

BIOMÉCANIQUE ARTICULAIRE

Professeur Gilbert VERSIER

Service de chirurgie orthopédique

Hôpital d'Instruction des armées BEGIN

94160 SAINT-MANDE

L'iconographie est notamment issue des ouvrages de Mr Netter et Kapandji

I- GÉNÉRALITÉS

- **Définition et Intérêts**
- **Anatomie générale des articulations**
- **Rappels sur les forces**

DÉFINITION

- **La biomécanique est l'étude de la mécanique appliquée au corps humain. Le terme provient du grec bios (vie) et de mécanique, science qui est l'étude des forces et des effets produits par leur application.**
- **C'est l'aspect dynamique et fonctionnel de l'arthrologie**

INTÉRÊTS DE LA BIOMÉCANIQUE

- **Comprendre les forces appliquées à l'organisme lors du mouvement et déterminer le meilleur moyen de le réaliser avec la plus grande efficacité: un support (articulation), un moteur (muscle) et une commande régulée**
- **Essayer de reproduire un modèle anatomique le plus proche de la réalité (prothèses, plastie ligamentaire...) afin de restituer la fonction**

GÉNÉRALITÉS SUR LES ARTICULATIONS

Déf: une articulation désigne la jonction entre deux ou plusieurs pièces squelettiques et les moyens d'union

On distingue:

- **les syssarcoses** qui sont des espaces de glissement et non de véritables articulations comme l'articulation scapulo-thoracique

- **les synarthroses (immobiles)**
- **les amphiarthroses (semi-mobiles)**
- **les diarthroses (mobiles)**

A- Les synarthroses

Articulations immobiles dans lesquelles les os sont en contact direct ou par l'intermédiaire d'une interposition

3 groupes:

- **symfibroses** qui sont des sutures (dentelées ou à biseaux alternés) comme les os du crâne
- **synchondroses** fœtales qui sont des synostoses d'ébauche cartilagineuse ossifiée (os sphénoïde, apophyse basilaire de l'os occipital)
- **syndesmoses**, réunion de 2 surfaces osseuses sans cartilage par du tissu fibreux ou des ligaments (syndesmose péronéo-tibiale inférieure)

B- Les amphiarthroses

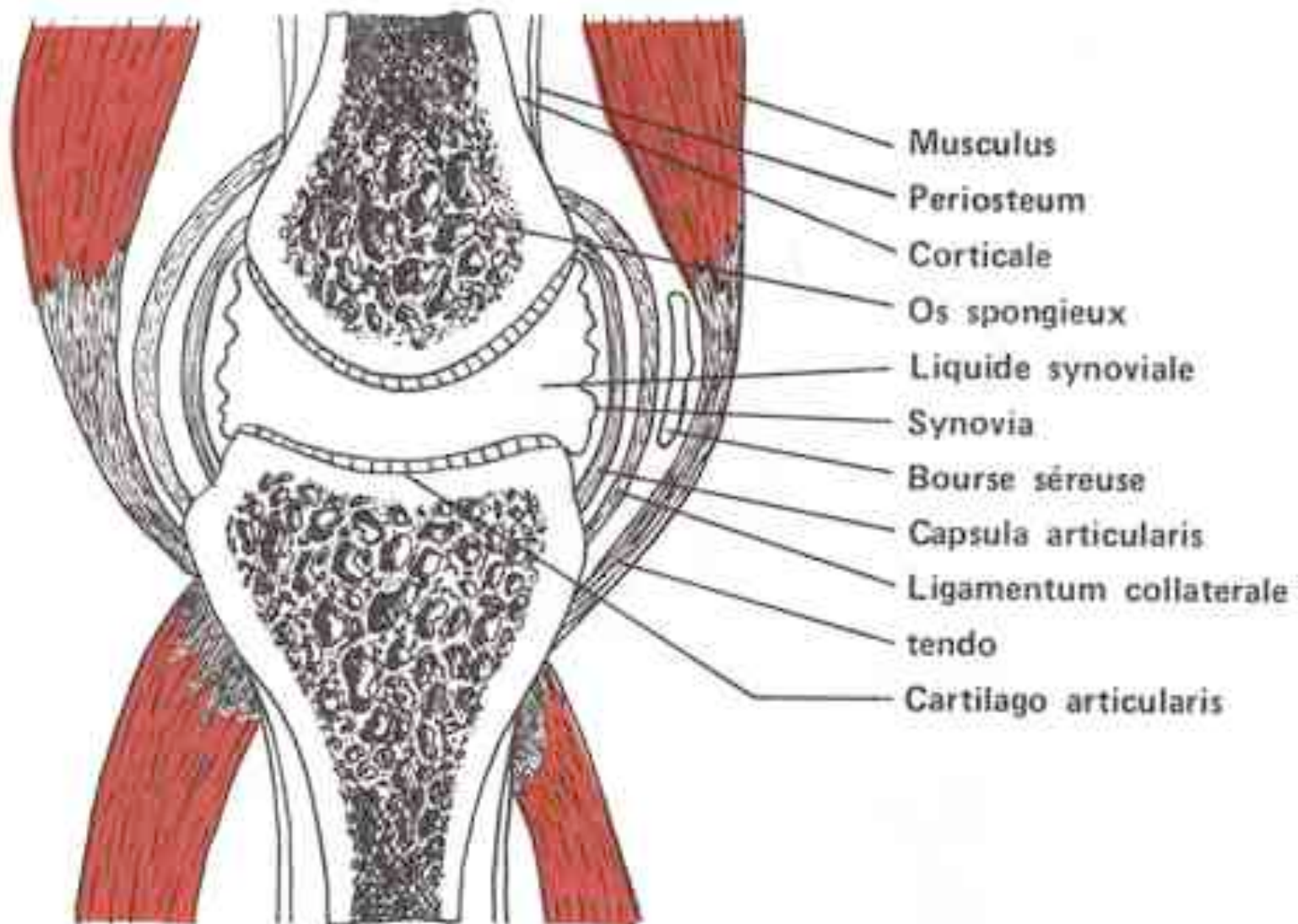
Articulations semi-immobiles ou à mobilité restreinte dans lesquelles les surfaces cartilagineuses sont en contact par l'intermédiaire d'un fibro-cartilage puissant, indépendant des ligaments périphériques (corps vertébraux, symphyse pubienne)

C- Les diarthroses

Articulations mobiles dans lesquelles les surfaces cartilagineuses sont en contact, parfois par l'intermédiaire d'un fibro - cartilage (ménisques), stabilisées par des ligaments périphériques (hanche, cheville)

Articulations anatomiquement et physiologiquement les plus parfaites

Les diarthroses



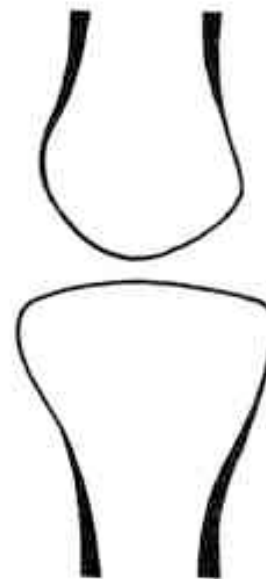
Les diarthroses

1- les surfaces articulaires osseuses

- épiphyses, zone large (répartition des Pressions)
- lisses et géométriques
- emboîtées (congruentes, concordantes) ou non



Concordance



Non concordance

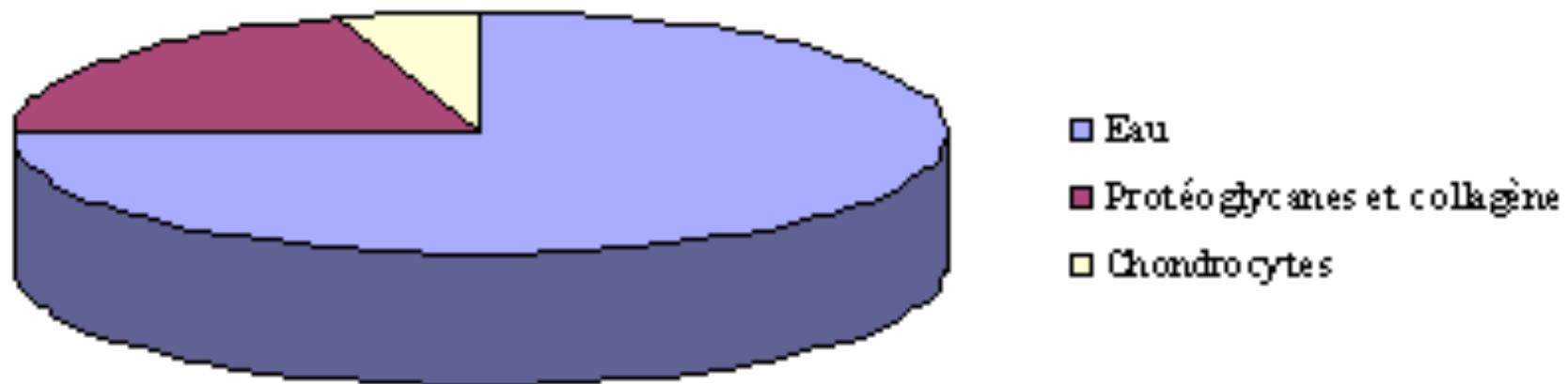
2- le cartilage articulaire

- **revêtement (transmission)**
- **plus ou moins épais selon contraintes (amortisseur)**
- **étendue selon amplitudes des mouvements (répartition)**

2- le cartilage articulaire

Il se compose de quatre éléments principaux

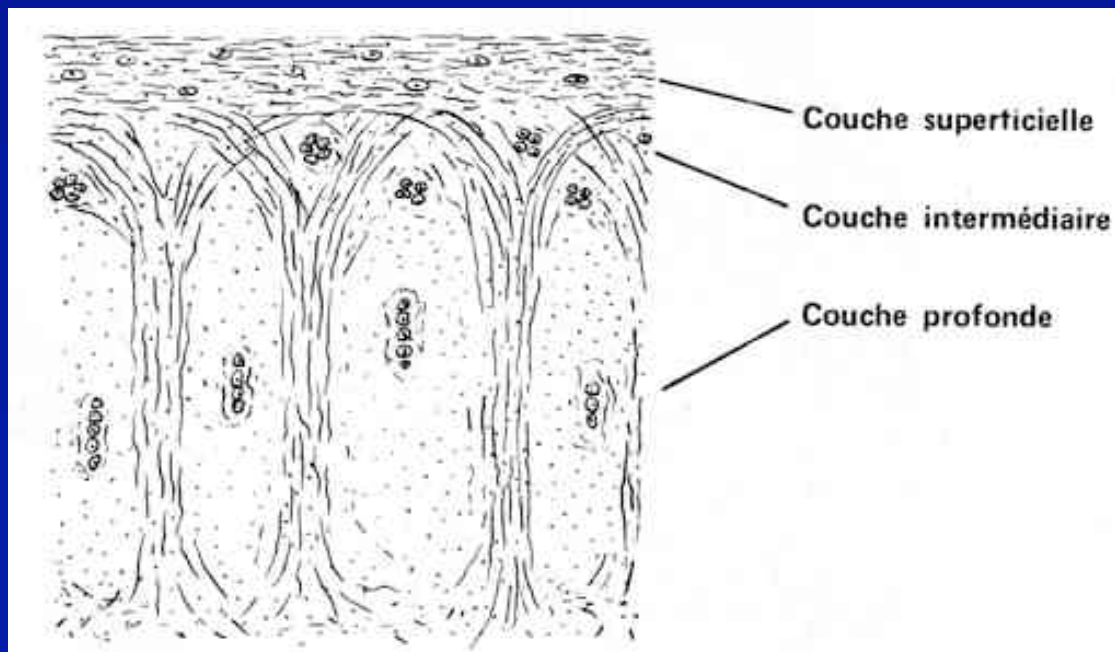
- un réseau de fibre de collagène,
- un gel de protéoglycanes hydrophiles
- des chondrocytes
- *L'eau qui représente 70 à 75% du cartilage.*



