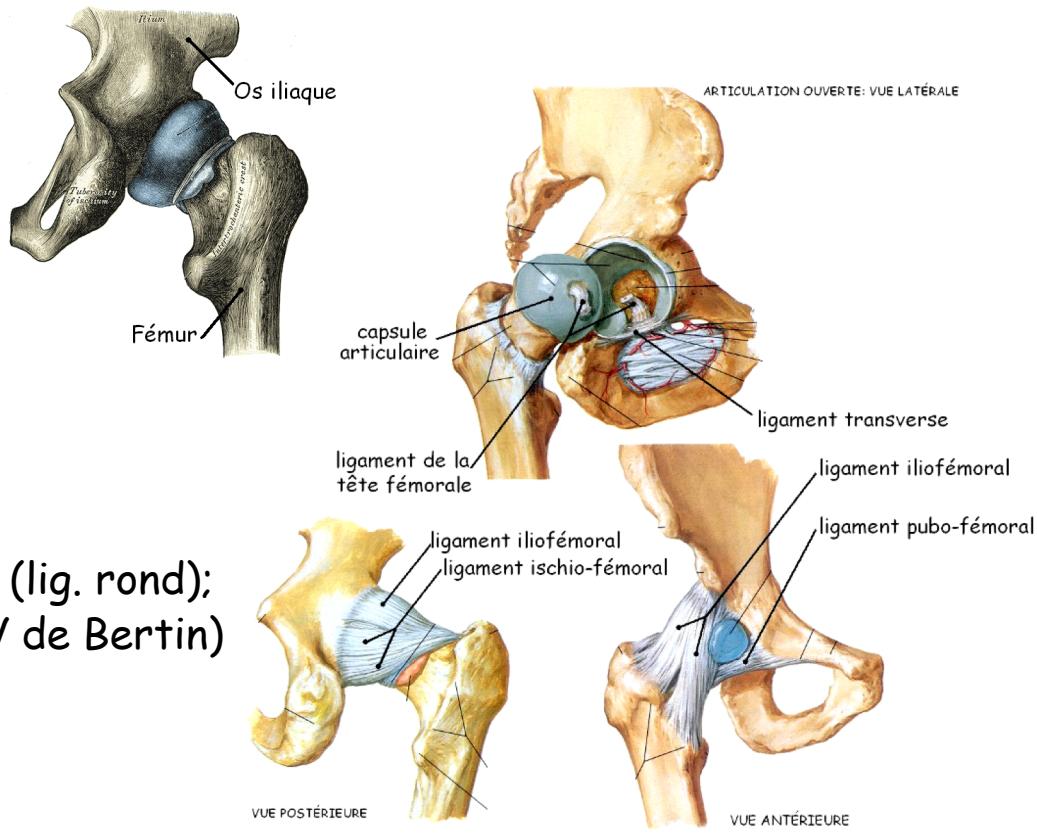


[http://www.chu-lyon.fr/internet/chu/etablissements/heh/pavillon\\_t/heh\\_soins\\_prothese\\_totale\\_hanche.htm](http://www.chu-lyon.fr/internet/chu/etablissements/heh/pavillon_t/heh_soins_prothese_totale_hanche.htm)

# Anatomie de la hanche

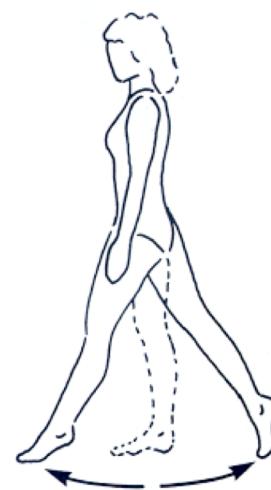
- une des articulations les plus volumineuses;
- articulation la plus stable du corps:

- 2 os:
  - fémur;
  - os iliaque;
- 1 articulation:
  - coxo-fémorale;
- 6 ligaments:
  - capsule articulaire;
  - ligament de la tête fémorale (lig. rond);
  - ligament iliofémoral (lig. en V de Bertin)
  - ligament ischio-fémoral;
  - ligament pubo-fémoral;
  - ligament transverse.

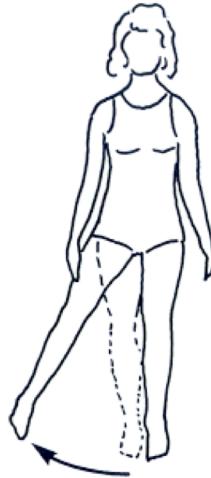


# Rôles

- transmission de charges;
- génération de couple pour les mouvements de la cuisse;
- mouvement / locomotion;
- mouvements non négligeables dans les 3 plans, mais plus importants dans le plan sagittal;



Flexion



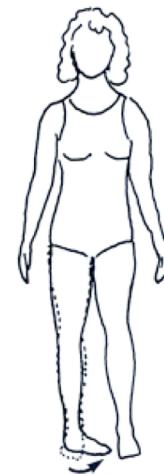
Abduction



Adduction



External  
rotation

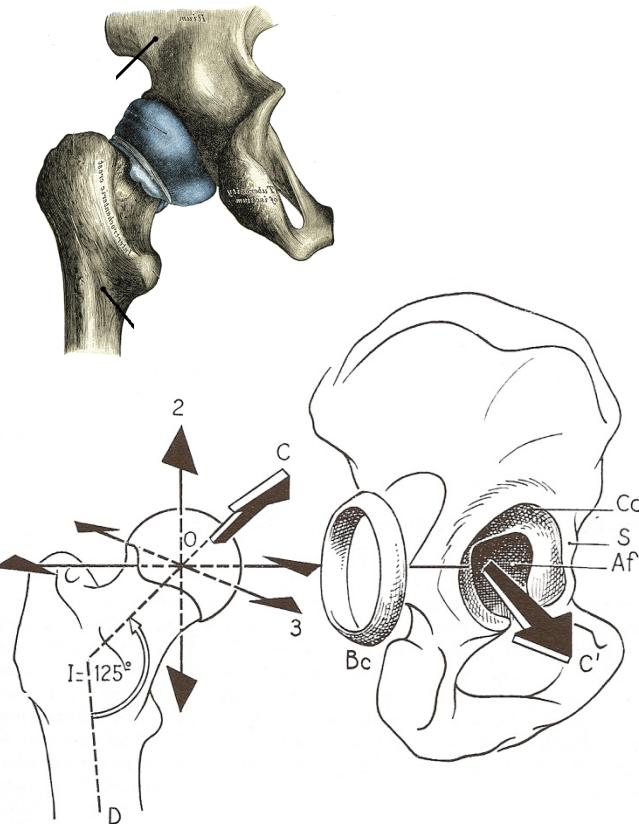


Internal  
rotation

(Nordin, 2001)

# Articulation coxo-fémorale

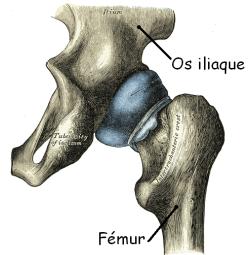
- énarthrose à 3 DDL (rot);
- surfaces articulaires:
  - acétabulum (cavité cotyloïde):
    - partie concave et profonde, sphère formant un croissant ouvert vers le bas + cartilage articulaire;
    - bourrelet cotyloïdien (ou bourrelet acétabulaire ou Labrum acétabulaire) entourant la cavité cotyloïde = fibrocartilage;
  - tête fémorale:
    - partie convexe, 2/3 d'une sphère de ~45 mm de diamètre;
    - recouverte de cartilage articulaire;



dia.acétabulum < dia.tête fémorale



distribution uniforme  
des charges

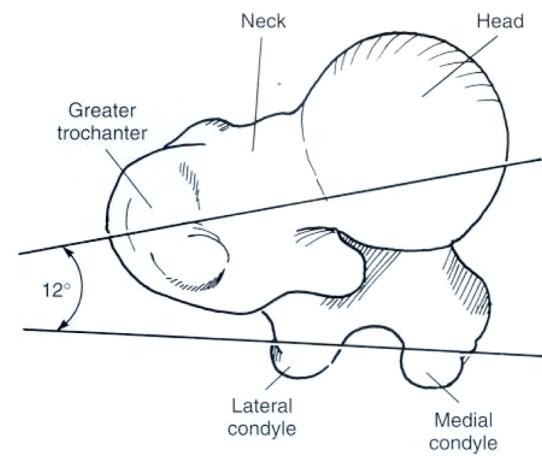
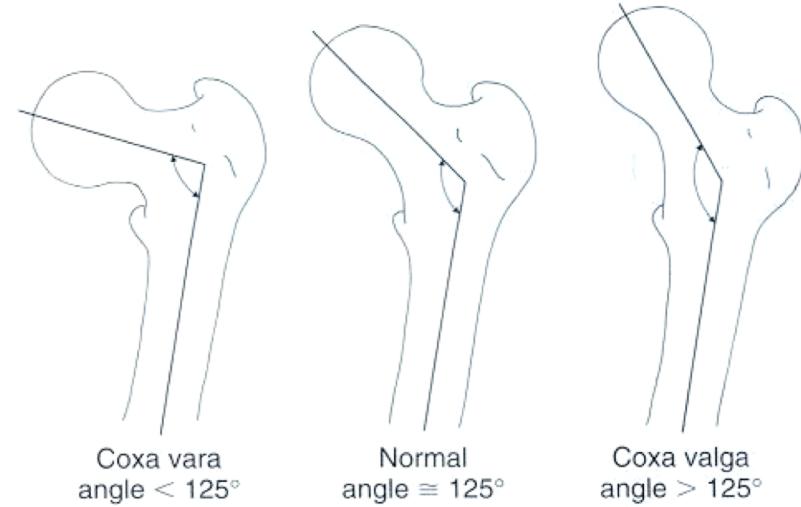


# Articulation coxo-fémorale: col fémoral

➤ 2 relations angulaires importantes :

- **angle cervico-diaphysaire:** angle formé par le col du fémur et la diaphyse du fémur;
- **angle d'antéversion:** angle d'intersection entre l'axe de la tête fémorale et l'axe des condyles fémoraux;

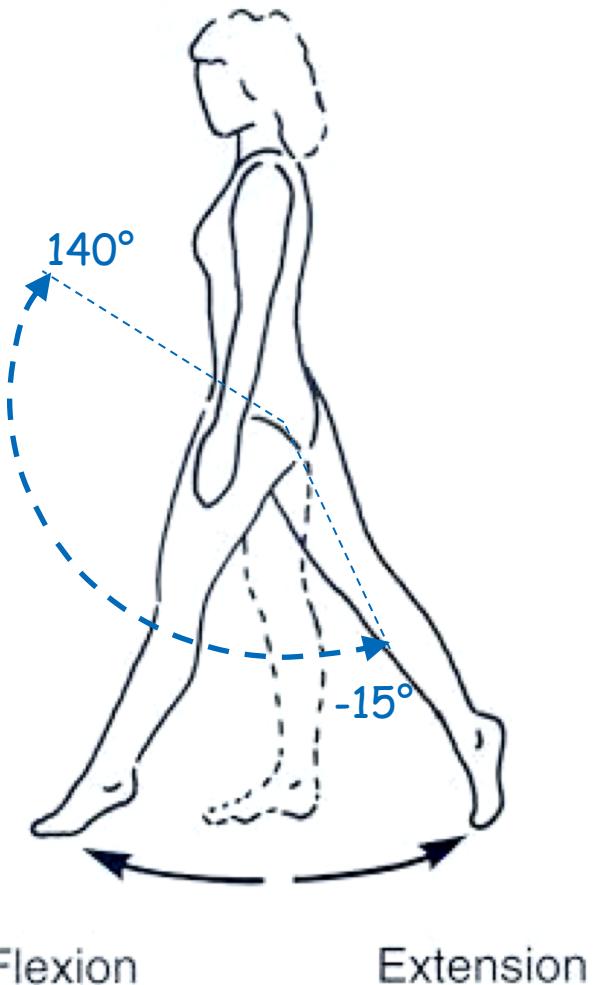
➤ modification p/r conditions physiologiques ⇒ modification dans le transfert de charges.



