



Biomécanique de la cheville et du pied

Mahieu Céline

PT, MSc, DO, PhD

Laboratoire d'Anatomie, Biomécanique et Organogénèse

INTRODUCTION

Homme :

Développement de l'encéphale

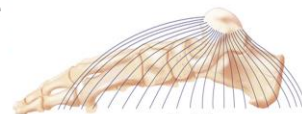
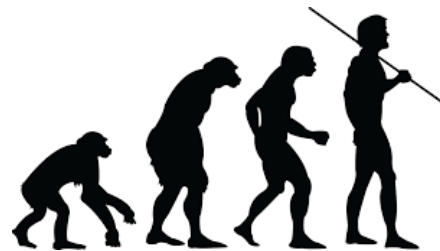
↓ (Boyd, 2004)

Bipédie permanente



Adaptation morphologique du pied :

- Hallux
- Voûte plantaire
- ...



➔ **Le pied est l'attribut exclusif de l'Homme** (Benichou, 2002)

INTRODUCTION

Pied & cheville : **indissociable**

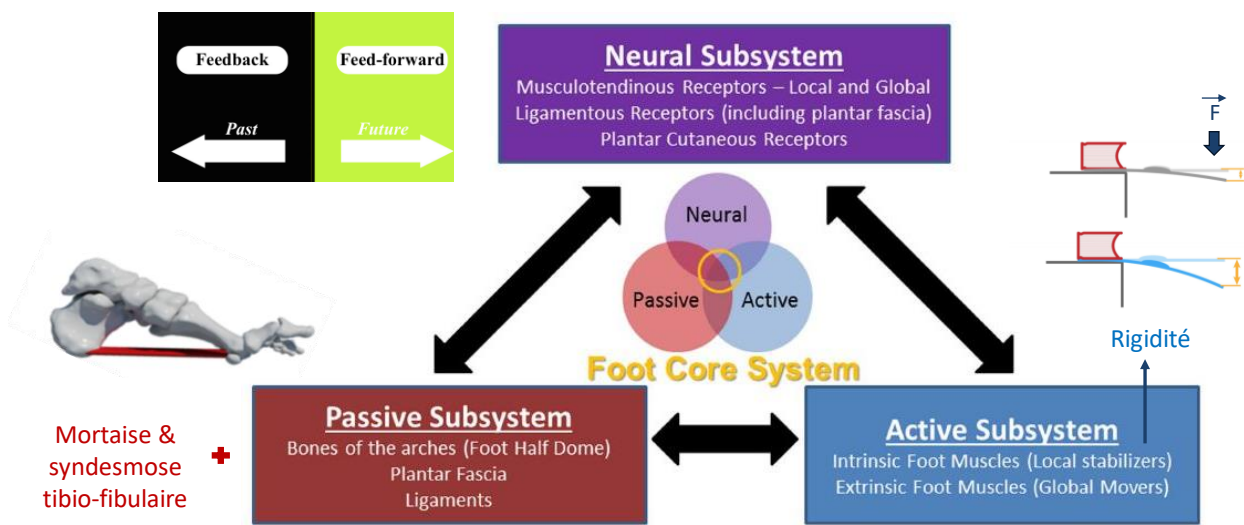
- 30 os
 - 33 articulations
 - 112 ligaments
 - 20 muscles intrinsèques
 - 9 muscles extrinsèques
- } → **Complexe**

Rôles :

- Station bipodale
- Locomotion bipède

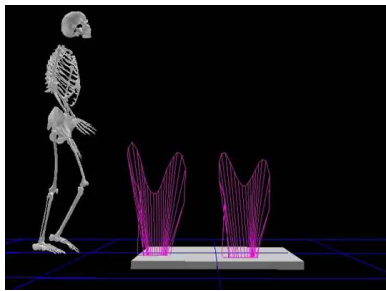


FOOT CORE SYSTEM (McKeon, 2015)