2- le cartilage articulaire

Il se compose de trois couches:

- superficielle (fibres tangentielles s'opposant aux forces de frottement)
- intermédiaires (fibres obliques)
- profonde (fibres perpendiculaires s'opposant aux pressions)



**Couche profonde
= 90%**

2- le cartilage articulaire

Nutrition par imbibition:

- à partir du liquide synovial
- grâce aux pressions et aux mouvements
- danger de l'immobilisation

Pas vascularisé = pas de cicatrisation

Il a 2 fonctions très liées

- **une fonction dynamique** (en association avec le liquide synovial) en diminuant au maximum les forces de friction présentes lors du déplacement des segments osseux.
- **une fonction statique** qui permet d'assurer la transmission, la répartition et l'amortissement des contraintes que subit l'articulation

La fonction dynamique

- **Glissement des surfaces articulaires avec frottements à minimum grâce à un coefficient de friction bas, inférieur à celui de la glace sur la glace.**
- **A ce mécanisme s'ajoute, lors de la mise en charge de l'articulation, une fuite de l'eau contenue dans le cartilage vers les régions voisines moins sollicitées et vers le milieu intra-articulaire.**

Le transsudat cartilagineux joue un rôle de **lubrification de la surface cartilagineuse**

La fonction statique

- **Transmission, répartition et amortissement des charges (contraintes) de par:**
 - Sa géométrie de surface
 - Sa constitution biologique
 - Sa structure histologique

3- les bourrelets péri-articulaires

Ils se composent de fibro-cartilage

Ils sont inconstants

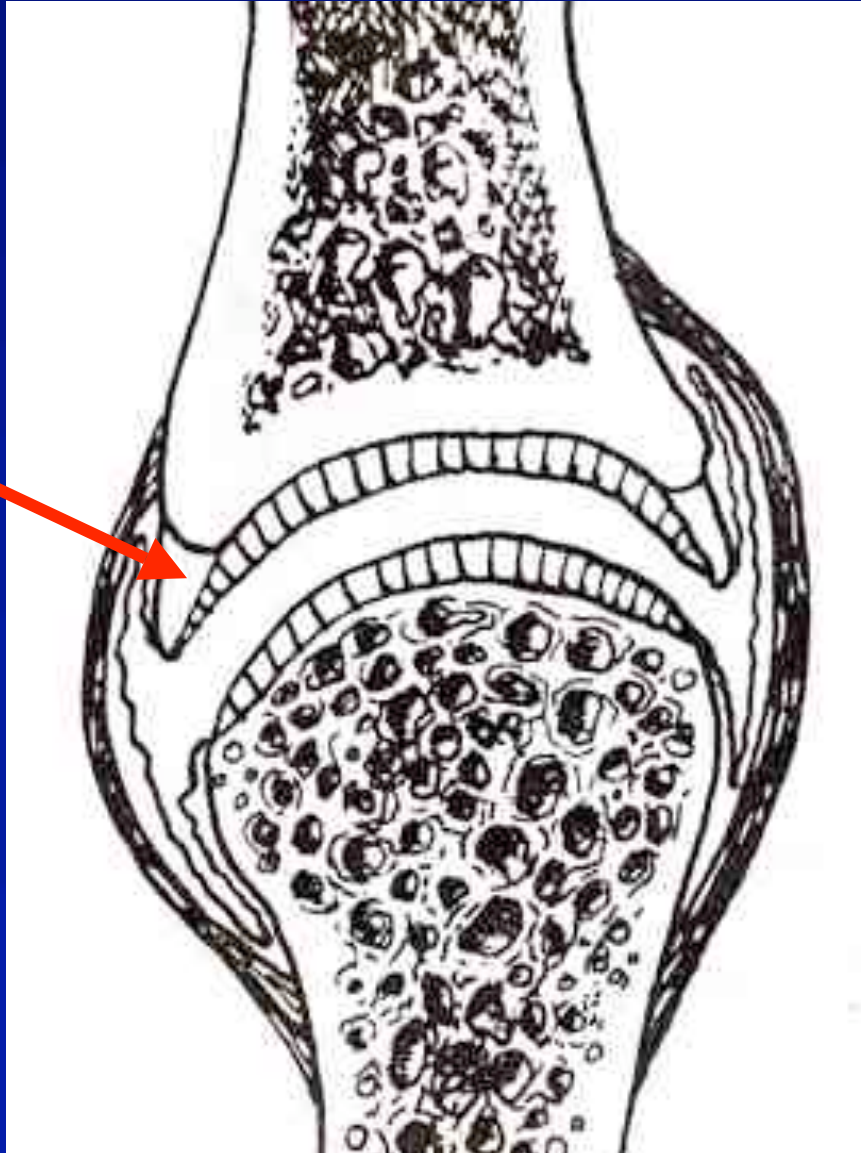
Ils servent à augmenter l'étendue de la surface articulaire

Ils comportent 3 faces:

- inférieure qui s'insère au pourtour de la surface**
- périphérique qui s'attache à la capsule**
- axiale encroûtée de cartilage**

3- les bourrelets péri-articulaires

Énarthrose
à bourrelet



4- les ménisques

Ils existent dans les articulations discordantes (genou)

Ils sont en fibro-cartilage de forme variable

- soit en disques biconcaves**
- soit en anneaux incomplets**

**Ils servent à améliorer la congruence articulaire,
d'amortisseur et de répartiteur de contraintes**

**Ils sont mobiles et se déplacent avec la surface où ils sont
fixés (tibia)**

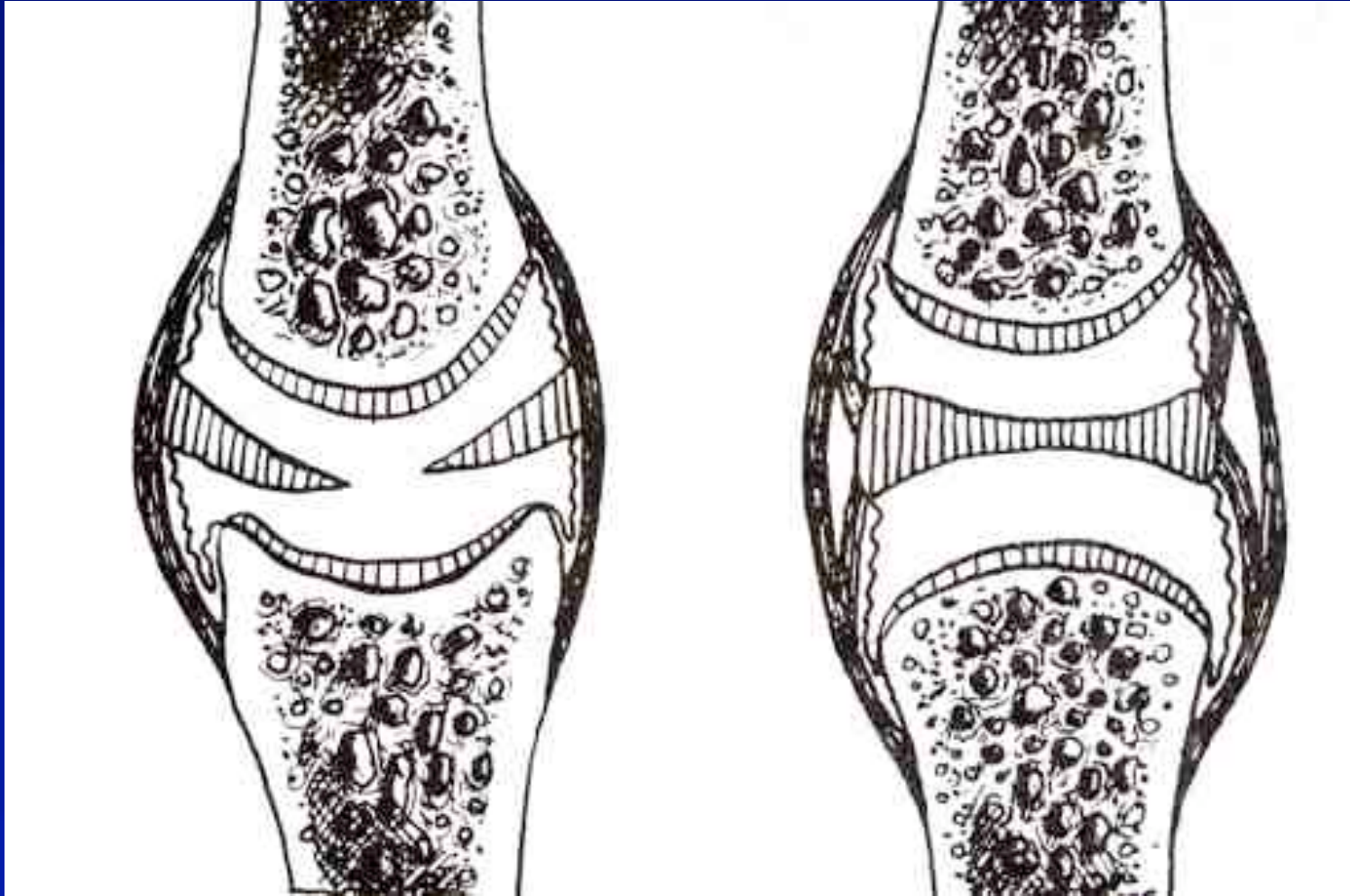
4- les ménisques

Ils comportent:

- une face périphérique qui s'attache à la capsule et reçoit la vascularisation**
- 2 faces axiales encroûtées de cartilage**
- un bord libre avasculaire**