(Nordin, 2001)

# Amplitude de mouvement: plan sagittal

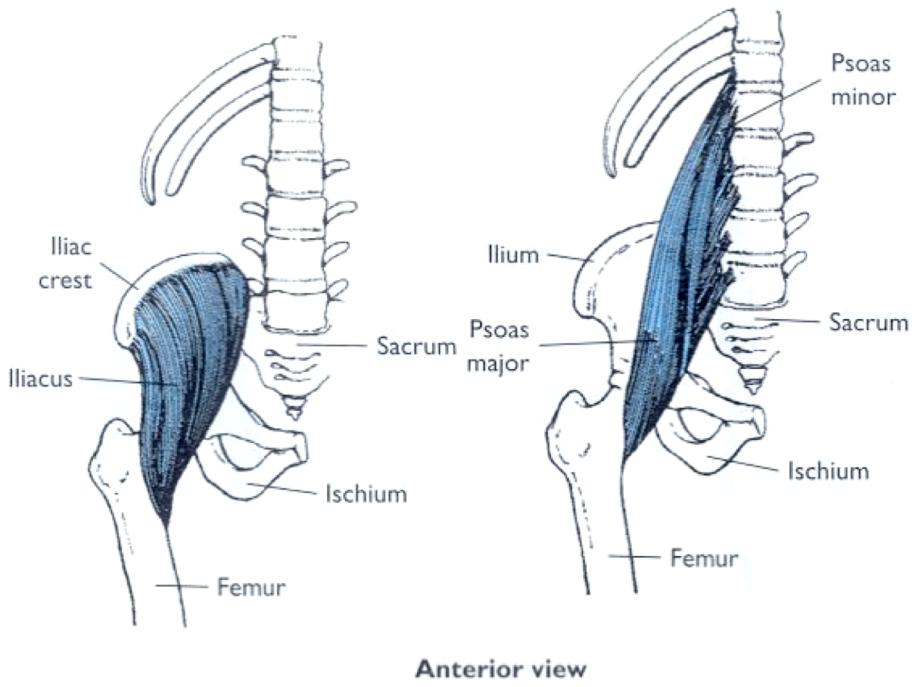
- mouvements en flexion/extension;
- plus grande amplitude de mouvement qu'en frontal et transverse;
- extension complète à flexion complète  
⇒  $-15^\circ$  à  $140^\circ$ ;



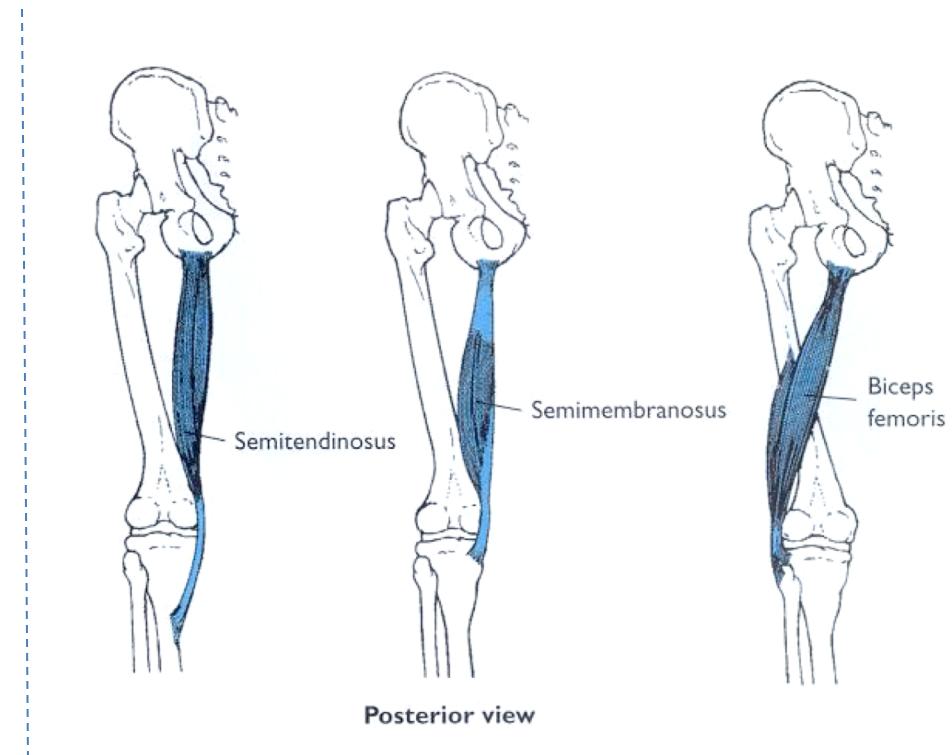
(Nordin, 2001)

# Amplitude de mouvement: plan sagittal

➤ principaux muscles en flexion / extension de la hanche:



flexion

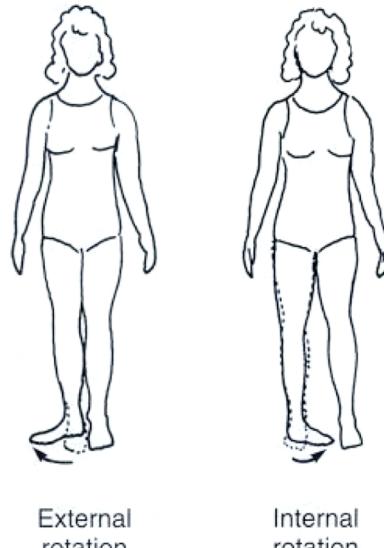


extension

# Amplitude de mouvement: plan transverse

- mouvements de rotation interne/externe;
- amplitude =  $f$ (amplitude flexion/extension);

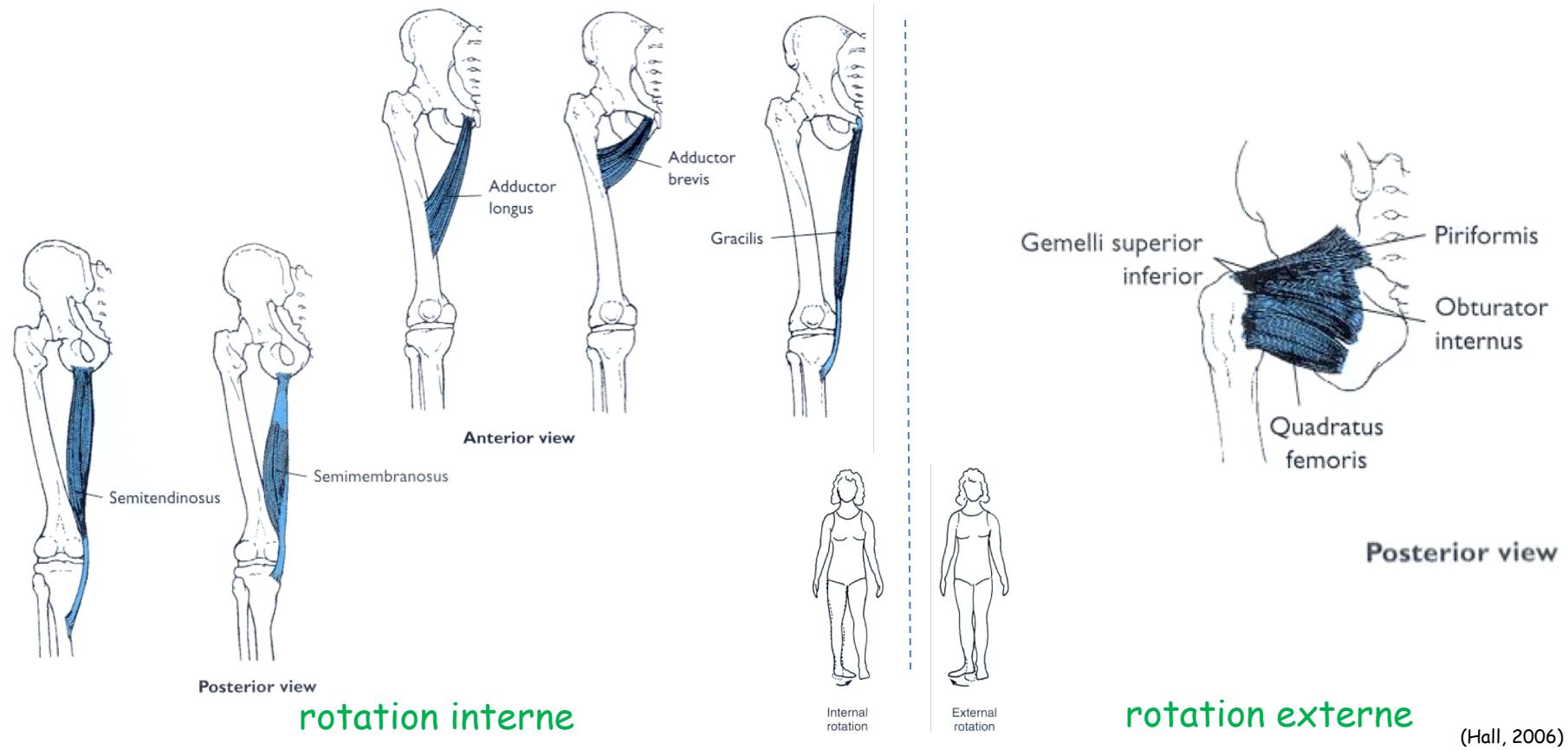
- flexion : rotation maximale
  - interne: 0° à 30/40°;
  - externe: 0° à 40/60°;
- extension: moins de rotation (restriction des tissus mous);



(Nordin, 2001)

# Amplitude de mouvement: plan transverse

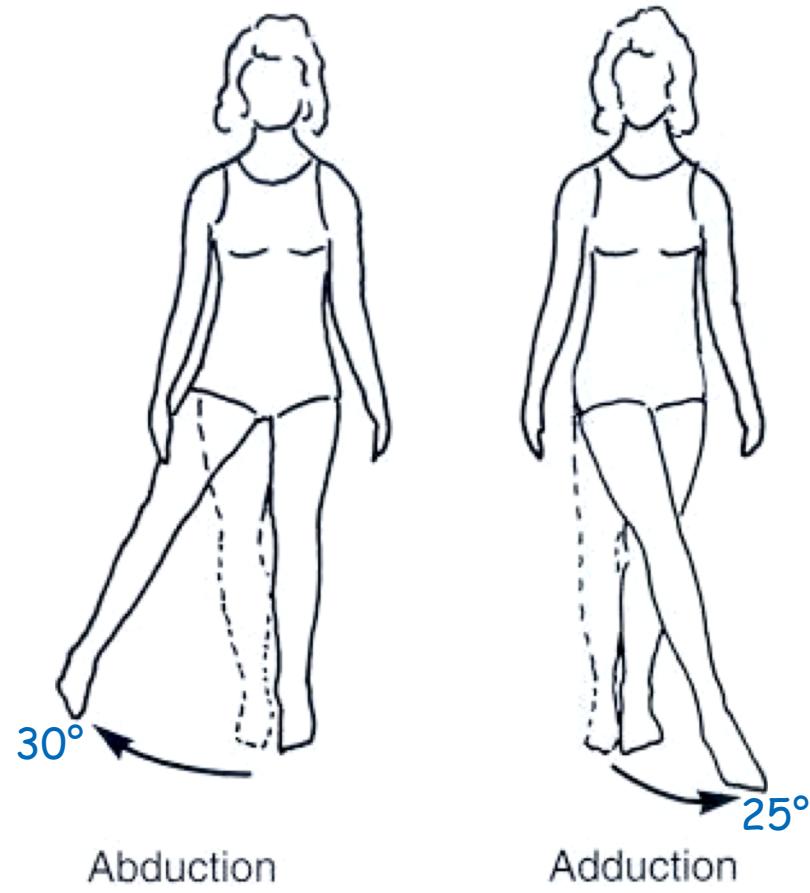
- principaux muscles en rotation interne / externe de la hanche:



# Amplitude de mouvement: plan frontal

➤ mouvements d'abduction et d'adduction;

- abduction:  $0^\circ$  à  $30^\circ$ ;
- adduction:  $0^\circ$  à  $25^\circ$ ;