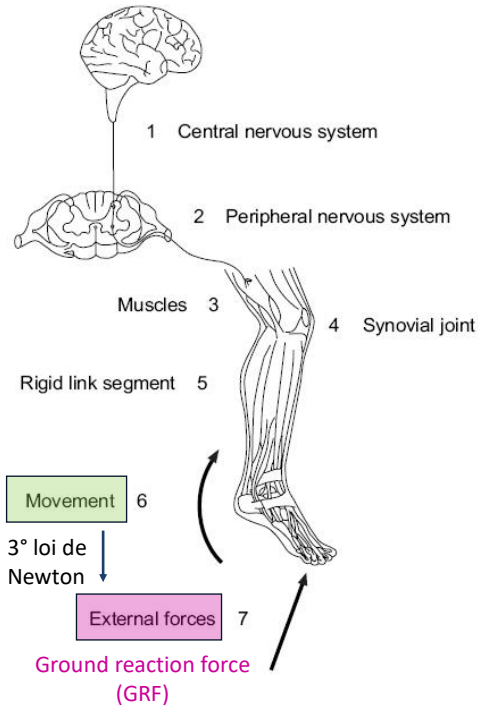




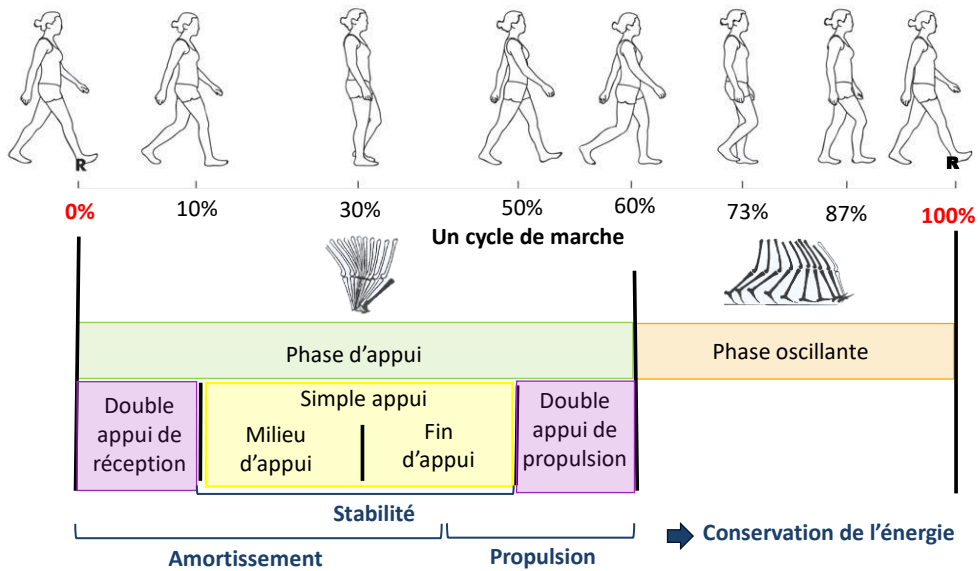
Activité quotidienne
 « 10.000 pas par jour »
 Recommandations OMS



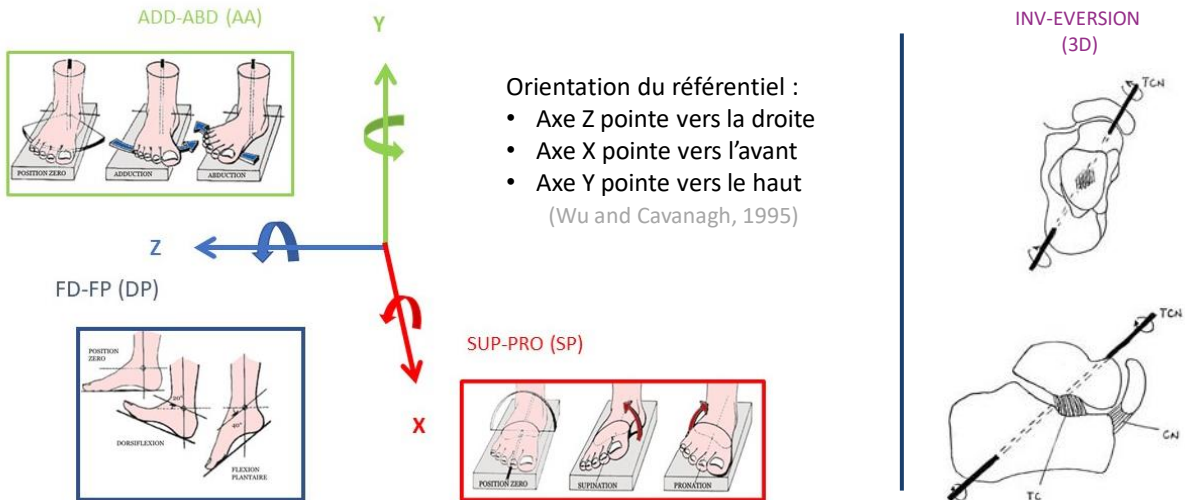
MARCHE



CYCLE DE LA MARCHÉ



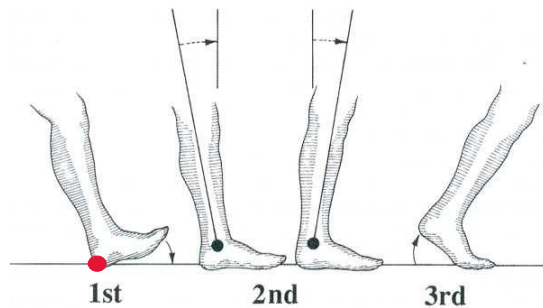
TERMINOLOGIE (Klein et Sommerfeld, 2008)



CHEVILLE

Déroulement du pas dans le plan sagittal : (Dananberg, 1995 ; Perry, 1992)

Contact initial :
Attaque talon



1° pivot ou heel rocker

Autour du calcanéum

- FP de la cheville
 - Travail **excentrique** du TA
- contrôler la pose du pied

2° pivot ou ankle rocker

Autour de la cheville

- FD de la cheville
 - Travail **excentrique** du TS
- contrôler l'avancée du tibia