Ainsi, on distingue une zone rouge périphérique très bien vascularisée et une zone blanche avasculaire

4- les ménisques



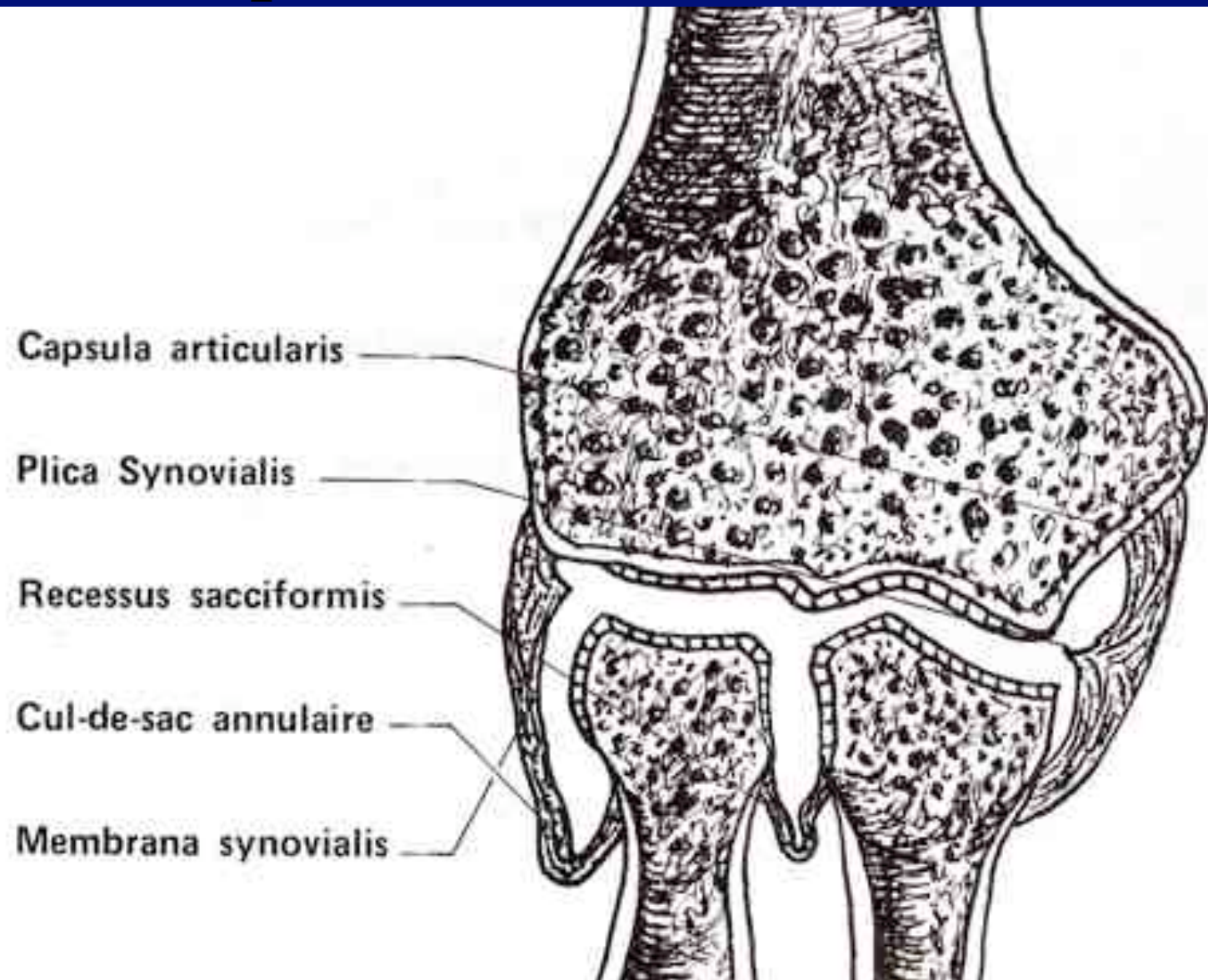
Diarthrose à ménisque

Bicondylienne à ménisque

5- la capsule articulaire

- **Manchon fibreux**
- **Insertions à distance du cartilage si grandes amplitudes articulaires**
- **Texture et épaisseur variables**
 - **Parfois très épaisse et résistante (pseudo-ligaments)**
 - **Parfois très lâche ou déhiscente (communications)**

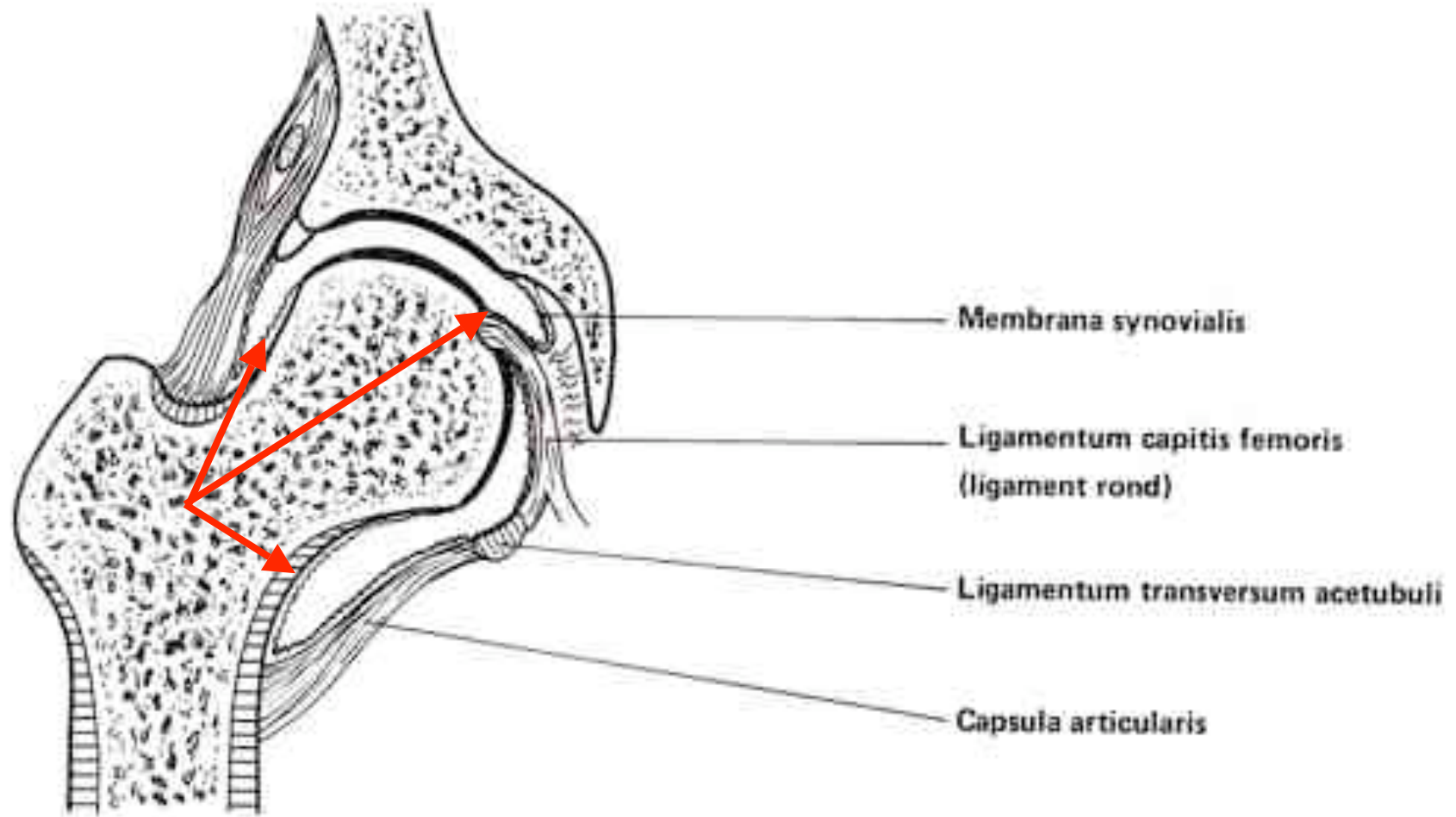
5- la capsule articulaire



6- la membrane synoviale

- **Séreuse mince intra-articulaire (manchon)**
- **Tapisse la face endo-articulaire de la capsule**
- **S'arrête au pourtour du cartilage**
- **Irrégularités possibles:**
 - franges, prolongements synoviaux (LPB)**
- **secrétion de liquide synovial**
 - **Nutrition**
 - **Diminue la friction**
 - **Facilite le contact et le déplacement articulaire**

6- la membrana sinoviale



Coupe horizontale de l'articulatio coxae.

7- les ligaments

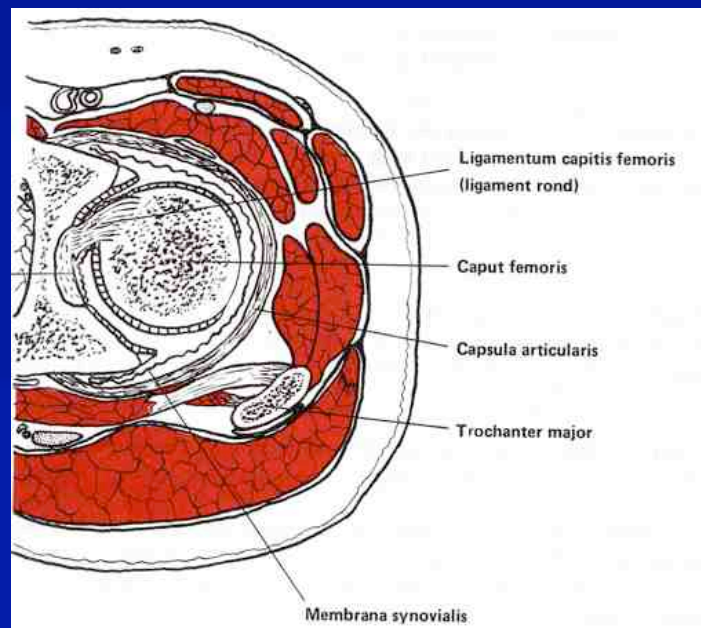
- **Structure fibreuse, résistante et élastique (co.e=20%)**
- **Deux insertions osseuses (# des tendons)**
- **Renforcent de la capsule**
- **Richement innervés (proprioception)**
- **Limitateurs de mouvement = stabilisateurs passifs**
 - **Antérieurs à la hanche = limiter hyperextension**
 - **Latéraux sur genou = limiter valgus et varus**
 - **Croisés au genou = limiter la rotation et translation AP**