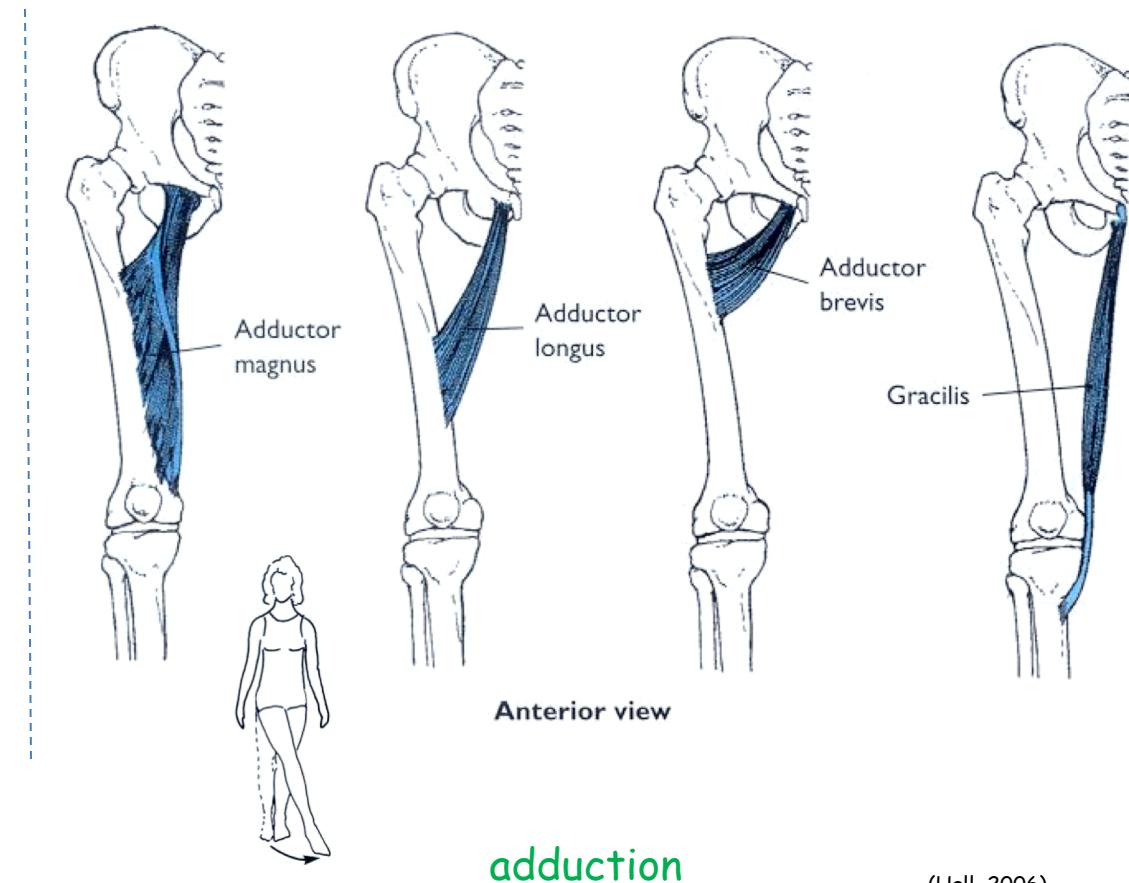
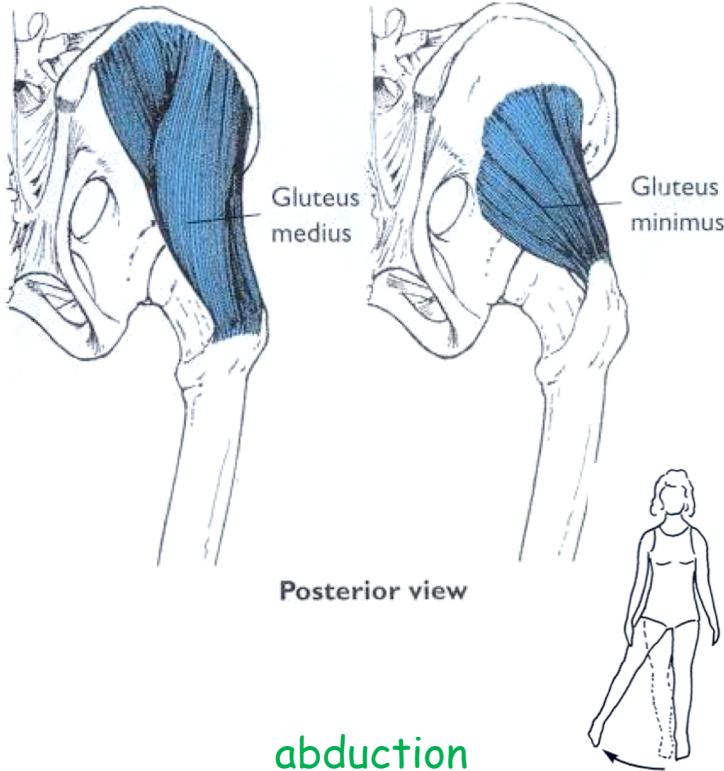
Abduction

Adduction

(Nordin, 2001)

# Amplitude de mouvement: plan frontal

- principaux muscles en abduction / adduction de la hanche:



(Hall, 2006)

# Mouvements hanche et activités

- amplitudes requises pour activités quotidiennes:
  - 40-120° en flexion;
  - 15-25° en abduction;
  - 15-30 ° rotation externe.

Mean Values for Maximum Hip Motion in Three Planes During Common Activities

Activity	Plane of Motion	Recorded Value (Degrees)
Tying shoe with foot on floor	Sagittal	124
	Frontal	19
	Transverse	15
Tying shoe with foot across opposite thigh	Sagittal	110
	Frontal	23
	Transverse	33
Sitting down on chair and rising from sitting	Sagittal	104
	Frontal	20
	Transverse	17
Stooping to obtain object from floor	Sagittal	117
	Frontal	21
	Transverse	18
Squatting	Sagittal	122
	Frontal	28
	Transverse	26
Ascending stairs	Sagittal	67
	Frontal	16
	Transverse	18
Descending stairs	Sagittal	36
	Frontal	
	Transverse	

(Nordin, 2001)

# Modélisation biomécanique: exemple

hypothèse: support unilatéral du poids du corps

donné:

- o forces externes:  $W_1, W$
- o paramètres géométriques:  $\alpha, \theta, \beta$
- o bras de leviers:  $a, b, c$

demandé:

- o forces internes :  $F_M, F_J$

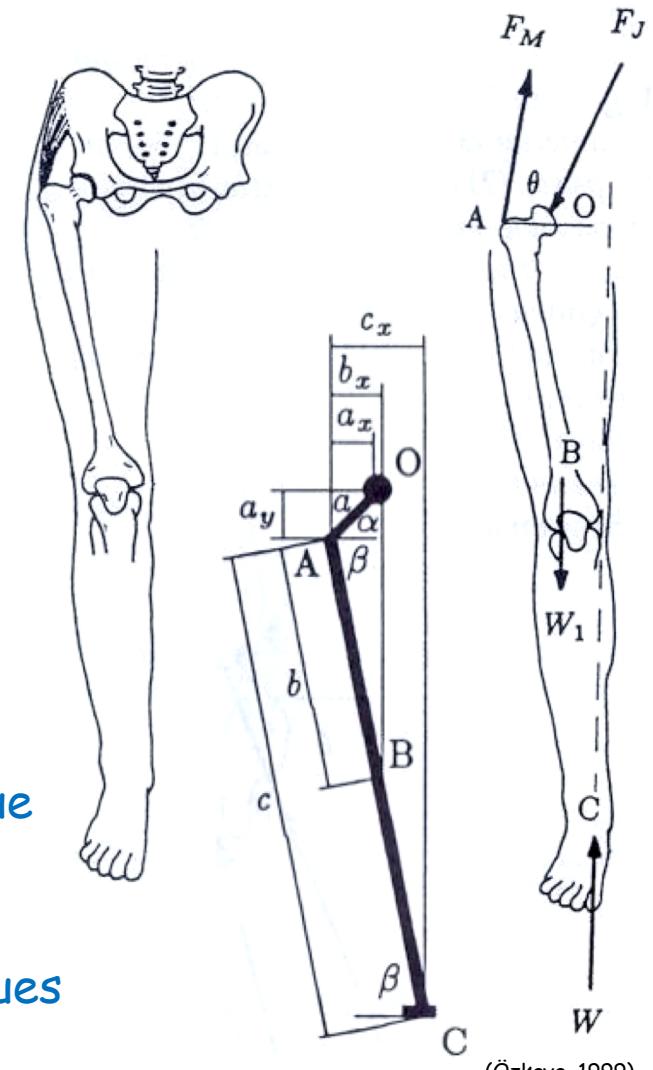
O: point de contact de l'articulation

$W_1$ : poids de la jambe droite

$W$ : poids du corps

$F_M$ : tension exercée par les muscles  $\Rightarrow$  1 inconnue  
abducteurs de la hanche sur le fémur

$F_J$ : force de réaction à l'articulation sur le  
fémur  $\Rightarrow$  2 inconnues



(Özkaya, 1999)

# Modélisation biomécanique:

## décomposition des forces et des bras de levier:

$$F_{Mx} = F_M \cos \theta$$

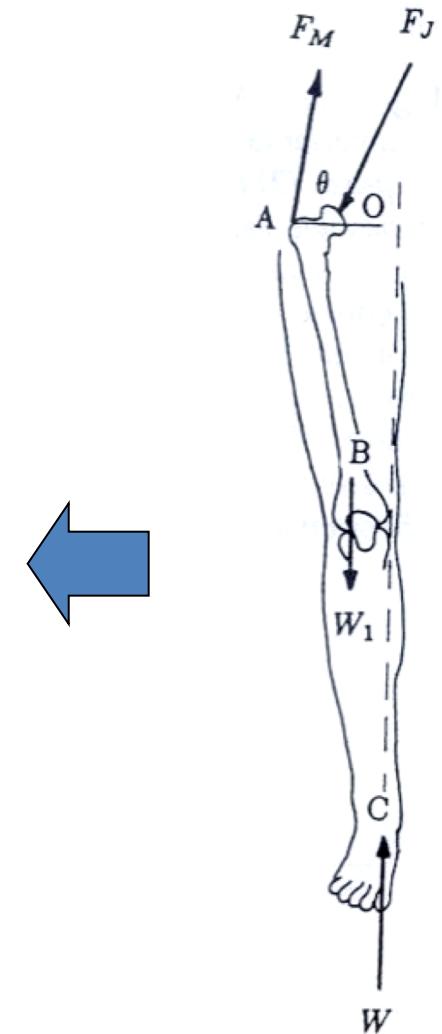
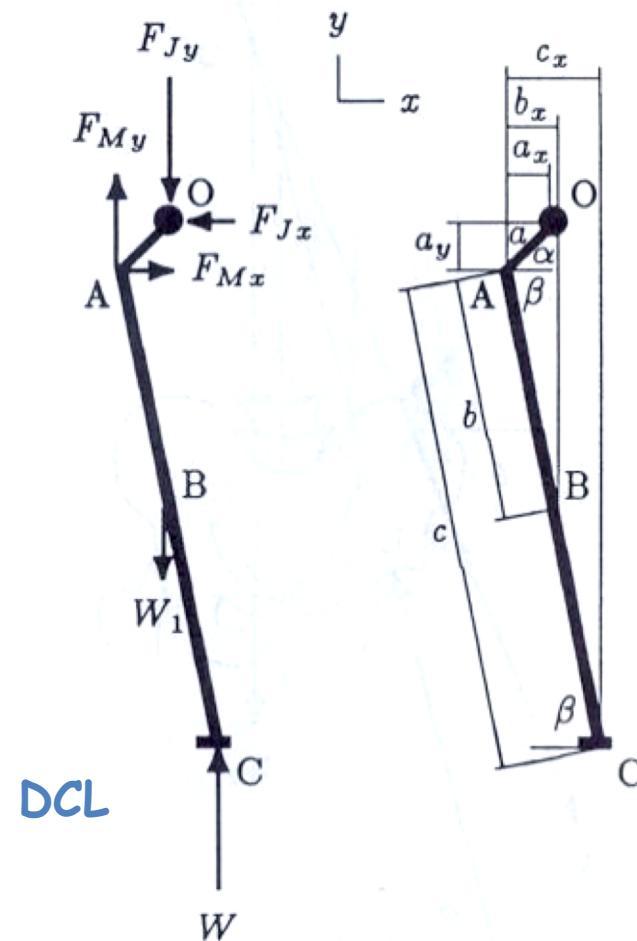
$$F_{My} = F_M \sin \theta$$

$$a_x = a \cos \alpha$$

$$a_y = a \sin \alpha$$

$$b_x = b \cos \beta$$

$$c_x = c \cos \beta$$



(Özkaya, 1999)