3° pivot ou forefoot rocker

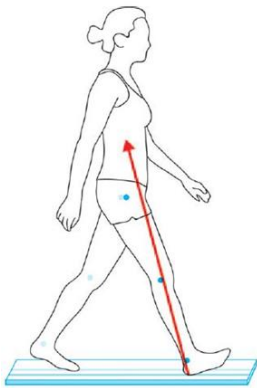
Autour des articulations MTP

- FP de la cheville
 - Travail **concentrique** du TS
- assurer la propulsion

CHEVILLE

Déroulement du pas dans le plan sagittal :

Heel rocker

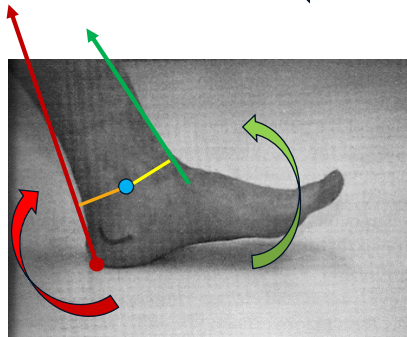


GRF

$$GRF \times bdl = M \text{ externe} \rightarrow M \text{ ext FP}$$

><

$$F_{TA} \times bdl = M \text{ interne} \leftarrow M \text{ int FD}$$



Axe de mouvement de la cheville



Bdl GRF >



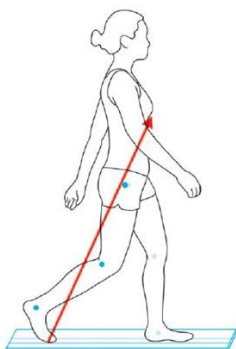
Bdl GRF <

↓
F_{TA} <

CHEVILLE

Déroulement du pas dans le plan sagittal :

Forefoot rocker

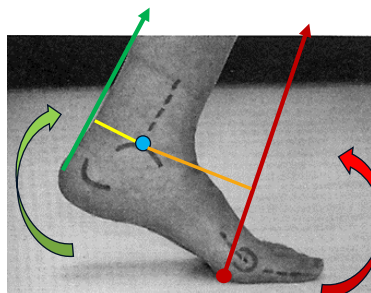


GRF

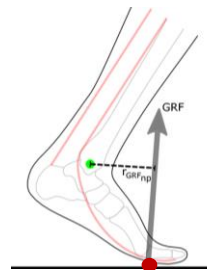
$$GRF \times bdl = M \text{ externe} \rightarrow M \text{ ext FD}$$

><

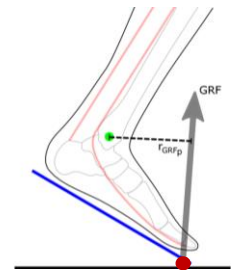
$$F_{TS} \times bdl = M \text{ interne} \leftarrow M \text{ int FP}$$



Axe de mouvement de la cheville



Bdl GRF <

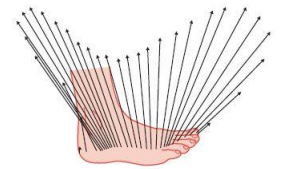


Bdl GRF >

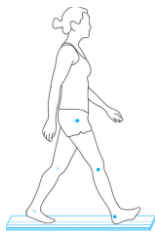
↓
F_{TS} >

PIED

Déroulement du pas dans le plan transversal :



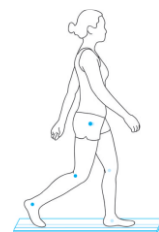
Double appui de réception



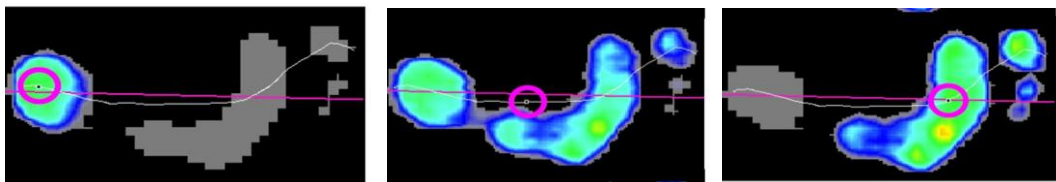
Simple appui



Double appui de propulsion

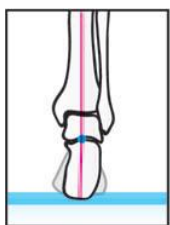


Center of pressure (CoP)

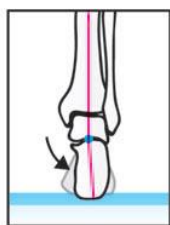


PIED

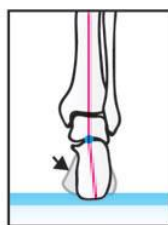
Déroulement du pas dans le plan frontal :



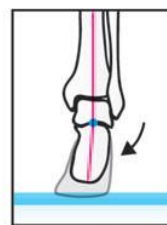
IC



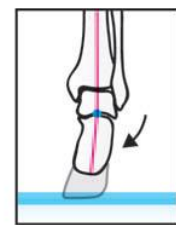
LR



MSt



TSt



PSw

Calcaneus en supination (2°)

Pronation du calcaneus

Pic de pronation (7°)