7- les ligaments



8- les muscles

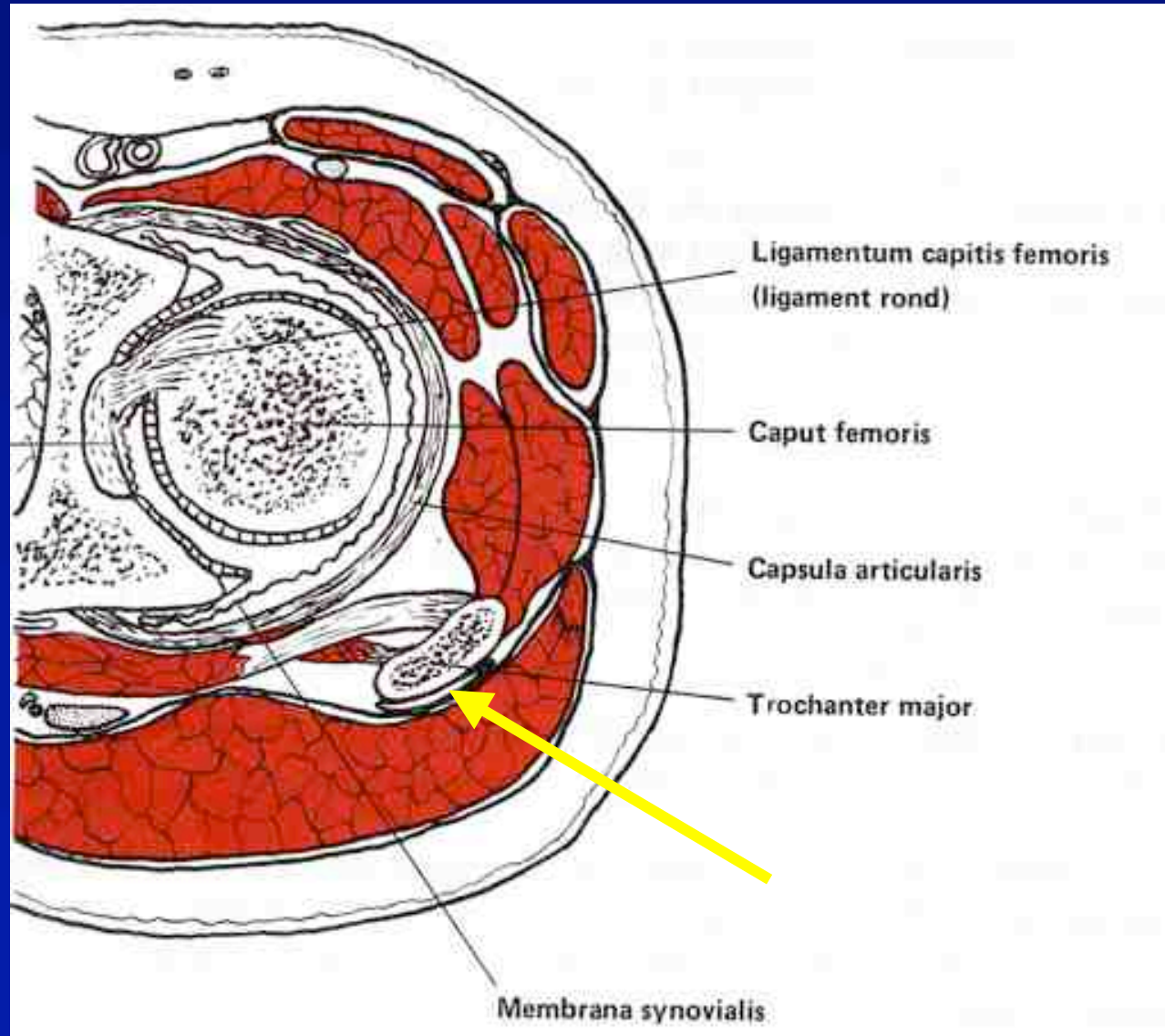
- **Moteurs articulaires**
- **Actions isolées ou en association pour un mouvement**
- **Stabilisateurs actifs (tonus et contraction)**
- **Arcs réflexes (effecteur de la proprioception)**



9- les bourses séreuses péri-articulaires

- **Poche séreuse liquidienne**
- **Interposition entre capsule et tendon ou ligament afin de favoriser le glissement de ces formations**
- **Communication parfois avec l'articulation (genou)**

9- les bourses séreuses péri-articulaires



classification biomécanique des diarthroses

Selon la forme des surfaces articulaires (anatomiques)
Selon les mouvements qu'elles autorisent (fonctionnelle)

Clas. anatomique	Clas. fonctionnelle
énarthroses	3 degrés de liberté
condylarthroses	2 degrés de liberté
Articulation en selle	2 degrés de liberté
trochléarthroses	1 degré de liberté
trochoïdes	1 degré de liberté
arthroïdes	1 à 3 degrés de liberté

Les énarthrozes

A- morphologie

Surfaces articulaires = segments de sphère

Sphère creuse agrandie par un bourrelet

Grande mobilité (3 degrés de liberté)

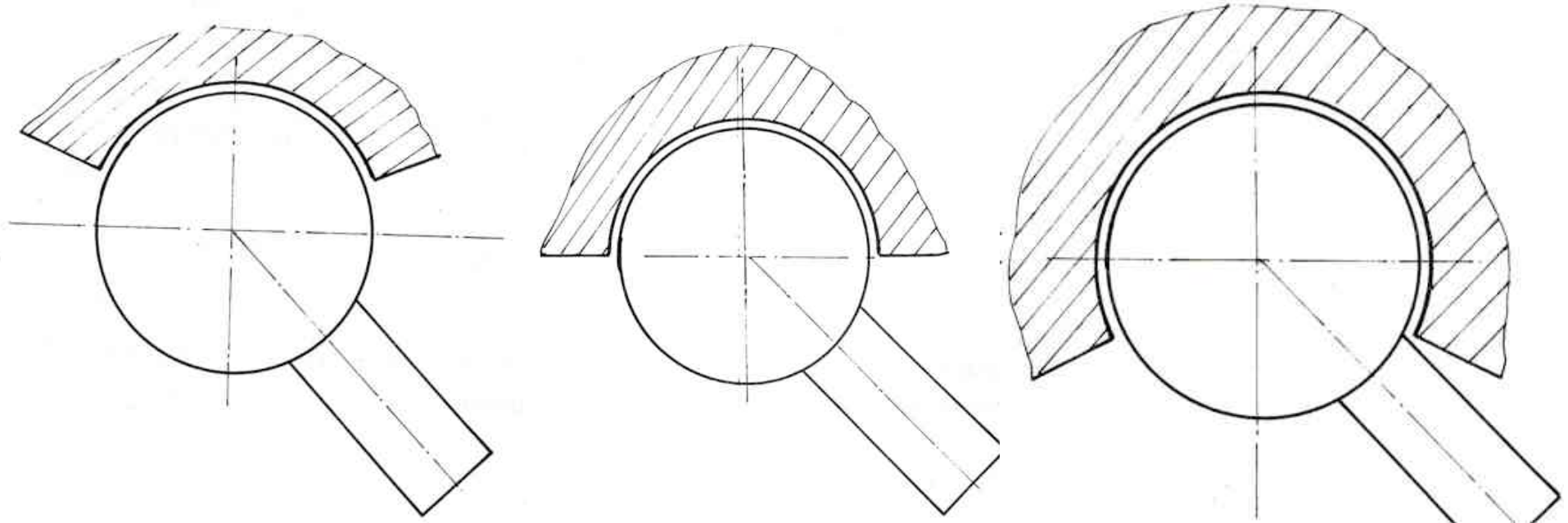
Congruence variable:

1- naturelle, sphère creuse = sphère pleine

2- non naturelle = S. creuse $< \frac{1}{2}$ sphère

3- engainement = S. creuse $> \frac{1}{2}$ sphère

Les énarthroses



**Congruence
non naturelle
(gléno-humérale)**

**Congruence
naturelle**

**Engainement
(coxo-fémorale)**

————— Mobilité ↘ Stabilité ↗ —————→

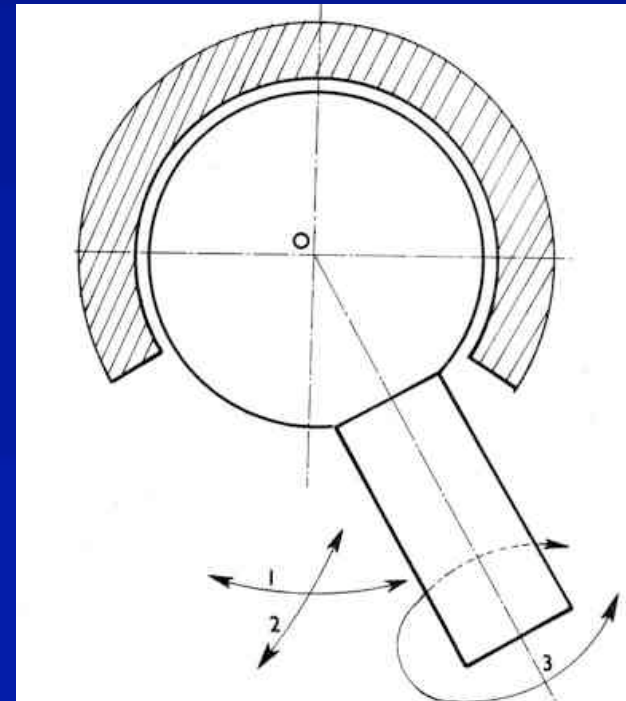
Les énarthrozes

B- modélisation

Le modèle mécanique est la rotule

Rotation autour des 3 axes:

- axe de la tige
- plan de la figure
- plan perpendiculaire



Les énarthroses

Le mouvement peut se décomposer en:

Roulement (roue qui roule) en cas de concordance, chaque point de la sphère pleine correspond à des points successifs de la sphère creuse

Glissement (roue qui patine) en cas de concordance non naturelle, chaque point de la sphère pleine correspond au même point de la sphère creuse

Les condylarthroses

Surfaces articulaires = segments d'ellipse à 2 rayons de courbure

2 types:

- condylienne simple (radio-carpienne) avec 2 degrés de liberté**
- doubles condyliennes associées (genou) avec 1 degrés de liberté**

Les condylarthroses

condylienne simple (radio-carpienne):