# Modélisation biomécanique:

équilibre (corps rigide 2D): 3 équations

$$\Sigma F_x = 0 \quad \Sigma F_y = 0 \quad \Sigma M_z = 0$$

$$\sum M_O = 0 : \quad - a_x F_{My} + a_y F_{Mx} + (c_x - a_x) W \\ \quad \quad \quad - (b_x - a_x) W_1 = 0$$

$$(a \cos \alpha)(F_M \sin \theta) - (a \sin \alpha)(F_M \cos \theta) \\ - (c \cos \beta - a \cos \alpha) W + (b \cos \beta - a \cos \alpha) W_1 = 0$$

$$F_M = \frac{(cW - bW_1) \cos \beta - a(W - W_1) \cos \alpha}{a(\cos \alpha \sin \theta - \sin \alpha \cos \theta)} \longrightarrow F_M = 2.6W$$

$$\sum F_x = 0 : \quad F_{Jx} = F_{Mx} = F_M \cos \theta = 0.88W$$

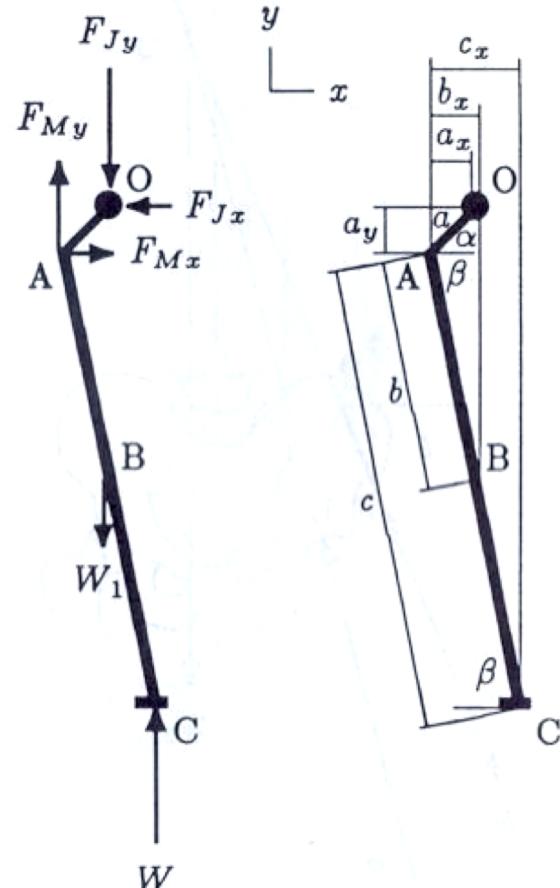
$$\sum F_y = 0 : \quad F_{Jy} = F_{My} + W - W_1$$

$$F_{Jy} = F_M \sin \theta + W - W_1 = 3.26W$$

$$F_J = \sqrt{(F_{Jx})^2 + (F_{Jy})^2} \rightarrow F_J = 3.4W$$

$$F_M \text{ et } F_J \gg W$$

$$a = 0.05h, b = 0.20h, c = 0.52h, \alpha = 45^\circ, \beta = 80^\circ, \theta = 70^\circ, W_1 = 0.17W$$

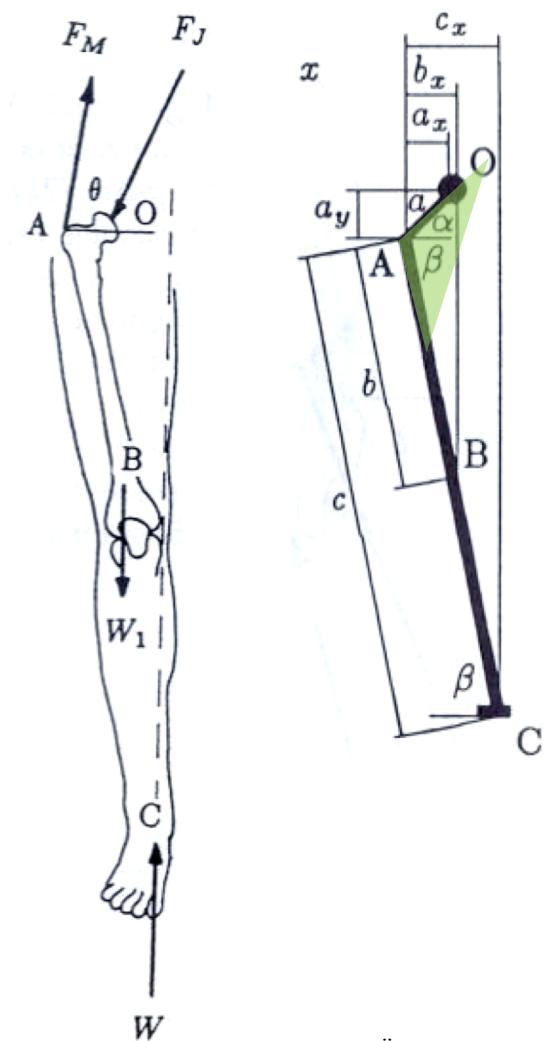
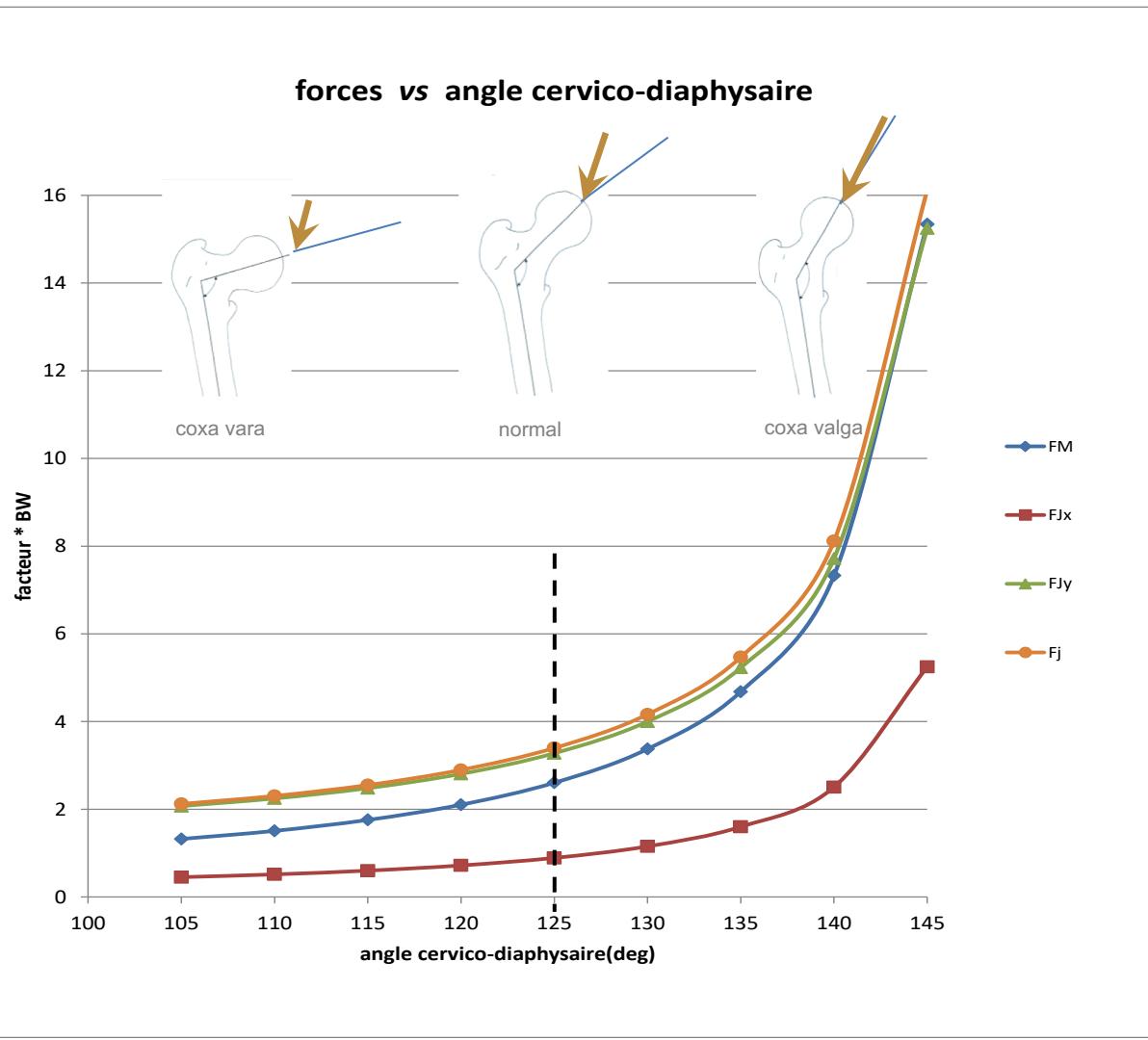


Quelles sont les composantes de compression/cisaillement sur le col fémoral ?

(Özkaya, 1999)

# Modélisation biomécanique

$$\text{angle cervico-diaphysaire} = \alpha + \beta$$

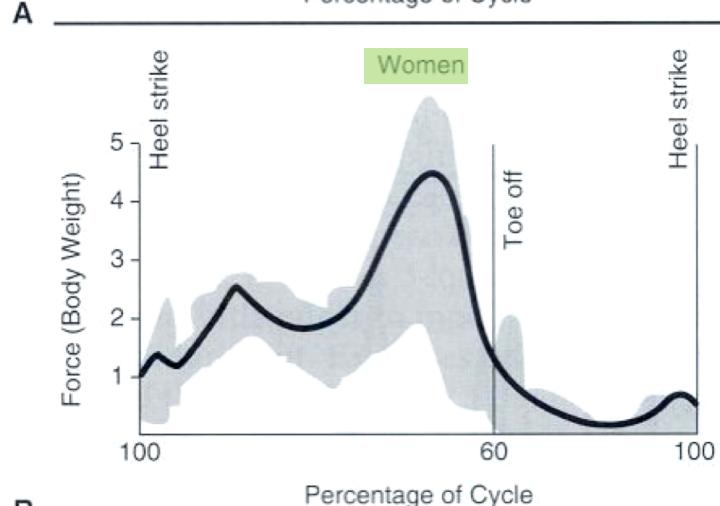
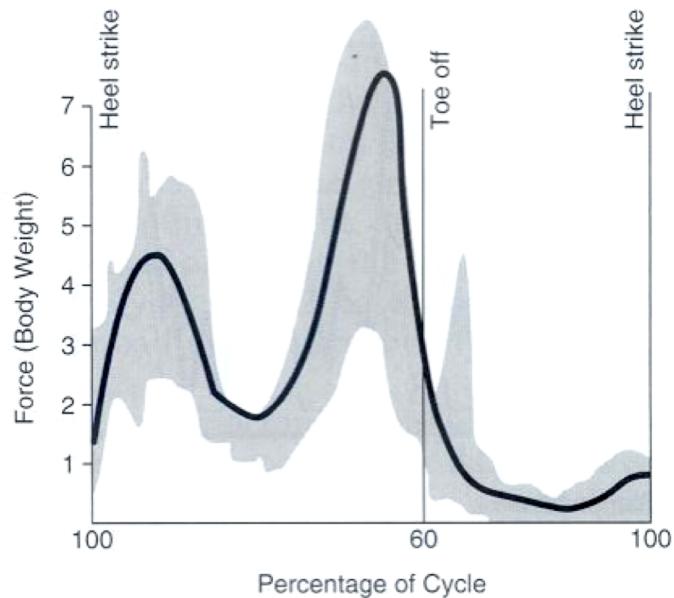
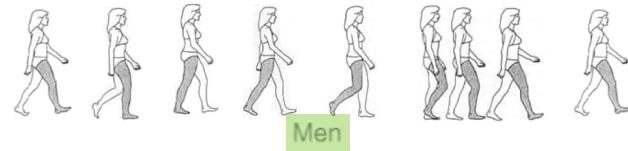


(Özkaya, 1999)

# Articulation coxo-fémorale

➤ force de réaction à l'articulation de la hanche dans le cycle de la marche:

- tendance similaire à l'articulation tibio-fémorale:
  - phase d'appui: force de réaction = plusieurs fois le poids du corps;
  - phase de propulsion: force de réaction = inférieure au poids du corps;
- force/femme < force /homme:
  - différences dans forme du bassin (+ large chez la femme), patron de la marche, relations angulaires de l'articulation, ...
- activités:
  - montée/descente escalier: 2.6 - 5.5W
  - course / ski: jusqu'à 8W



(Nordin, 2001)

# Thème 7: Biomécanique du membre inférieur

- généralités;
- biomécanique du genou;
- biomécanique de la hanche;
- (biomécanique de la cheville)



# Thème 7: Biomécanique du membre inférieur

## ➤ biomécanique de la cheville

- anatomie et rôles;
- articulations de la cheville;
- mouvements de la cheville
- modélisation biomécanique.