Supination du calcaneus

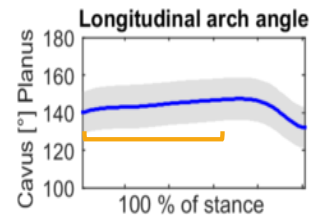
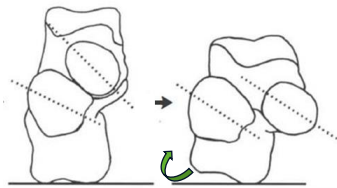
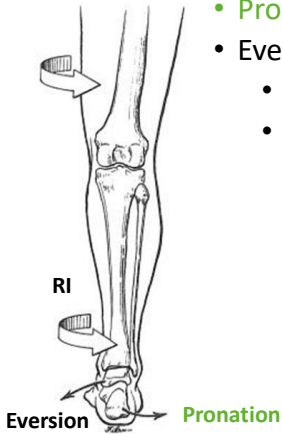
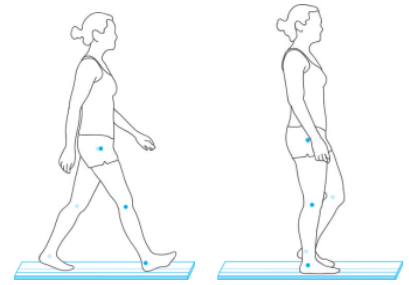
Pic de supination (6°)

PIED

Impact sur l'arche longitudinale médiale :

• Phases de réception et de milieu d'appui :

- **Pronation** du calcaneus
 - Eversion de l'articulation sous-talienne
 - RI de la jambe
 - Déverrouillage des articulations transverse du tarse (Donatelli, 1985)
- => **Effondrement** progressif de l'**arche longitudinale médiale**



PIED

Impact sur l'arche longitudinale médiale :

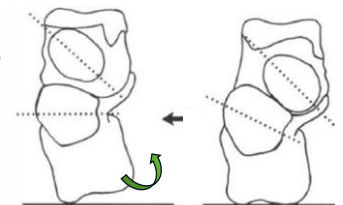
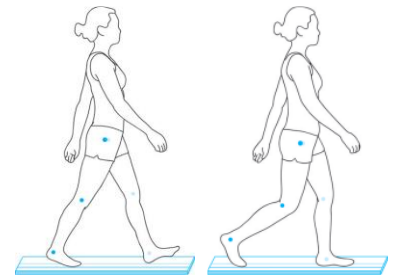
• Phases de fin d'appui et de propulsion :

- **Supination** du calcaneus
- Inversion de l'articulation sous-talienne
 - RE de la jambe
 - Verrouillage des articulations transverse du tarse
- Mise en tension du fascia plantaire suite à :
 - activation du triceps sural (Erdemir, 2004)
 - FD des MTP (Saltzman, 1995)

=> **Restauration de l'arche longitudinale médiale**

SSI 1° rayon fonctionnel

(Morton, 1930)



PIED

Impact sur l'arche longitudinale médiale :

• Phase de fin d'appui et pré-oscillante :

- **Supination** du calcaneus
- Inversion de l'articulation sous-taliennne
 - RE de la jambe
 - Verrouillage des articulations transverse du tarse
- Mise en tension du fascia plantaire suite à :
 - activation du triceps sural (Erdemir, 2004)
 - FD des MTP (Saltzman, 1995)

=> **Restauration de l'arche longitudinale médiale**
 SSI 1° rayon fonctionnel
 (Morton, 1930)



Complexe suro-achilléo-plantaire



(Finn Bojsen-Moller, 1976 ;
 Moraes do Carmo, 2008)

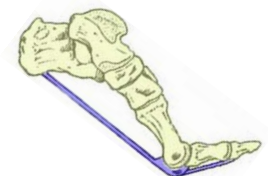
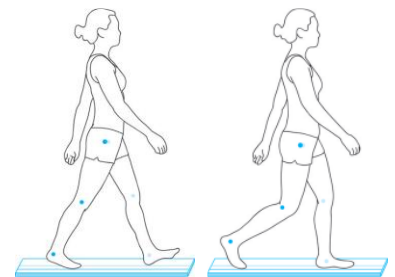
PIED

Impact sur l'arche longitudinale médiale :

• Phase de fin d'appui et pré-oscillante :

- **Supination** du calcaneus
- Inversion de l'articulation sous-taliennne
 - RE de la jambe
 - Verrouillage des articulations transverse du tarse
- Mise en tension du fascia plantaire suite à :
 - activation du triceps sural (Erdemir, 2004)
 - FD des MTP (Saltzman, 1995)

=> **Restauration de l'arche longitudinale médiale**
 SSI 1° rayon fonctionnel
 (Morton, 1930)

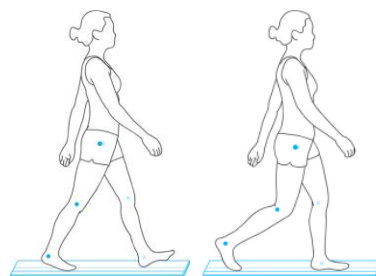


Windlass
 mechanism
 (Hicks, 1954)

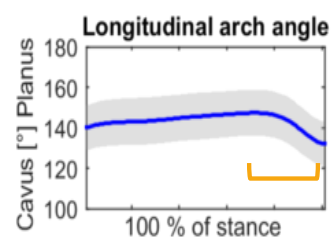
PIED

Impact sur l'arche longitudinale médiale :