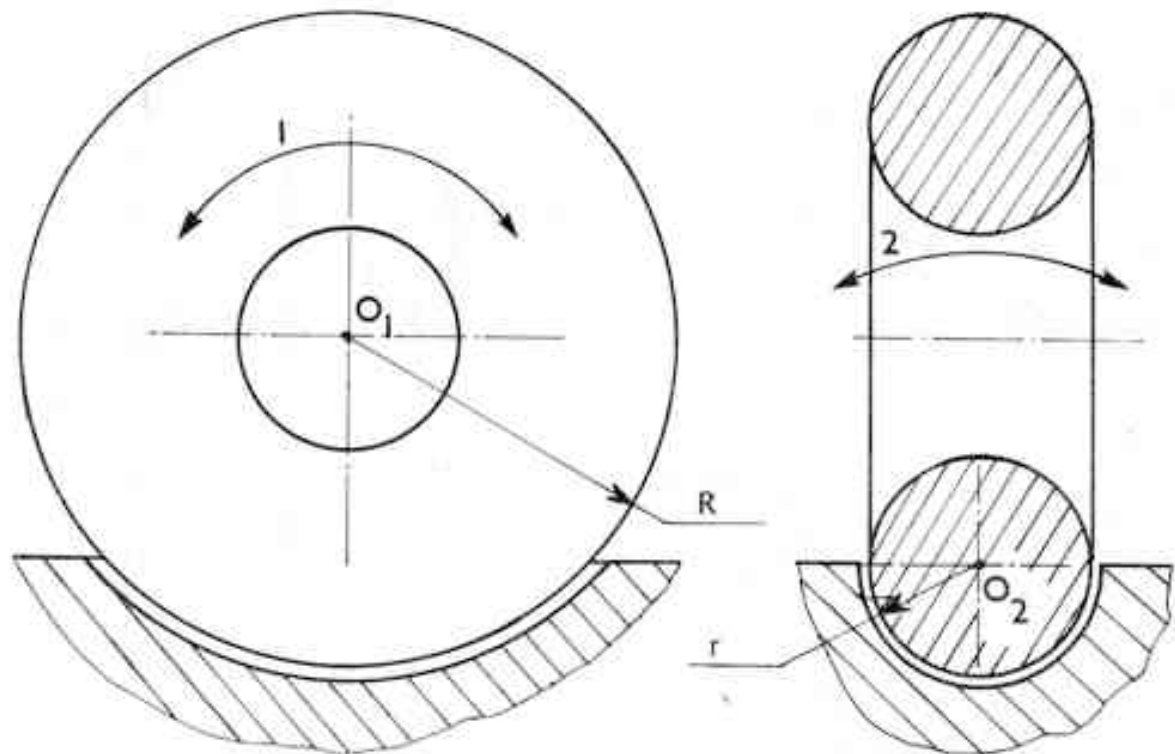
abduction – adduction

flexion – extension

Modèle

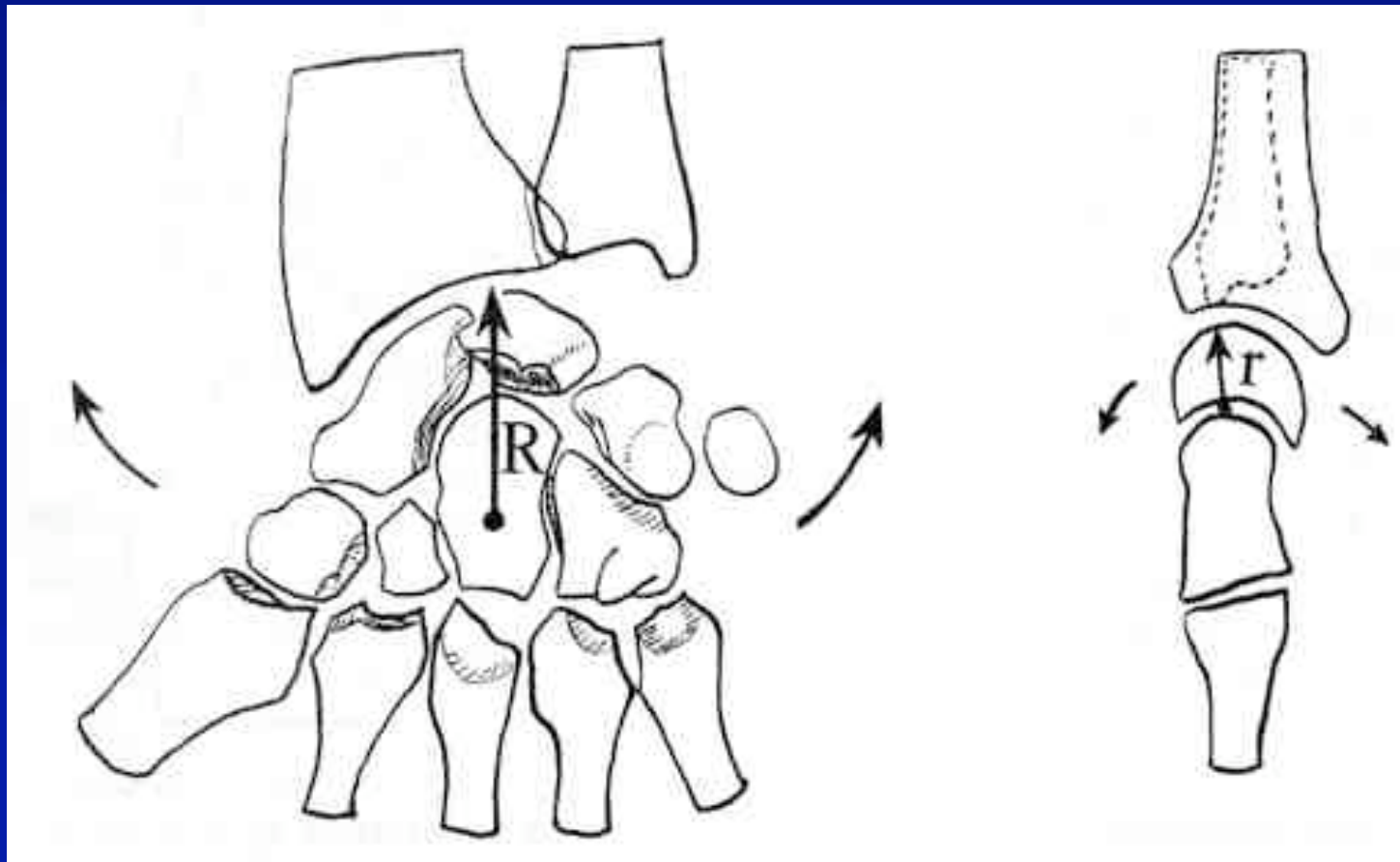
=

roue dans un rail



Les condylarthroses

condylienne simple (radio-carpienne):



Les condylarthroses

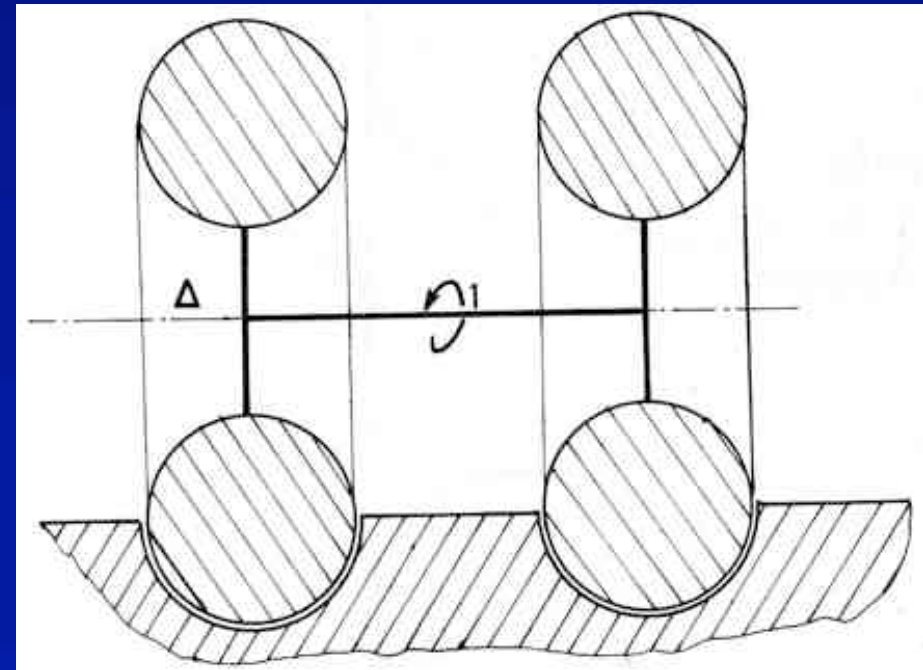
Doubles condyliennes associées (genou):
flexion – extension