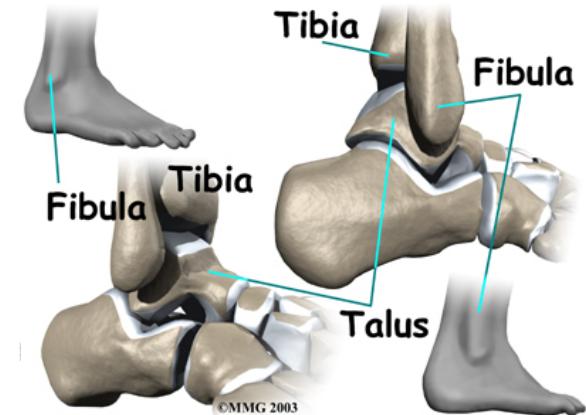
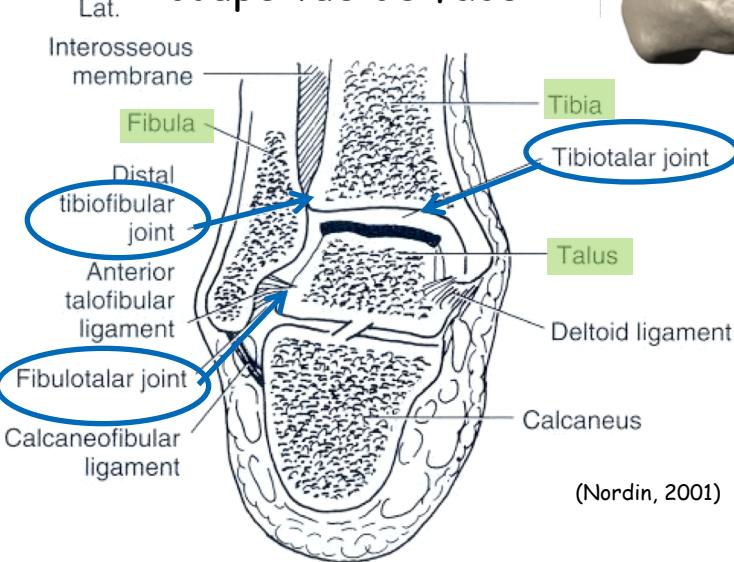


# Anatomie de la cheville

- articulation complexe;
- intimement reliée aux articulations du pied.

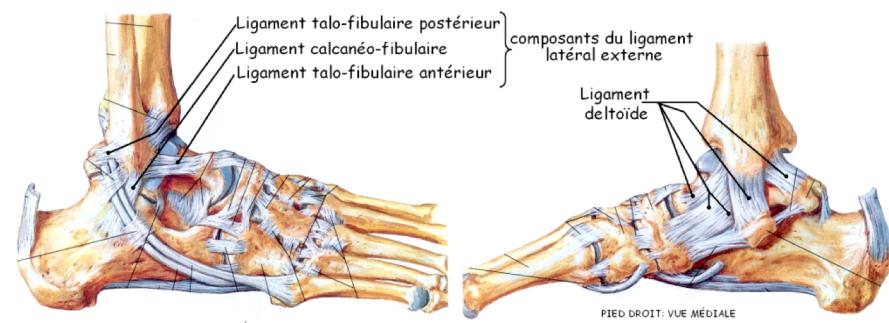
- 3 os:
  - tibia;
  - péroné (fibula);
  - talus (astragale);
- 3 articulations:
  - tibio-talaire;
  - péronéo-tibiale;
  - péronéo-talaire;
- 4 ligaments:
  - ligament deltoïde ; et trois ligaments latéraux :
  - ligament talo-fibulaire antérieur;
  - ligament talo-fibulaire postérieur;
  - ligament calcanéo-fibulaire.

coupe vue de face



[http://www.eorthopod.com/public/patient\\_education/6584/ankle\\_syndesmosis\\_injuries.html](http://www.eorthopod.com/public/patient_education/6584/ankle_syndesmosis_injuries.html)

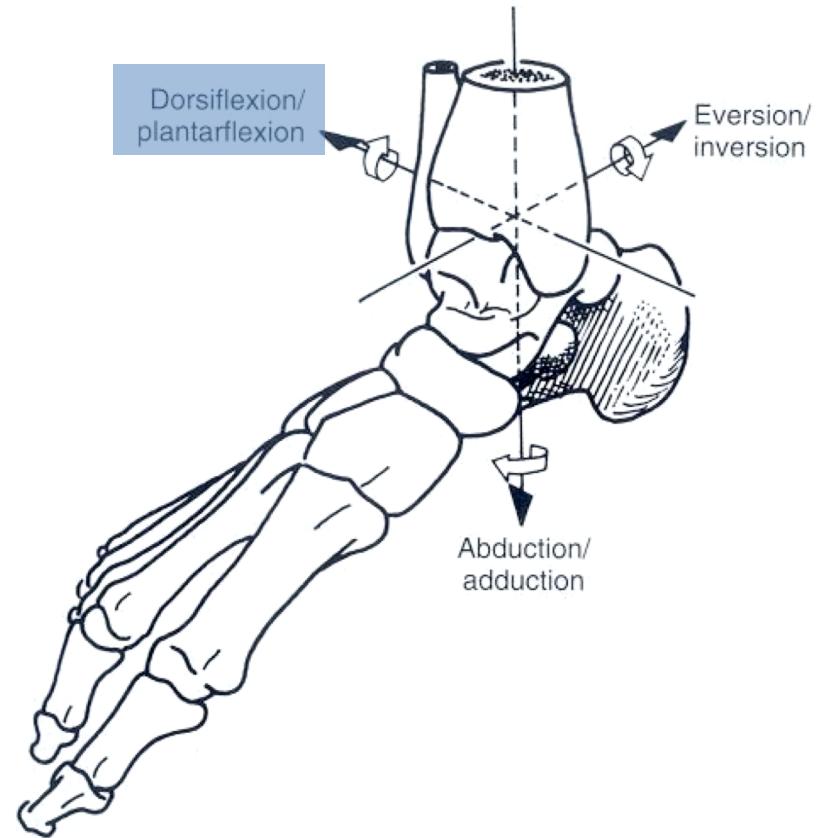
(Nordin, 2001)



(Netter, 1989)

# Rôles

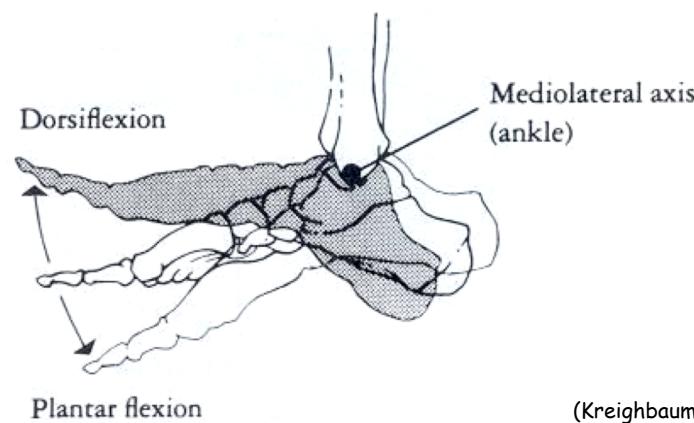
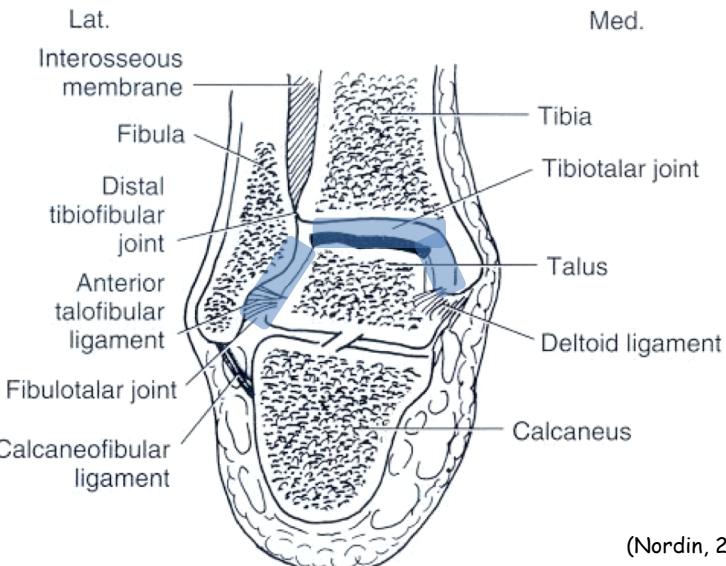
- transmission de charges de la jambe au pied;
- influence importante sur la biomécanique du pied, entre autres dans la fonction essentielle de la marche;
- mouvements dans les 3 plans, mais beaucoup plus importants dans le **plan sagittal**;



(Nordin, 2001)

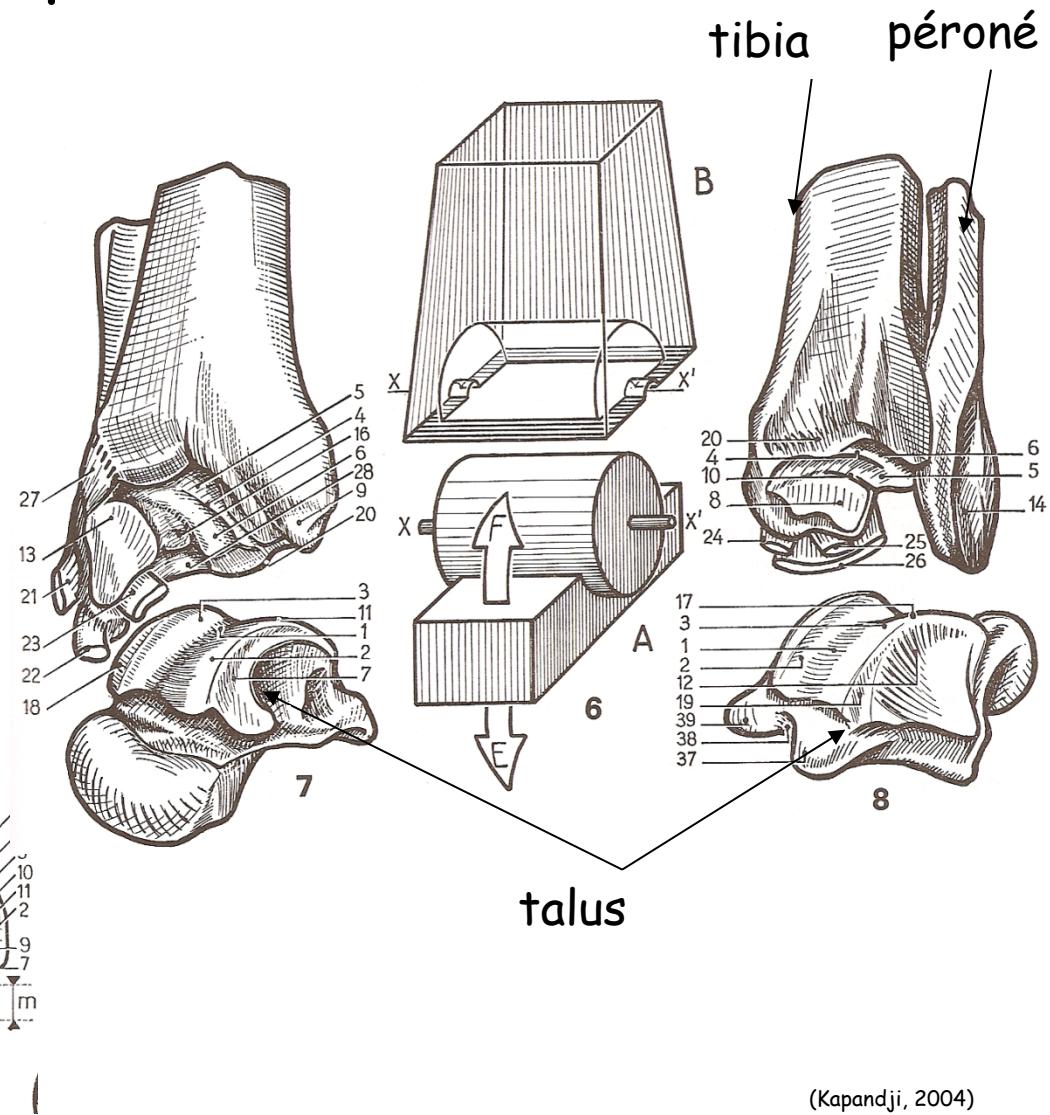
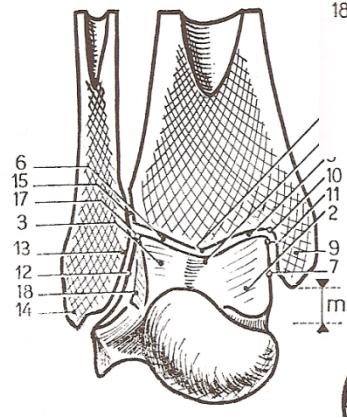
# Articulations tibio- / péronéo-talaires