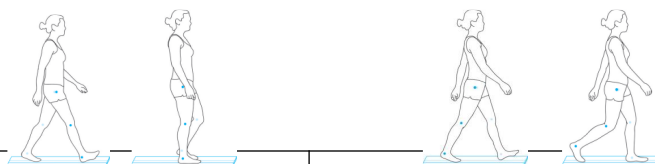
- Phase de fin d'appui et pré-oscillante :
 - **Supination** du calcaneus
 - Inversion de l'articulation sous-talienne
 - RE de la jambe
 - Verrouillage des articulations transverse du tarse
 - Mise en tension du fascia plantaire suite à :
 - activation du triceps sural (Erdemir, 2004)
 - FD des MTP (Saltzman, 1995)



=> **Restauration de l'arche longitudinale médiale**
 SSI 1° rayon fonctionnel
 (Morton, 1930)



PIED



	Début de phase d'appui	Fin de phase d'appui
Cinématique (Leardini, 2006, Mahieu, 2019,...) Morphométrie géométrique (Mahieu, 2022)		
Cinétique (Dumas, 2008, Deleu, 2020,...)	Configuration <u>stabilisatrice</u> et/ou <u>frénatrice</u>	Configuration <u>propulsive</u>
Activité musculaire des extrinsèques et des intrinsèques (Kelly, 2019, 2014, 2012,...)	Excentrique (isométrique)	Concentrique
	↓ Absorption d'énergie	↓ Restitution d'énergie



TAKE HOME MESSAGE

Dans notre pratique :

- Ne pas négliger la marche et l'**excentrique**
- Ajuster le point d'application de la **GRF**
- Pertinence de la typologie : plat – neutre – creux ?



« Ce pied a-t-il la capacité **d'ajuster sa rigidité** à chaque période de la phase d'appui ? »

Capacité « à se laisser déformer »

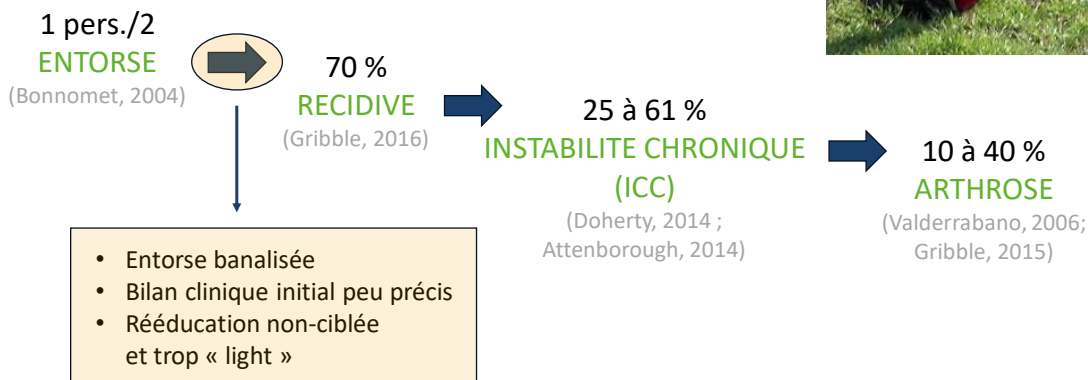
Capacité « à résister à la déformation »



Ne pas négliger les muscles **intrinsèques**

ENTORSE DE LA CHEVILLE

Cascade infernale



Fourchet & Picot, 2023
Formation cheville traumatique

ENTORSE DE LA CHEVILLE

Cascade infernale



1 pers./2
ENTORSE
(Bonnomet, 2004)



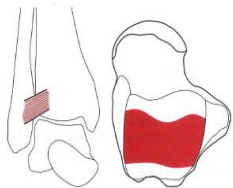
70 %
RECIDIVE
(Gribble, 2016)



25 à 61 %
INSTABILITE CHRONIQUE
(Doherty, 2014 ;
Attenborough, 2014)

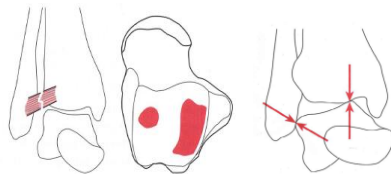


10 à 40 %
ARTHROSE
(Valderrabano, 2006 ;
Gribble, 2015)



(Klein et Sommerfeld, 2008)

Lésions ligamentaires :



Translation ou bascule du talus

Modification de la répartition des contraintes



ENTORSE DE LA CHEVILLE

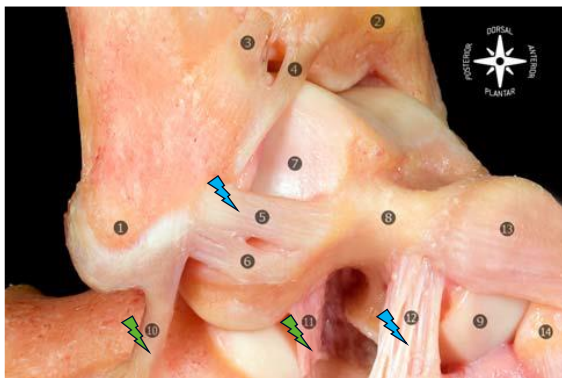
Mécanismes lésionnels :