Modèle

=

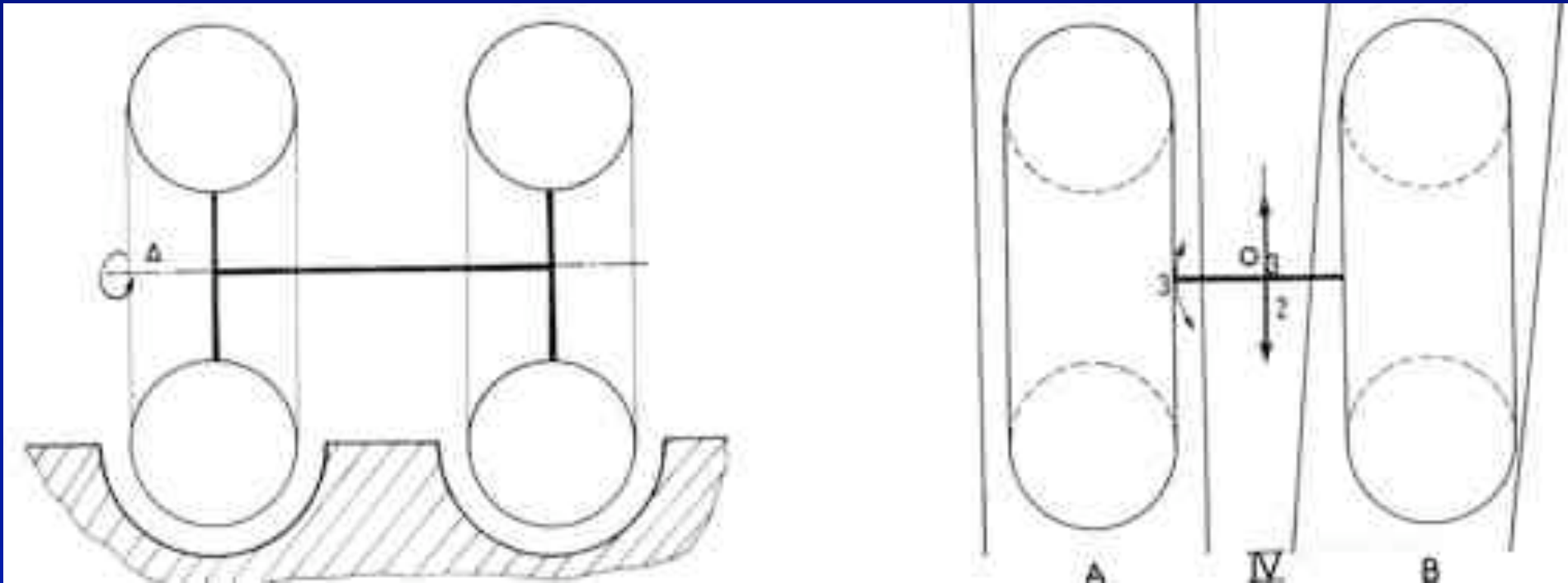
Essieu à 2 roues
dans leurs rails

rotation autour de l'axe de l'essieu



Les condylarthroses

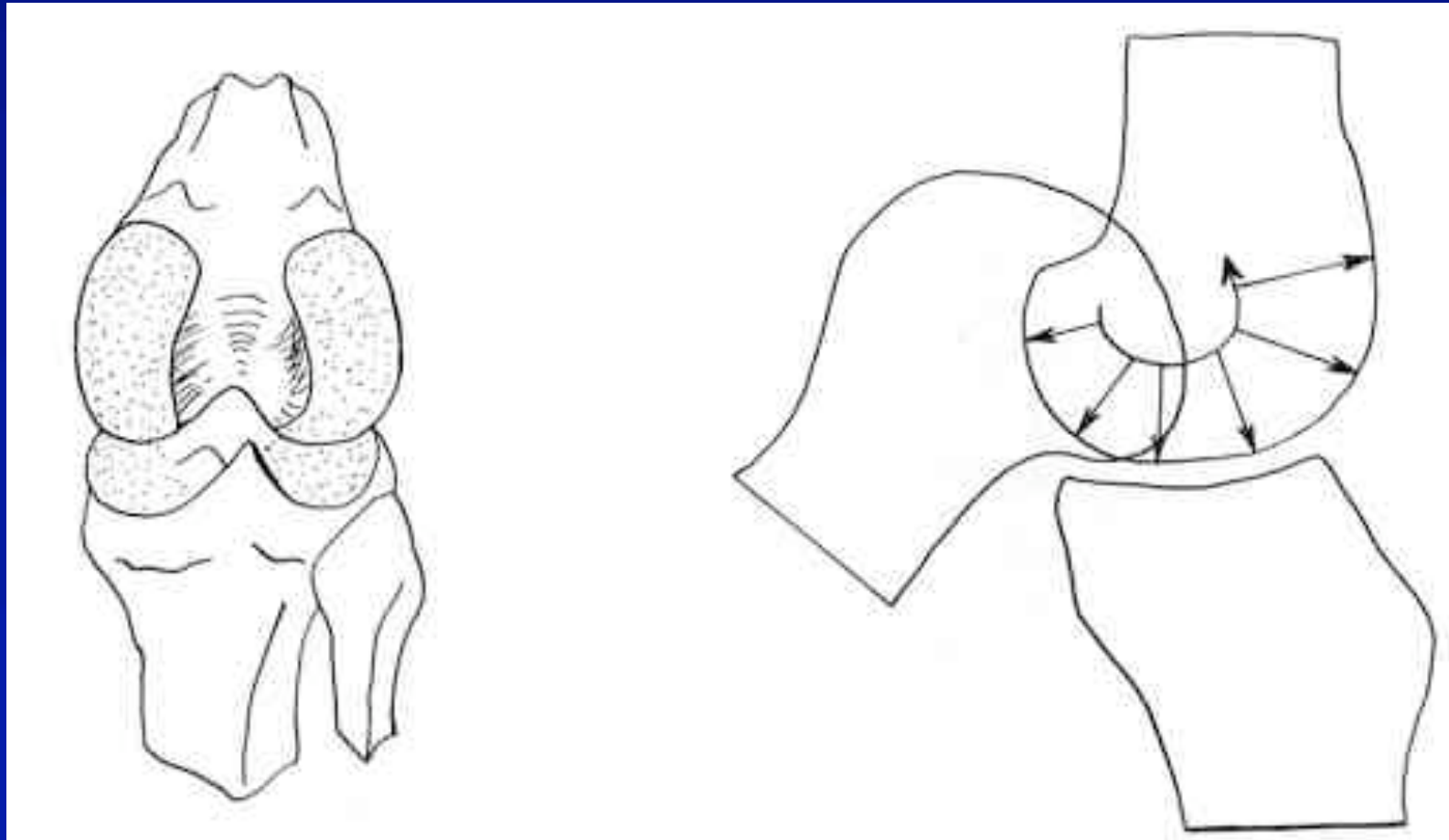
Doubles condyliennes associées (genou):



Ménisques et usure autorisent quelques mouvements en rotation et en valgus-varus

Les condylarthroses

Double condylienne associée (genou)



Les articulations en selle

Articulation à emboîtement réciproque

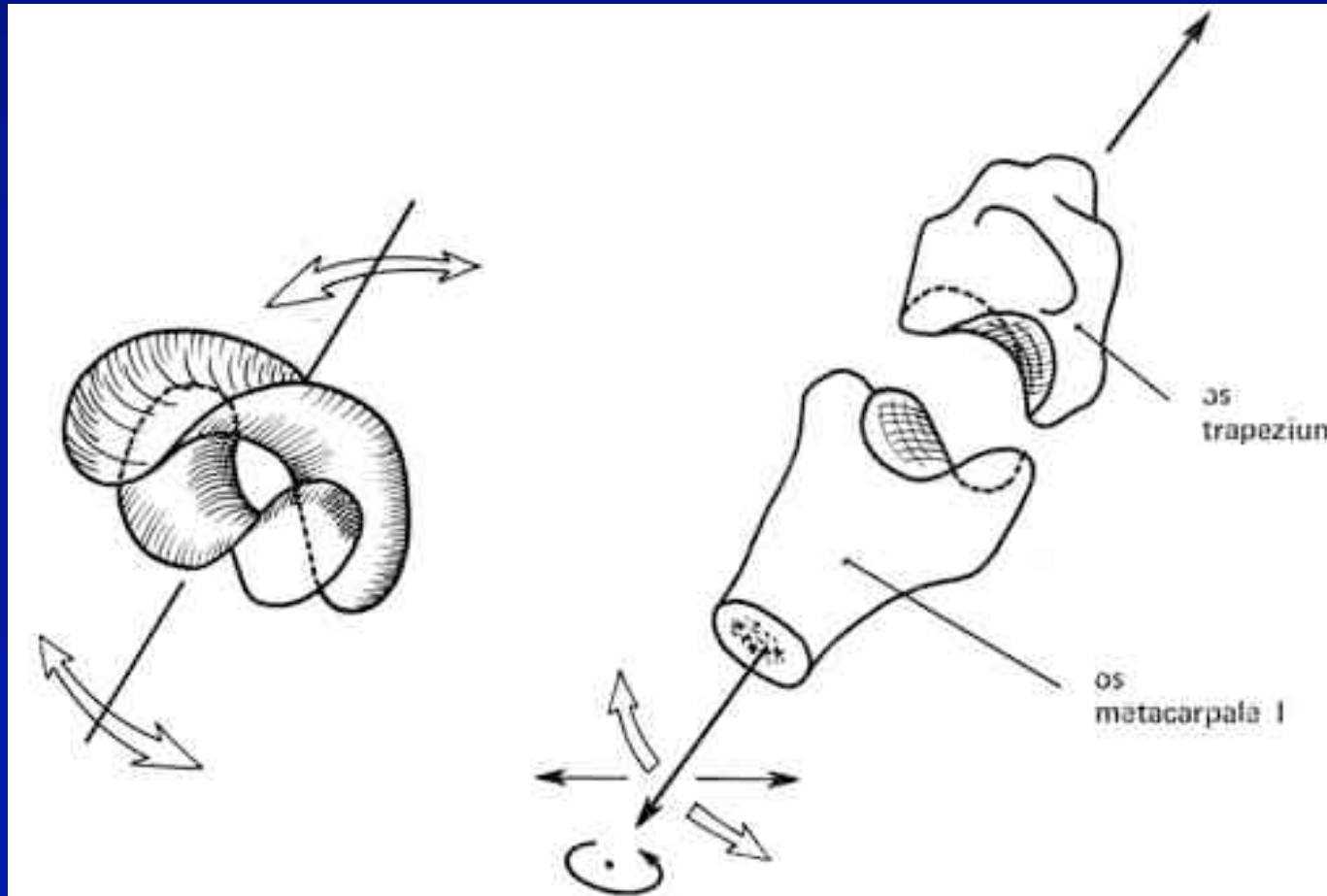
Modèle = moulage de fraction de gorge de poulie
ou selle de cheval

2 rotations possibles = 2 degrés

Si emboîtement incomplet (rayon plus grand) = 3 degrés
limité par surface, capsule et ligaments

Les articulations en selle

Articulation à emboîtement réciproque



Les trochléarthroses

Articulation à emboîtement trapézoïdal

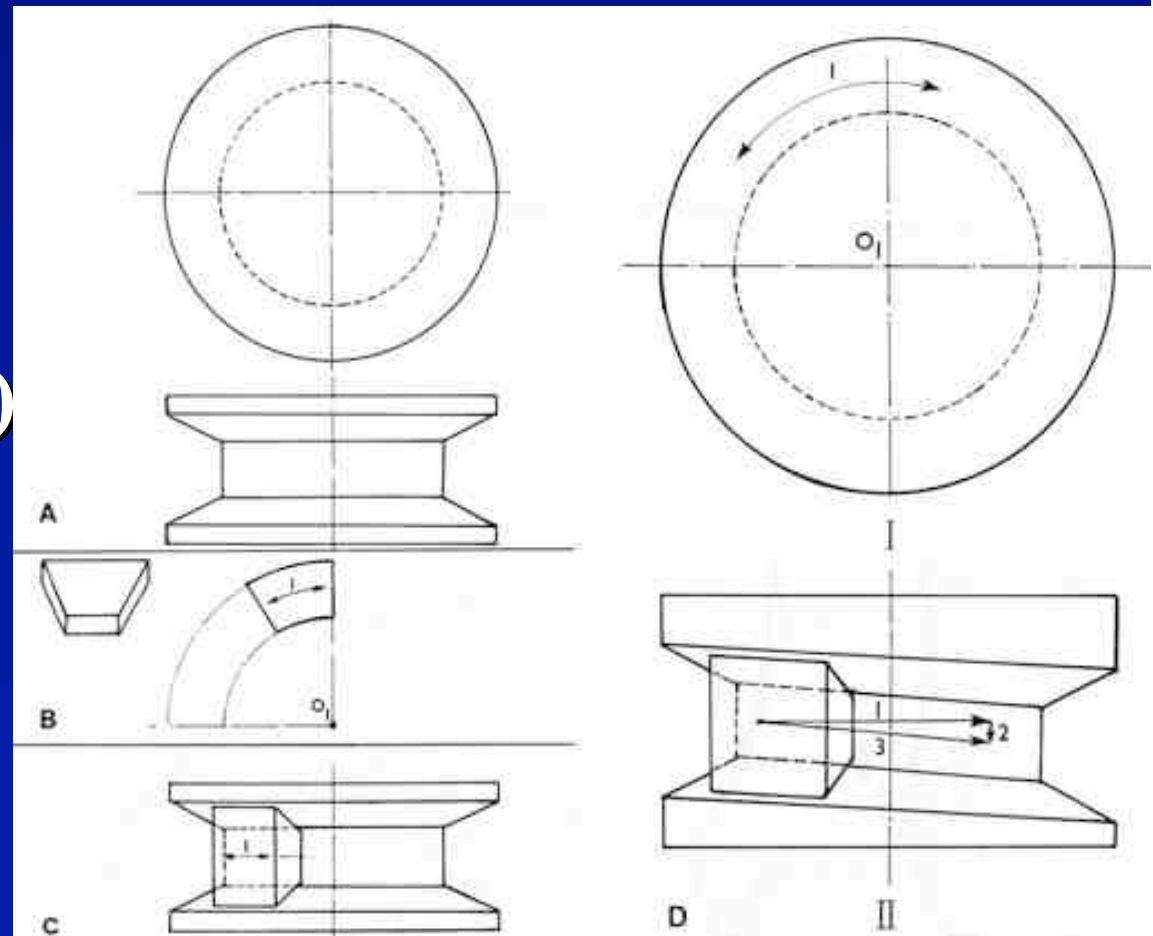
Modèle type est le mouvement d'un bloc dans une gorge trapézoïdale