- articulation entre tibia/péroné (fibula) de la jambe et talus (astragale) du pied;
- articulation principale de la cheville;
- degré de liberté en flexions dorsale et plantaire;



# Articulations tibio- / péronéo-talaires

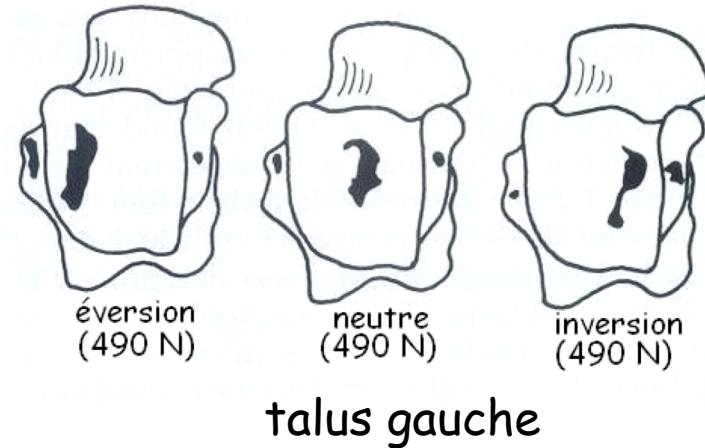
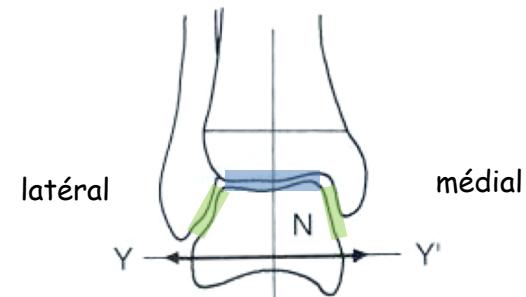
- diarthrose de type trochléenne à ~1 DDL (rot);
- surfaces articulaires:
  - partie supérieure convexe du talus;
  - extrémités inférieures complémentaires du tibia et du péroné;



(Kapandji, 2004)

# Articulations tibio- / péronéo-talaires: dist<sup>n</sup> charges

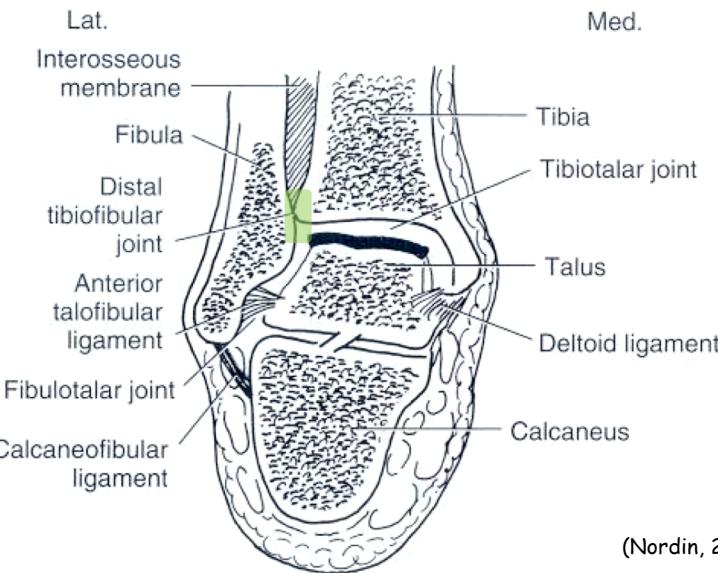
- aire de contact (dôme et/ou parois latérales du talus) relativement large:
  - 11 - 13 cm<sup>2</sup>;
- diminution conséquente des contraintes ;
- distribution des charges:
  - 77 - 90 % contact tibia/dôme talus;
  - 10 - 23 % contact malléoles/facettes talus
- aires de contact à pression élevée = variables en fonction du mouvement de la cheville



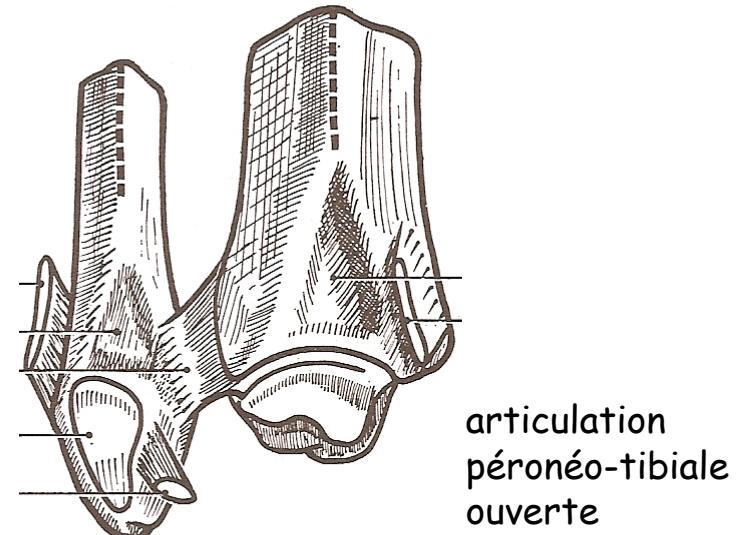
(Nordin, 2001)

# Articulation péronéo-tibiale

- articulation entre le tibia et le péroné (fibula);
- syndesmose (pas de surfaces cartilagineuses, mais jonction fibreuse): mouvements très limités;
- surfaces articulaires:
  - surface concave plus ou moins rugueuse du tibia;
  - surface convexe du péroné;
  - pas de contact osseux; séparées par du tissu fibreux.



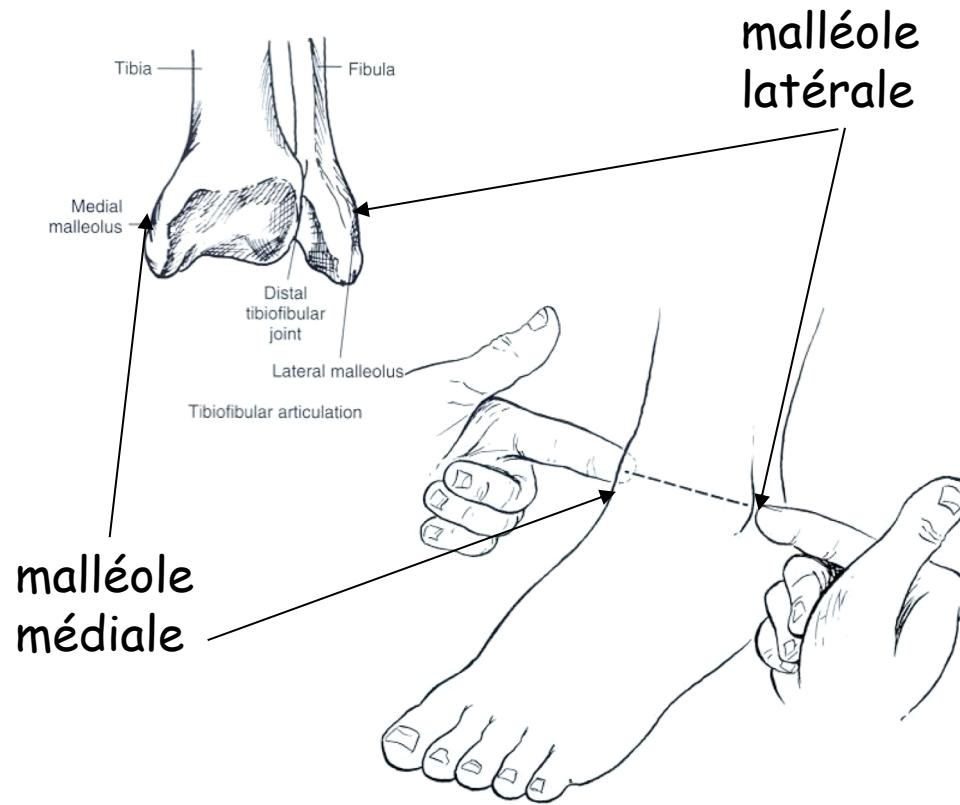
(Nordin, 2001)



(Kapandji, 2004)

# Mouvements: plan sagittal

- axe de rotation empirique: estimé par ligne joignant les malléoles latérale et médiale:



# Mouvements: plan sagittal / couplage

## ➤ flexion dorsale et plantaire:

- mise en jeu des 3 articulations;
- formes asymétriques des surfaces du tibia vs péroné (art. tibio- et péronéo-talaires);
- couplage flexion et rotation axiale;

variation de l'axe avec la position

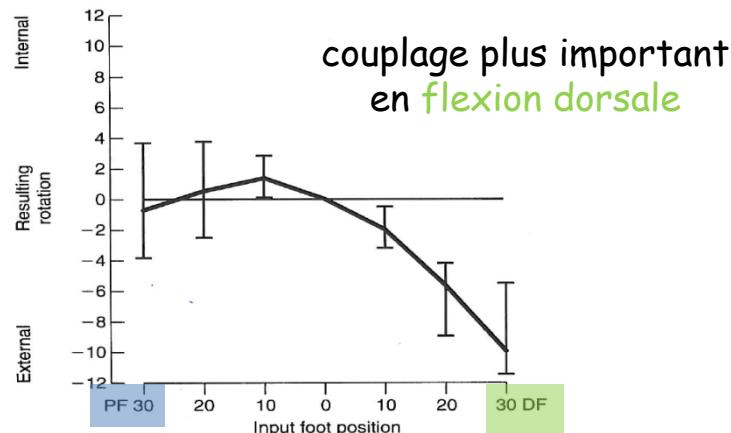


## ➤ flexion dorsale:

- rotation axiale externe du talus;

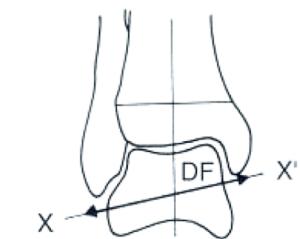
## ➤ flexion plantaire:

- rotation axiale interne du talus.