- Adduction + supination :



Supination

Adduction



Lig. calcanéofibulaire
Lig. talocalca. interosseux

Lig. talofibulaire ant.
Lig. cervical

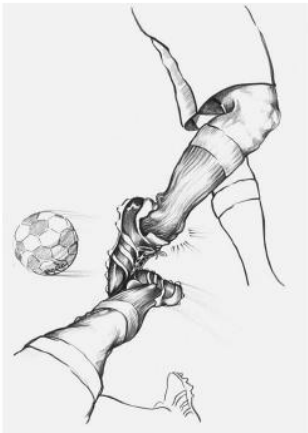
~~Flexion plantaire~~

(Mok, 2011 ;
Kristianslund, 2011)

ENTORSE DE LA CHEVILLE

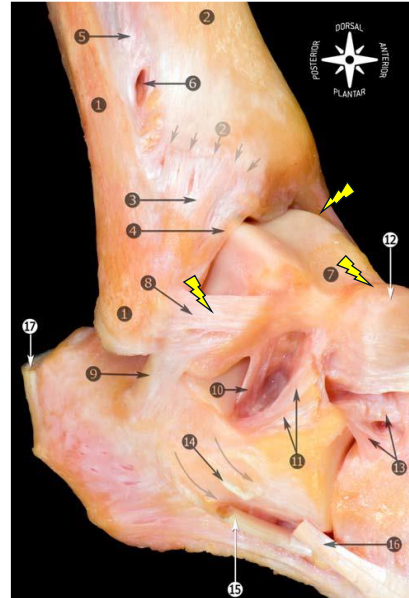
Mécanismes lésionnels :

- Flexion plantaire :



Faisceaux antérieurs des ligaments collatéraux
Partie antérieure de la capsule

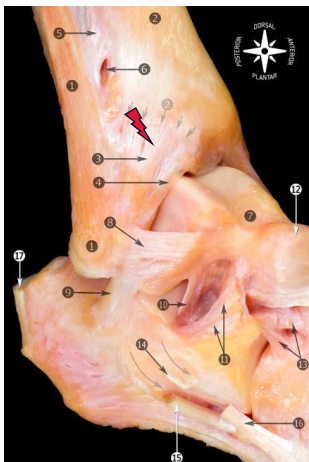
(Andersen, 2004)



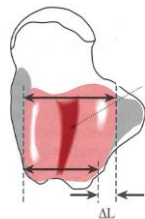
ENTORSE DE LA CHEVILLE

Mécanismes lésionnels :

- Abduction + Flexion dorsale (**pied ancré au sol**)



Syndesmose tibio-fibulaire inférieure

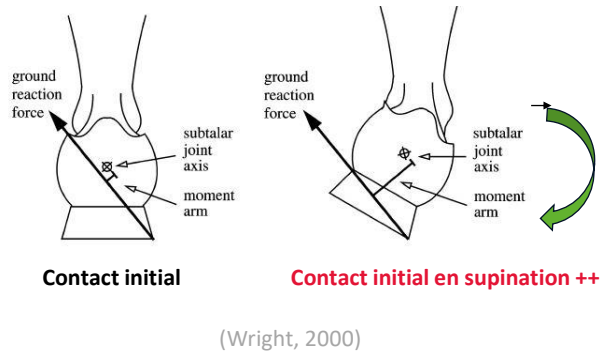
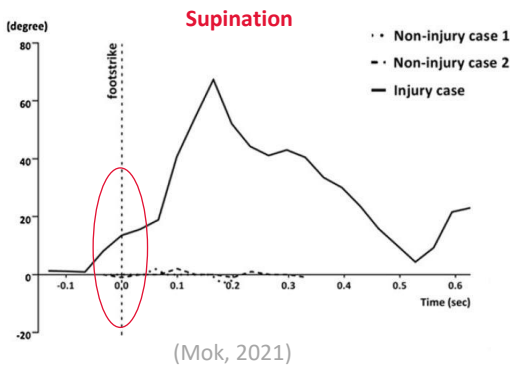


Etudes expérimentales :
(Close, 1956 ; Cordey, 1979)
Ecartement des malléoles entre 1 et 1,5 mm en FD

INSTABILITÉ DE CHEVILLE

Altérations du pattern de la marche chez ICC :

- Contact initial : position du calcanésus en **supination** >
=> **Moment inversant** >

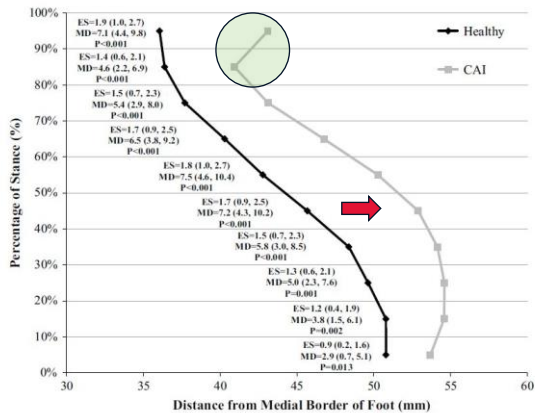


INSTABILITÉ DE CHEVILLE

Altérations du pattern de la marche chez ICC :