Variante = système de tenon et mortaise

Les trochléarthroses

Articulation à emboîtement trapézoïdal

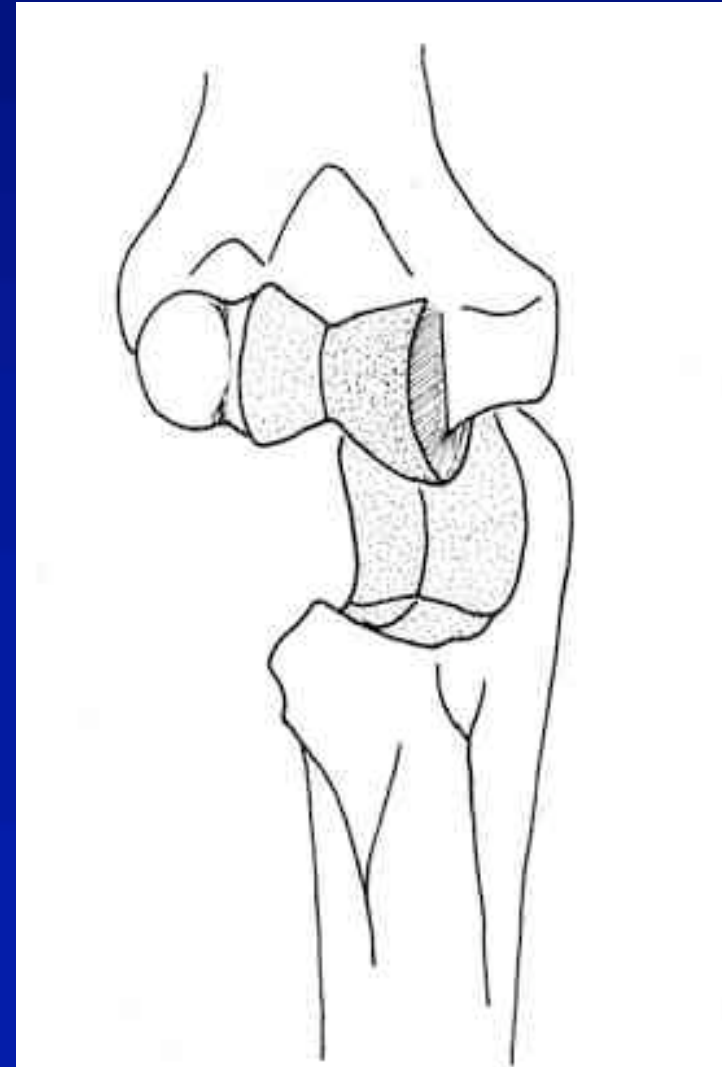
Modèle type
et
Composante
rotatoire (pas de vis)



Les trochléarthroses

**Articulation
à emboîtement trapézoïdal**

**Modèle type
et
Composante
rotatoire**

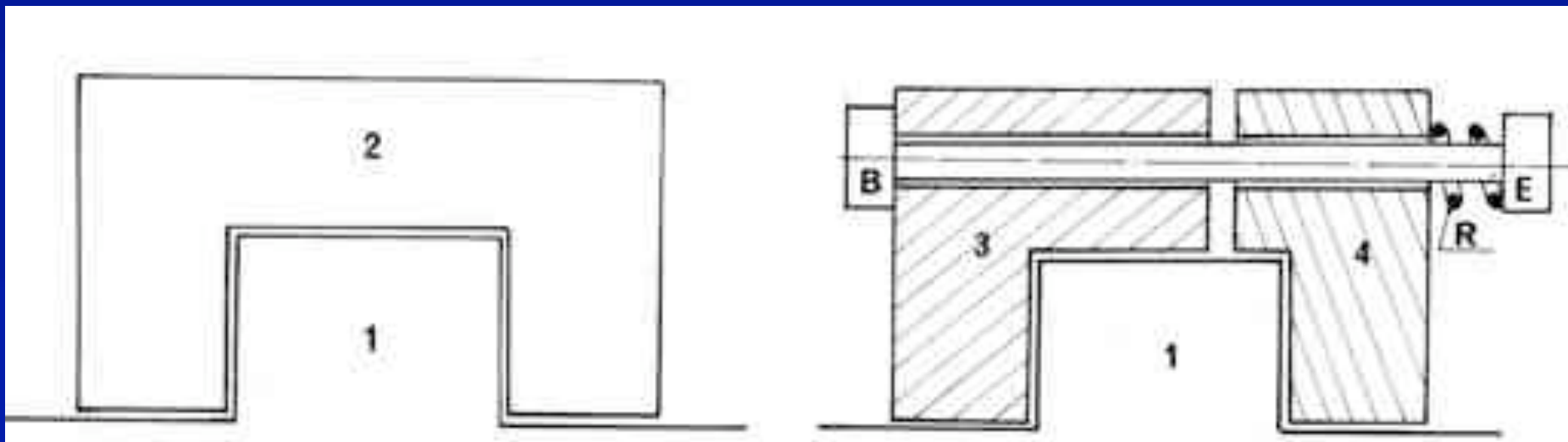


Les trochléarthroses

Articulation à emboîtement trapézoïdal

Systeme
de
tenon et mortaise

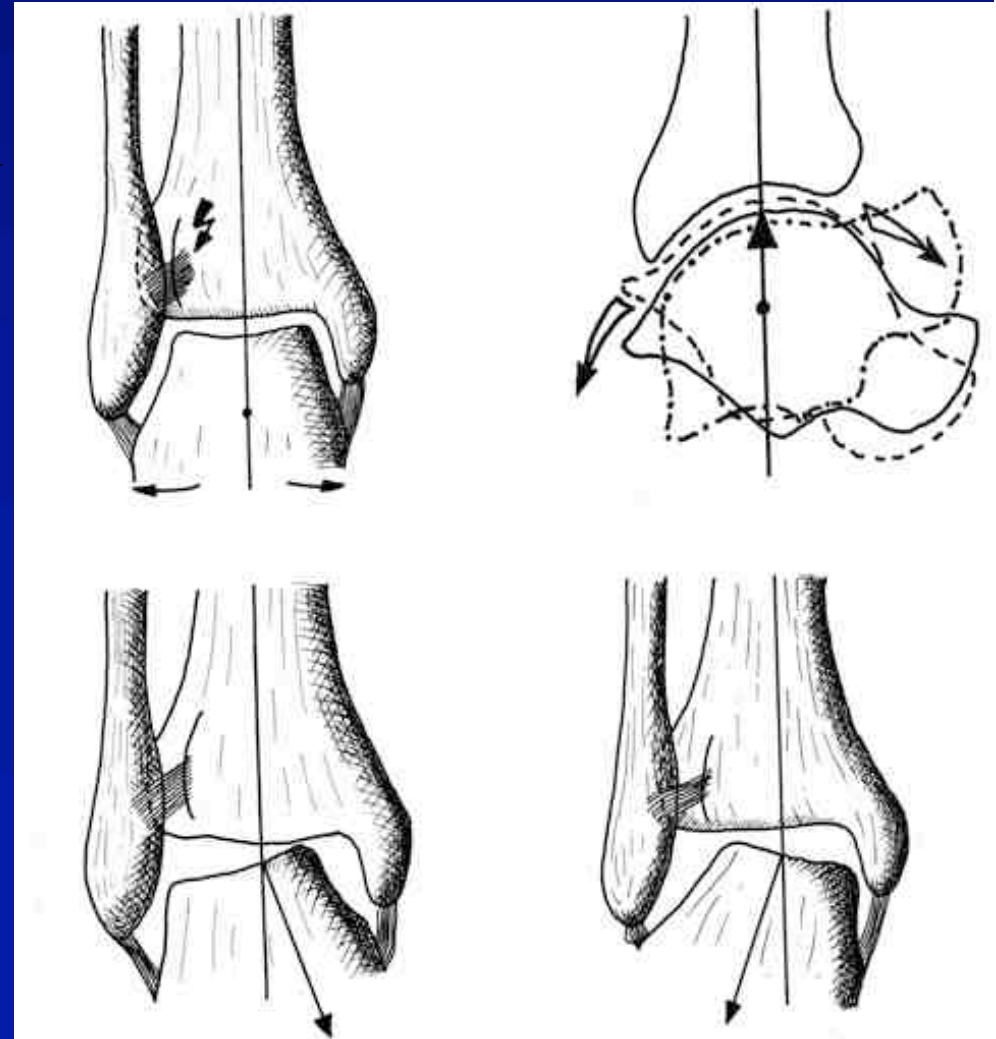
1 degrés de liberté
(2 si la mortaise
peut s'écarter)