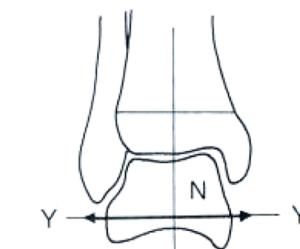


neutre

flexion plantaire



latéral



médial

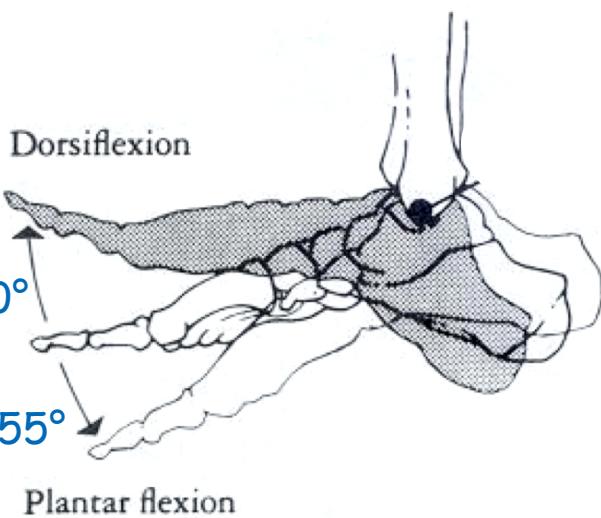
(Nordin, 2001)

# Amplitude de mouvement: plan sagittal

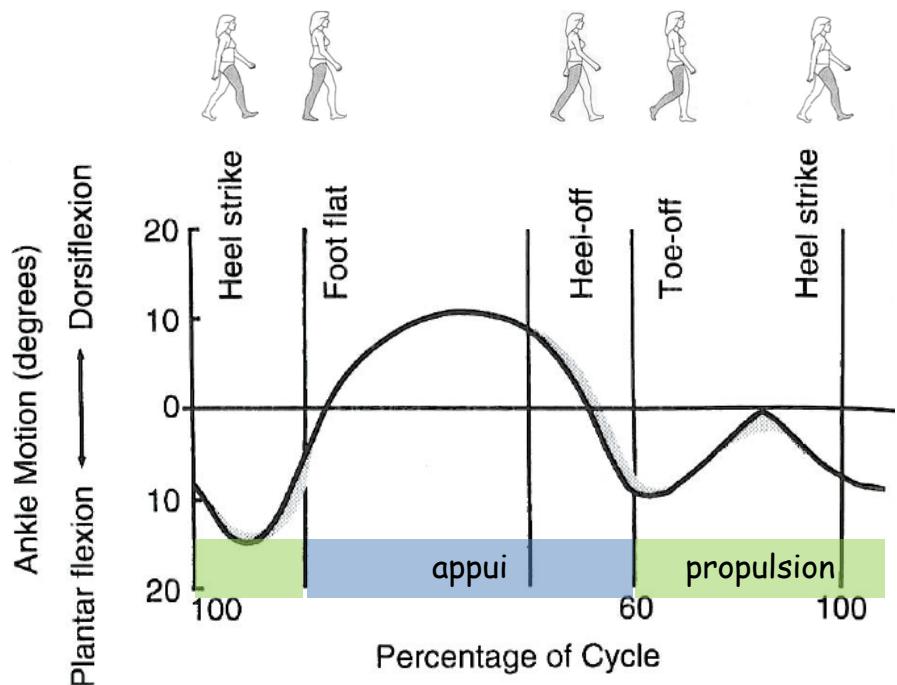
## ➤ mouvements de flexion dorsale/plantaire:

- flexion dorsale:  $10^\circ - 20^\circ$
- flexion plantaire:  $40^\circ - 55^\circ$
- rotation axiale (couplage):  $\sim 30^\circ$

cycle de la marche

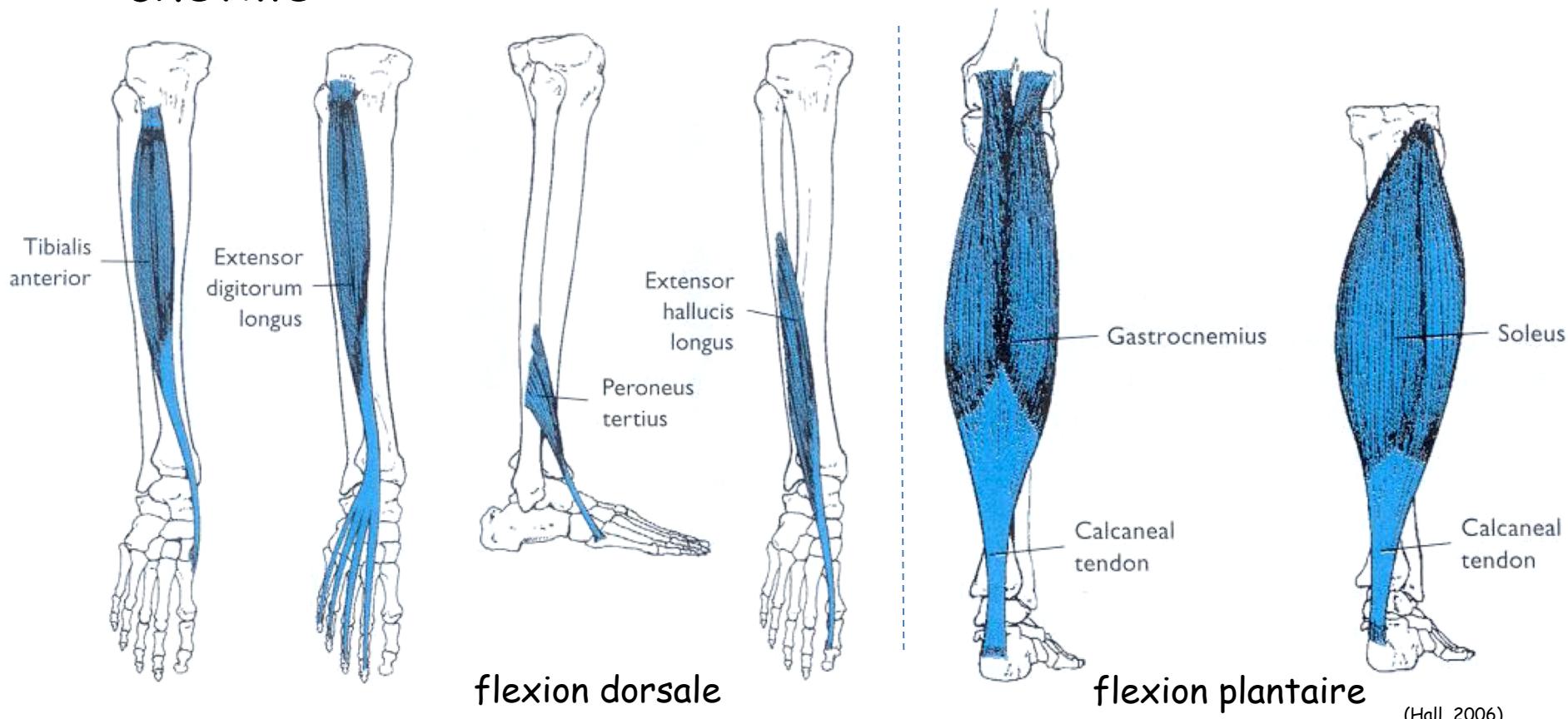


(Kreighbaum et al., 1990)



# Amplitude de mouvement: plan sagittal

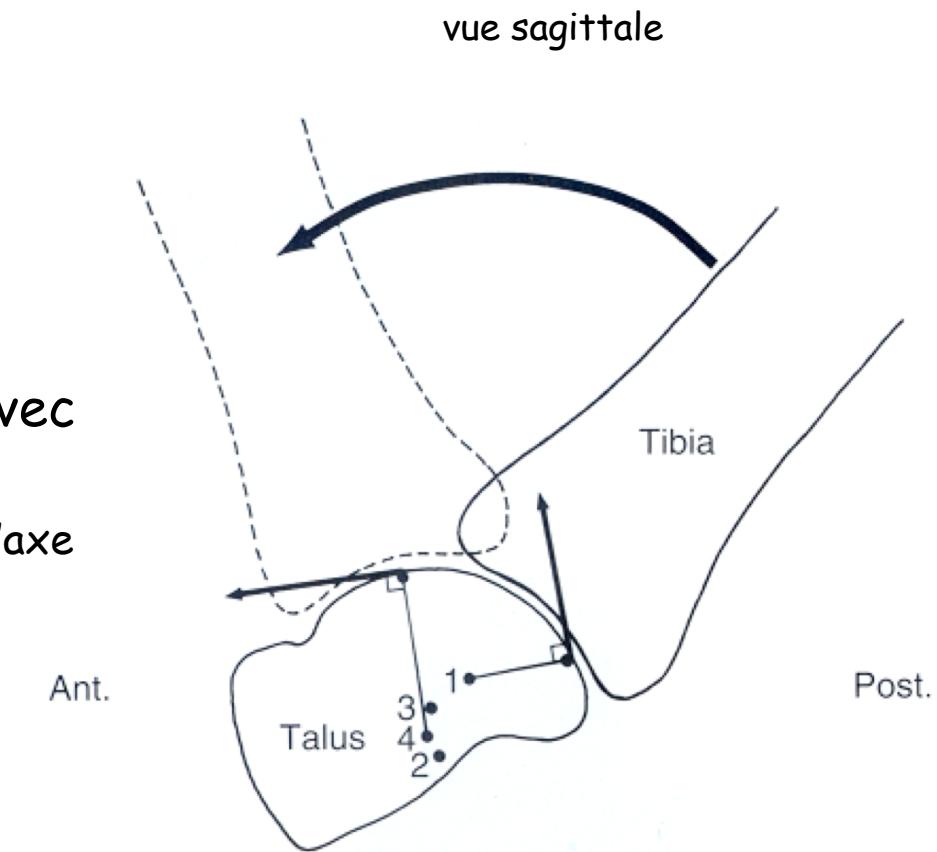
- principaux muscles en flexion dorsale / plantaire de la cheville:



# Mouvement de la surface articulaire

## ➤ méthode du centre instantané de rotation (CIR):

- applicable car mouvements principalement dans le plan sagittal;
- CIR situé dans le talus;
- localisation variable du CIR avec le mouvement de la cheville:
  - changement dans la position de l'axe de rotation de la cheville;
  - **combinaison glissement et roulement;**



(Nordin, 2001)

# Modélisation biomécanique: cheville

donné:

- o forces externes:  $W$
- o paramètres géométriques:  $\theta, \beta$

demandé:

- o forces internes :  $F_M, F_J$

où  $O$ : point d'intersection des forces

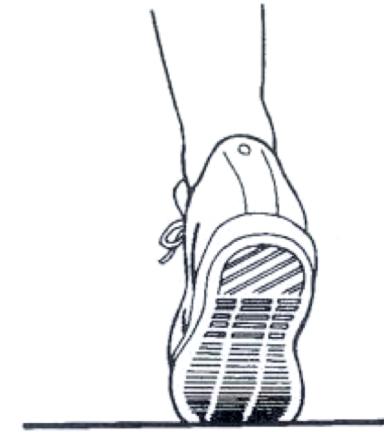
$W$ : poids du corps sur le pied (force de réaction au sol)

$F_M$ : tension exercée par les muscles par l'entremise du tendon d'Achille  $\Rightarrow 1$  inconnue

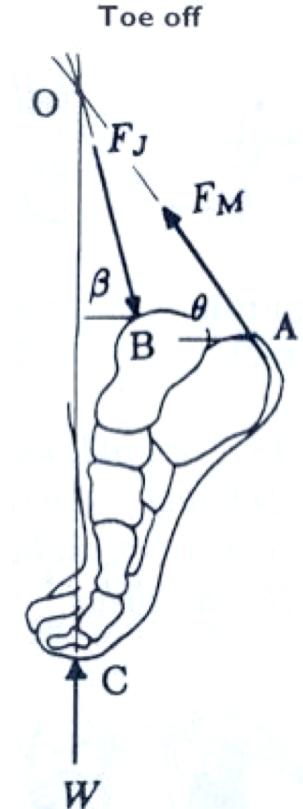
$F_J$ : force de réaction à la cheville appliquée par le tibia sur le dôme du talus  $\Rightarrow 1$  inconnue

$\theta$ : angle de la ligne d'action du tendon d'Achille

$\beta$ : angle de la ligne d'action de la réaction à la cheville



(Hall, 2006)



(Özkaya, 1999)