- Phase d'appui : **déplacement latéral du CoP**
+ pas appui sur hallux lors de la propulsion

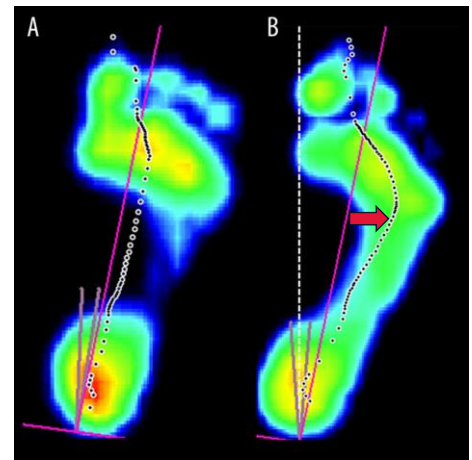
(Wan, 2023)



Double appui de propulsion : 7,1 mm

Fin appui : 7,5 mm

Double appui de réception : 2,9 mm

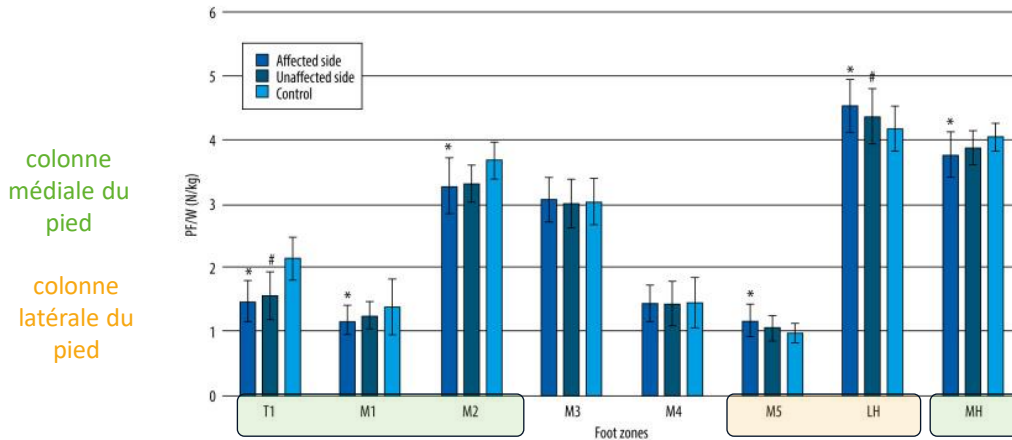


(Koldenhoven, 2016)

INSTABILITÉ DE CHEVILLE

Altérations du pattern de la marche chez ICC :

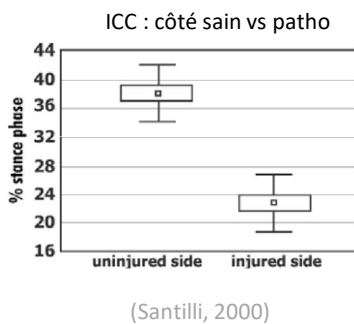
- Phase d'appui : distribution modifiée des pressions plantaires (Wan, 2023)



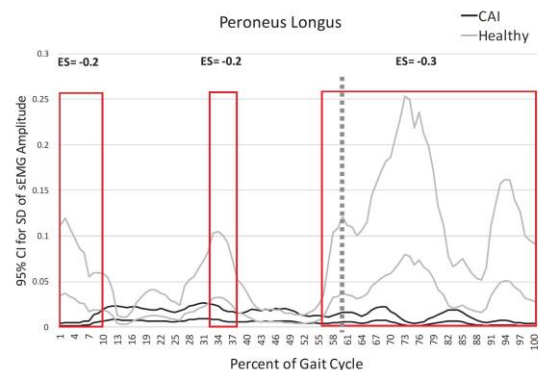
INSTABILITÉ DE CHEVILLE

Altérations du pattern de la marche chez ICC :

- **Everseurs ?**
 - ✓ Faiblesse des éverseurs : excentrique (Kobayashi, 2016) et concentrique (Arnold, 2009)
 - ✓ Altération de l'activité neuromusculaire dynamique → EMG



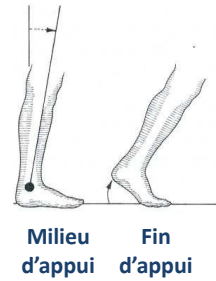
Sujets sains vs ICC
(Koldenhoven, 2018)



INSTABILITÉ DE CHEVILLE

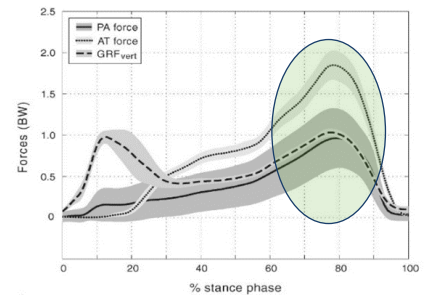
Altérations du pattern de la marche chez ICC :