# Modélisation biomécanique: cheville

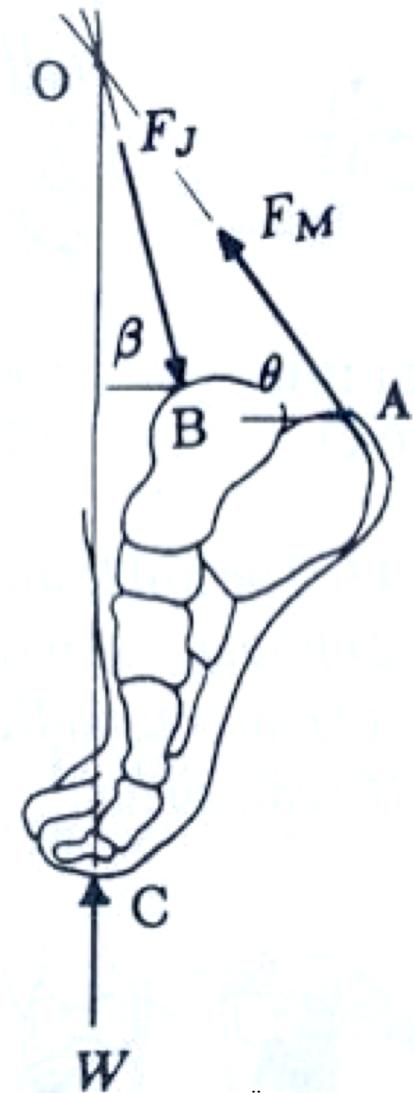
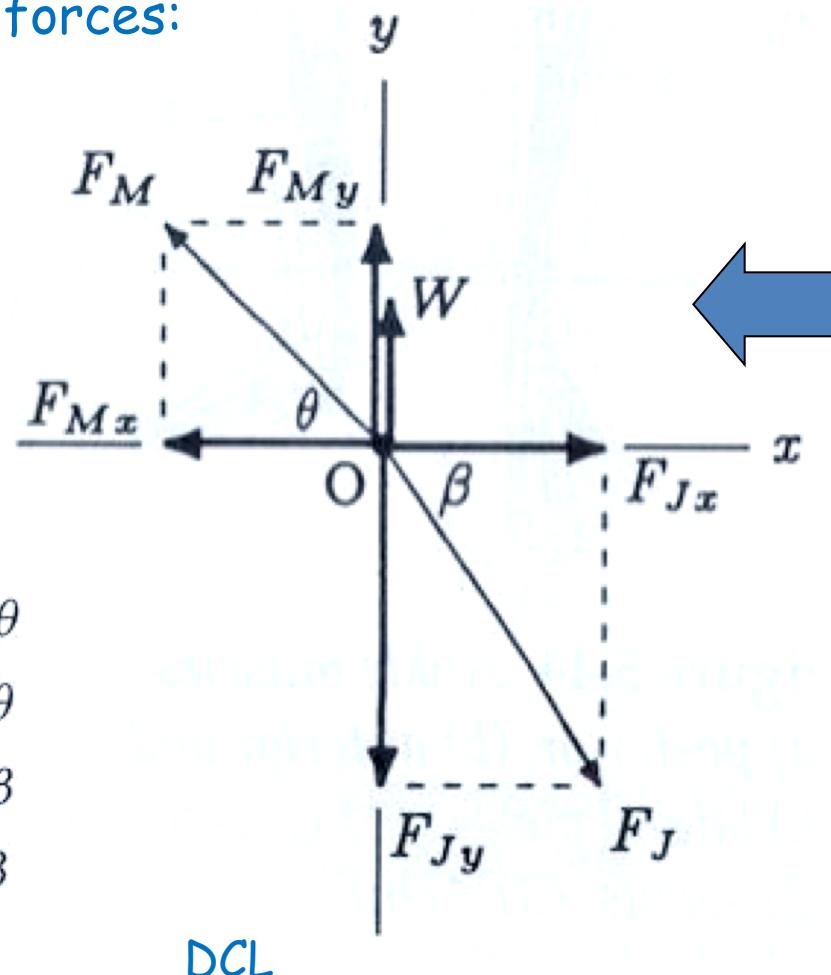
décomposition des forces:

$$F_{Mx} = F_M \cos \theta$$

$$F_{My} = F_M \sin \theta$$

$$F_{Jx} = F_J \cos \beta$$

$$F_{Jy} = F_J \sin \beta$$



(Özkaya, 1999)

# Modélisation biomécanique: cheville

équilibre (particule 2D): 2 équations

$$\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0$$

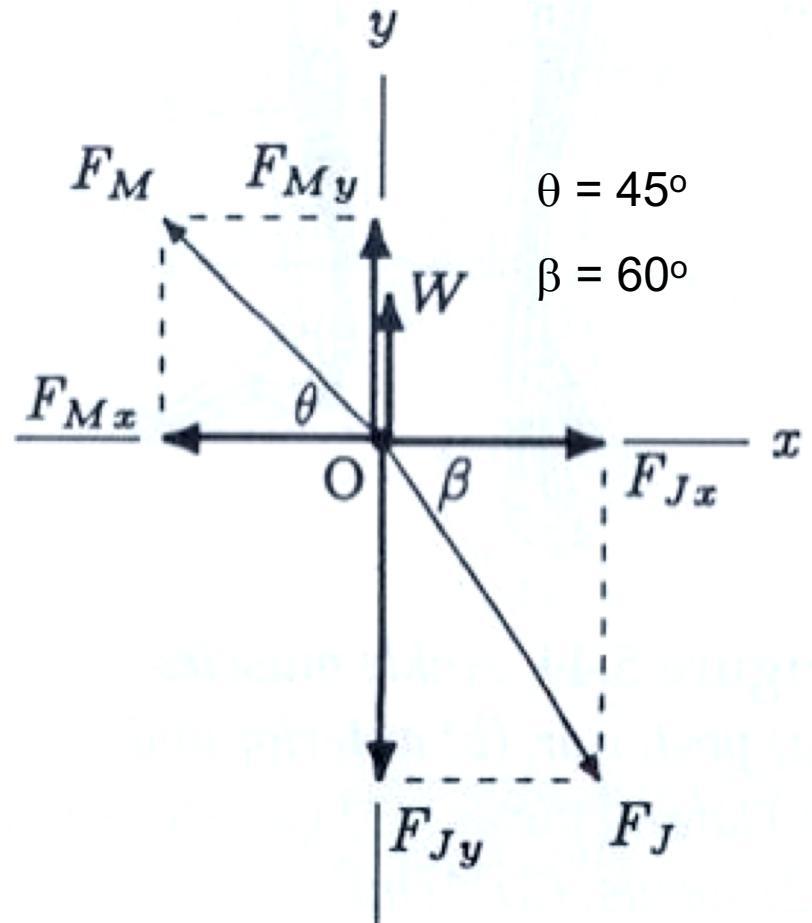
$$\sum F_x = 0 : \quad F_{Jx} = F_{Mx}$$

$$F_J \cos \beta = F_M \cos \theta$$

$$F_M = \frac{F_J \cos \beta}{\cos \theta}$$

$$\sum F_y = 0 : \quad F_{Jy} = F_{My} + W$$

$$F_J \sin \beta = W + F_M \sin \theta$$



(Özkaya, 1999)

# Modélisation biomécanique: cheville

équilibre (particule 2D): 2 équations

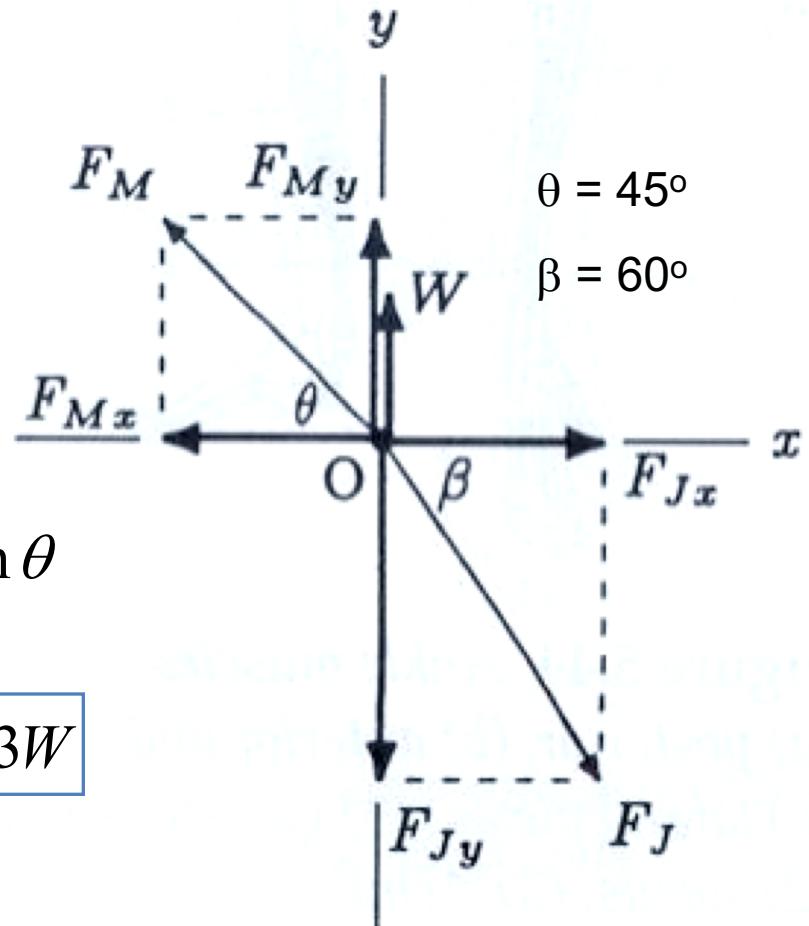
En substituant :  $F_M = \frac{F_J \cos \beta}{\cos \theta}$

dans  $F_J \sin \beta = W + F_M \sin \theta$

On trouve :  $F_J \sin \beta = W + \frac{F_J \cos \beta}{\cos \theta} \sin \theta$

D'où :  $F_J = \frac{W}{\sin \theta \left( \frac{\sin \beta}{\sin \theta} - \frac{\cos \beta}{\cos \theta} \right)} = 2.73W$

et  $F_M = \frac{2.73W \cos \beta}{\cos \theta} = 1.93W$



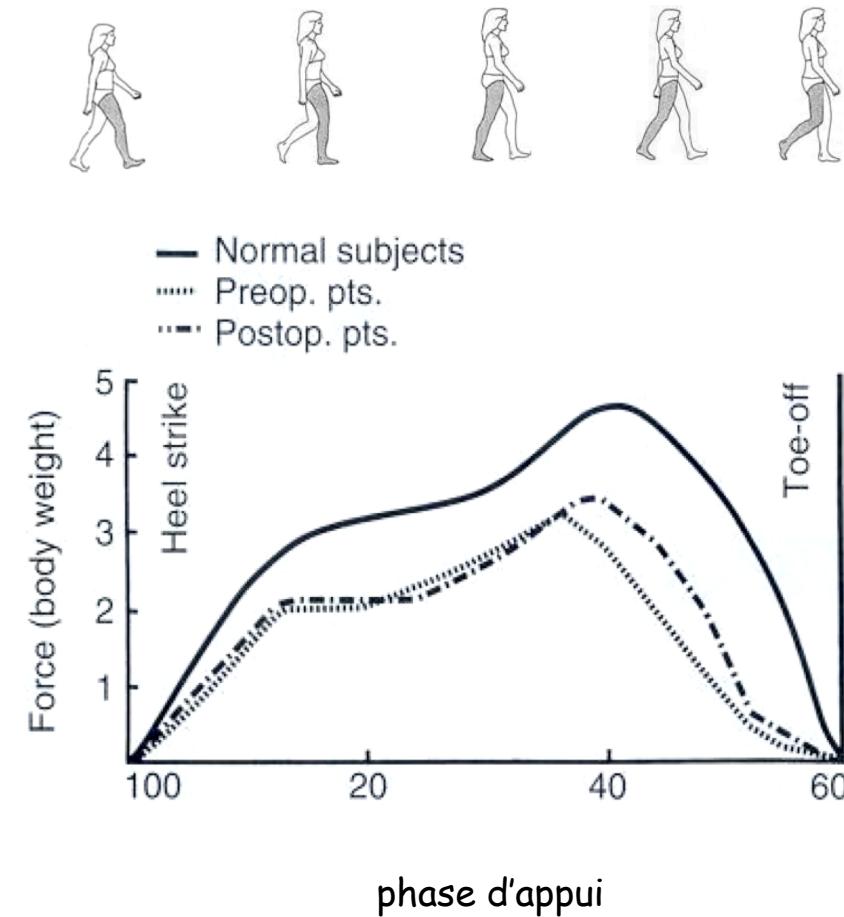
(Özkaya, 1999)

# Cycle de la marche

➤ force de réaction à l'articulation:

- composante en compression:

- jusqu'à 4-5 fois le poids du corps;
- maximale à la phase d'appui: contraction musculaire;



(Nordin, 2001)

# Bibliographie

## ➤ volumes:

- HALL, S.J. *Basic Biomechanics*. 5th ed. Boston: McGraw-Hill, 2006. 572 p.
- KREIGHBAUM, E. *Biomechanics : a qualitative approach for studying human movement*. 3rd ed. New York : Macmillan, 1990. 749 p.
- NETTER, F.H., *Atlas of Human Anatomy*. New Jersey: Summit, 1989. 514 p.
- NORDIN, M., FRANKEL, V.H. *Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System*. 3rd ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2001. 450 p.
- ROBERTSON, G. *Research methods in biomechanics*. Champaign, IL : Human Kinetics, 2004. 309 p.