- Entorse ou ICC : **restriction de FD** de la cheville en charge
(Hertel, 2000, 2002, 2019 ; Tabrizi, 2000 ; Denegar, 2002 ; Hoch, 2012)
- Fin d'appui : **Si** restriction de FD de la cheville
=> **décollement anticipé du talon**



Conséquences :

- Fasciite plantaire (Riddle, 2003 ; Gaitan, 2020)
- Tendinopathie achilléenne (O'Neill, 2016)
- Entorse de cheville : 5 x plus de risque
(Pope, 1998 ; De Noronha, 2006)

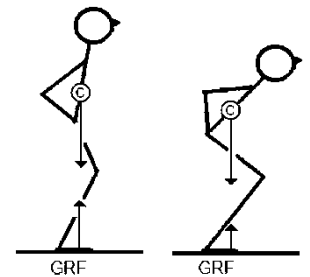


(Erdemir, 2004)

INSTABILITÉ DE CHEVILLE

Altérations du pattern de réception d'un saut chez ICC :

- Entorse ou ICC : **restriction de FD** de la cheville en charge
(Hertel, 2000, 2002, 2019 ; Tabrizi, 2000 ; Denegar, 2002 ; Hoch, 2012)
- Réception d'un saut : **Si** restriction de FD de la cheville
=> **flexion de genou diminuée**



Conséquences :

- GRF > (Fong, 2011 ; Hoch, 2015)
→ surcharge du **cartilage articulaire**
- Force de cisaillement antérieur > (Fong, 2011 ; Terrada, 2014)
→ surcharge du **LCA**



INSTABILITÉ DE CHEVILLE

Altérations du pattern de la marche chez ICC :

- Entorse ou ICC : **restriction de FD** de la cheville en charge
(Hertel, 2000, 2002, 2019 ; Tabrizi, 2000 ; Denegar, 2002 ; Hoch, 2012)

Causes :

- Rétraction du triceps sural
- Défaut de positionnement antérieur du talus (Hubbard, 2005 ; Wikstrom, 2010)

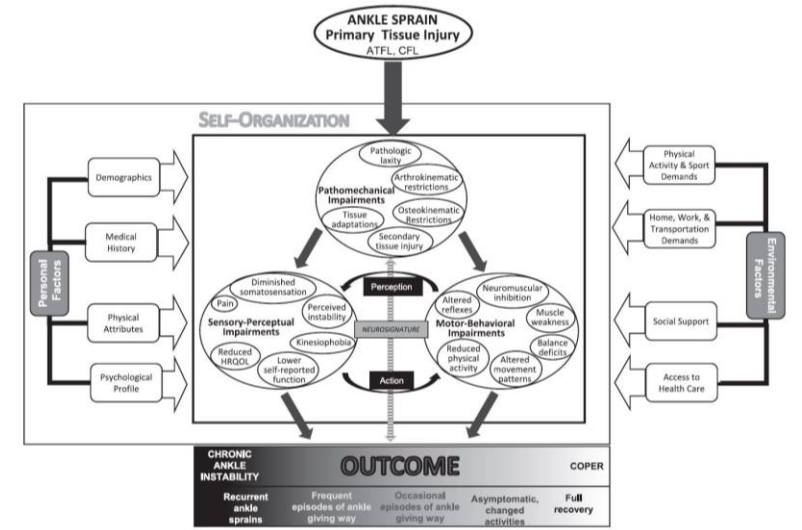


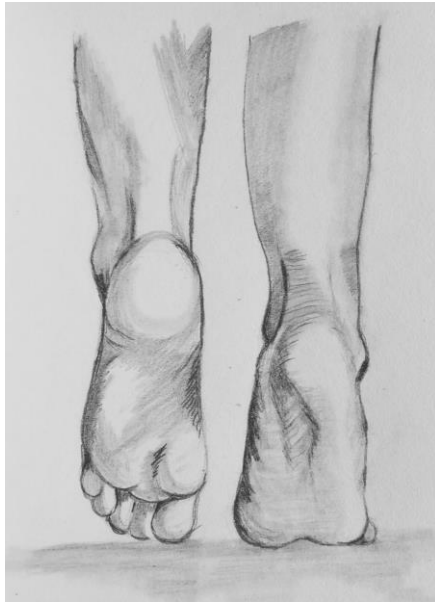
Table 2: Sagittal Plane Talar Position Group Means (mm), SDs, and 95% Confidence Intervals

Group	Ankle	Mean ± SD	95% Confidence Interval
CAI	Involved*†	3.7±1.4	3.1–4.3
	Uninvolved	3.0±1.6	2.3–3.7
Control	Matched involved	2.7±1.2	2.1–3.2
	Matched uninjured	2.8±1.3	2.3–3.3

TAKE HOME MESSAGE

- ICC => **Multifactorielles**
- Modèle de Hertel** (2019)
- Prise en charge :
 - ✓ Bilan initial précis
 - ✓ Rééducation ciblée





« *Le pied humain est un chef-d'œuvre
d'ingénierie et une œuvre d'art* ».

Léonard de Vinci

(1452 – 1519)

« *Il semble plus simple de faire
marcher l'homme sur la lune
que de comprendre comment il
réussit à marcher sur ses pieds* »

P. Klein

(2008)