Les trochléarthroses

Articulation à
emboîtement trapézoïdal

Systeme
de
tenon et mortaise



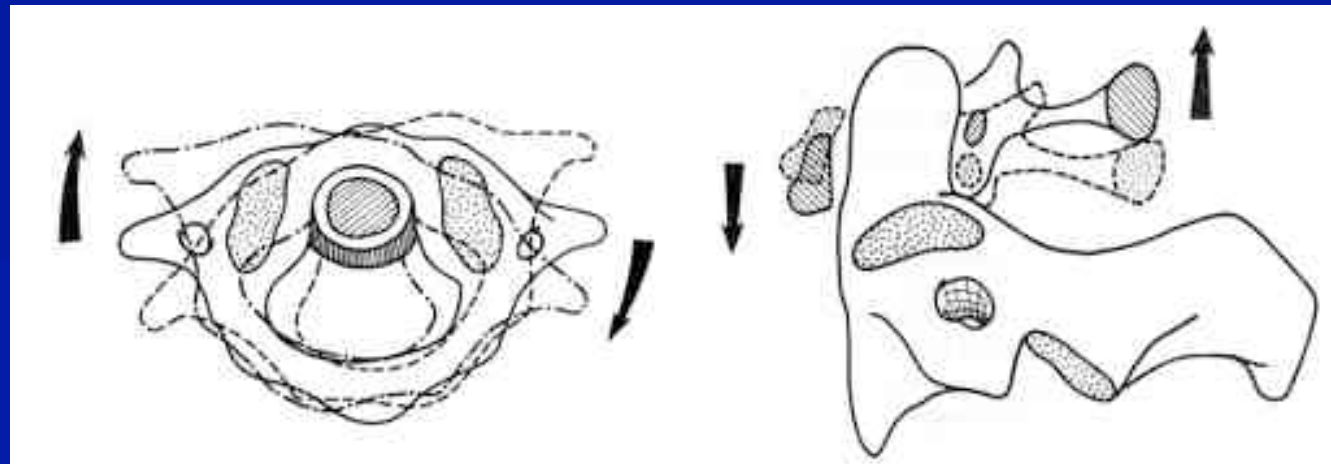
Les trochoïdes

Les trochoïdes simples (art. atloïdo-odontoiidienne)

Modèle type = le piston dans le cylindre (seringue)

1 degré de liberté en fait:

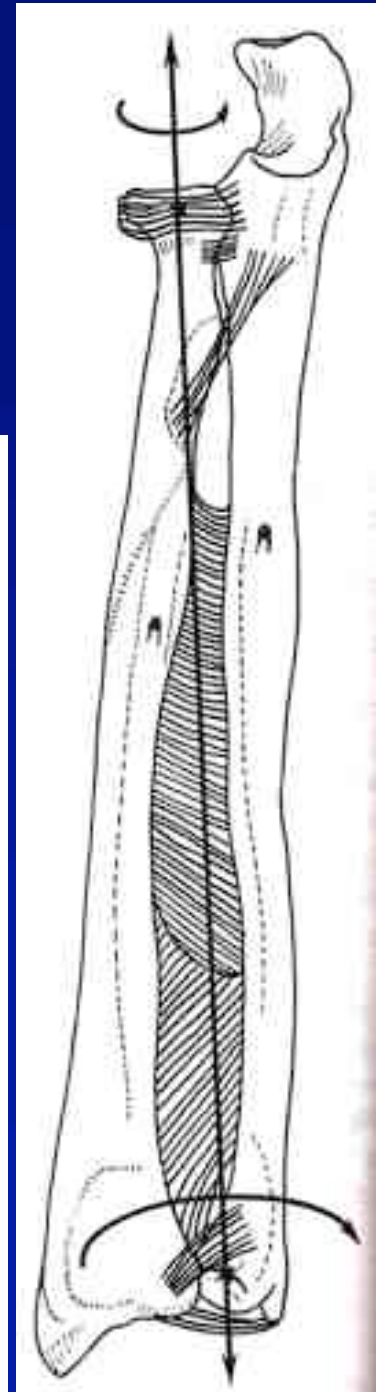
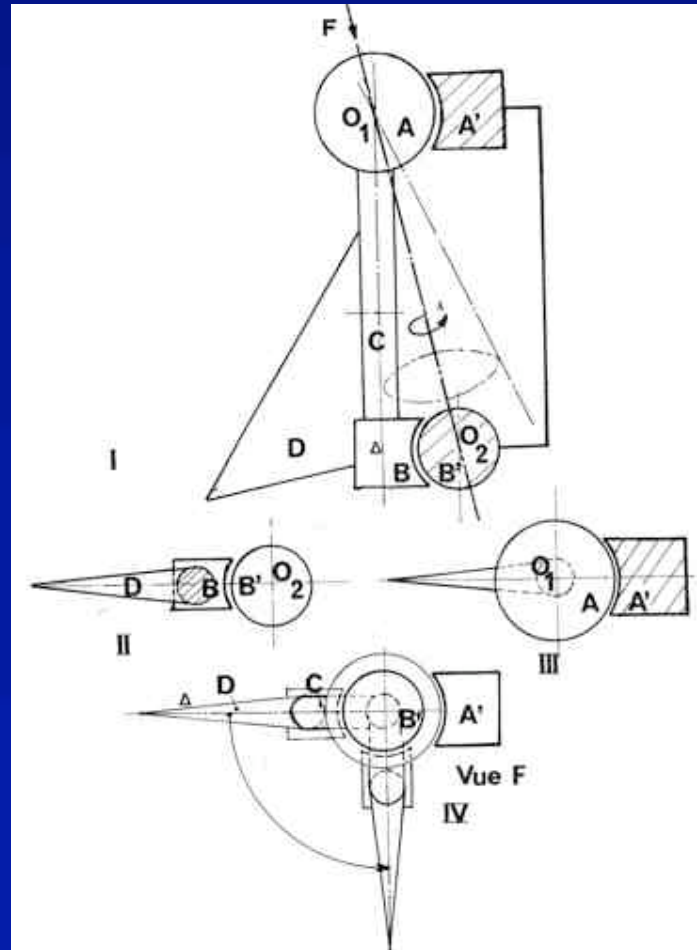
- rotation piston sur cylindre
- rotation cylindre sur piston
- glissement axial



Les trochoïdes

Les doubles trochoïdes inversées (radio-cubitales)

Axe de rotation
est O_1-O_2

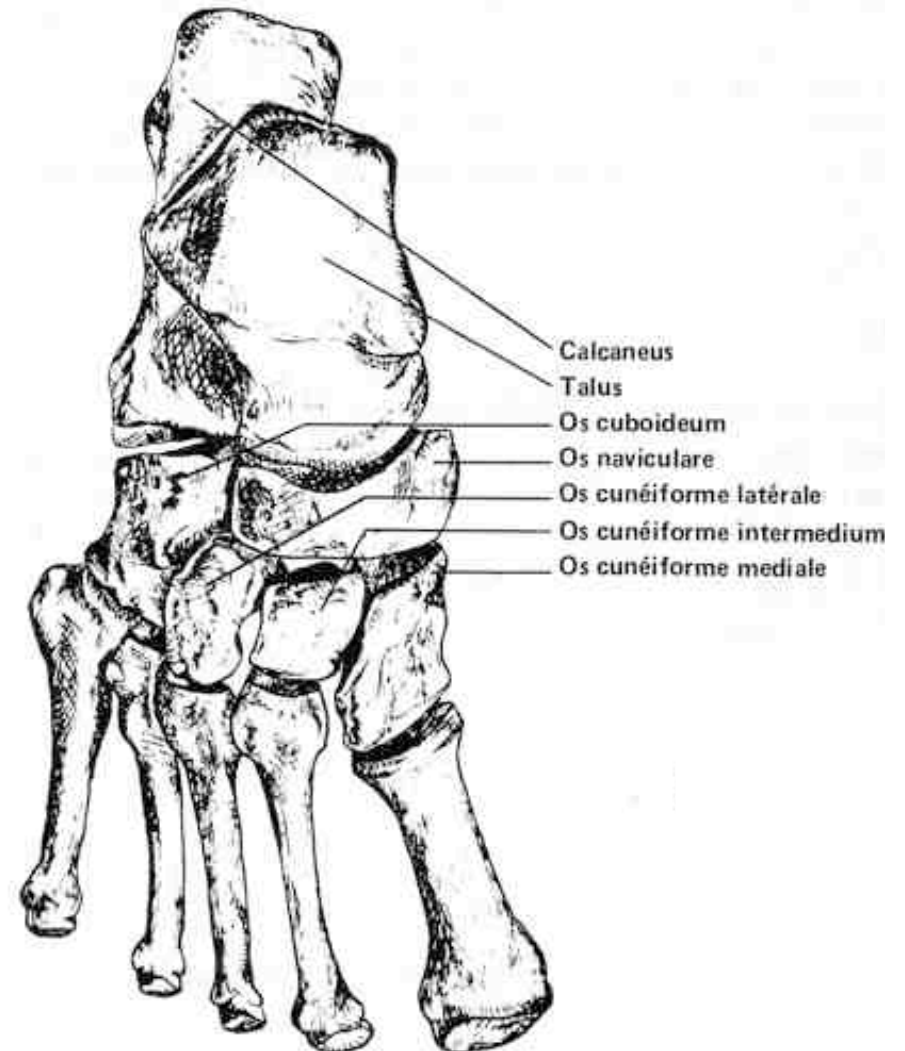


Les arthrodies

**articulations
à surfaces planes**

**Très peu de mobilité
car contention élevée**

**Articulations du carpe
ou du tarse**



RAPPELS SUR LES FORCES

- **Définition:**

cause capable de déformer un corps, de créer ou de modifier le mouvement d'un corps (exprimée en Newton).

Les forces

- **Caractéristiques d'une force:**
 - **Point d'application** : endroit où la force agit (O).
 - **Direction ou support** : droite sur laquelle va s'exercer la force.
 - **Sens** : c'est celui dans lequel elle entraîne le point d'application donc positif ou négatif suivant si elle agit dans le sens ou contre le mouvement.
 - **Intensité** : importance de la force.



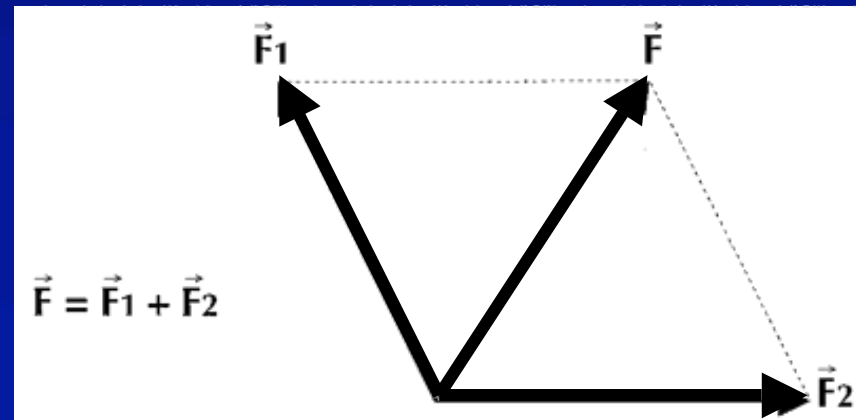
Les forces

On distingue 2 types de forces:

- **les forces internes** qui proviennent des actions musculaires sur les leviers osseux;
- **les forces externes** qui sont des contraintes exercées sur le corps par l'environnement (gravitation, frottement, réaction, action d'autrui).

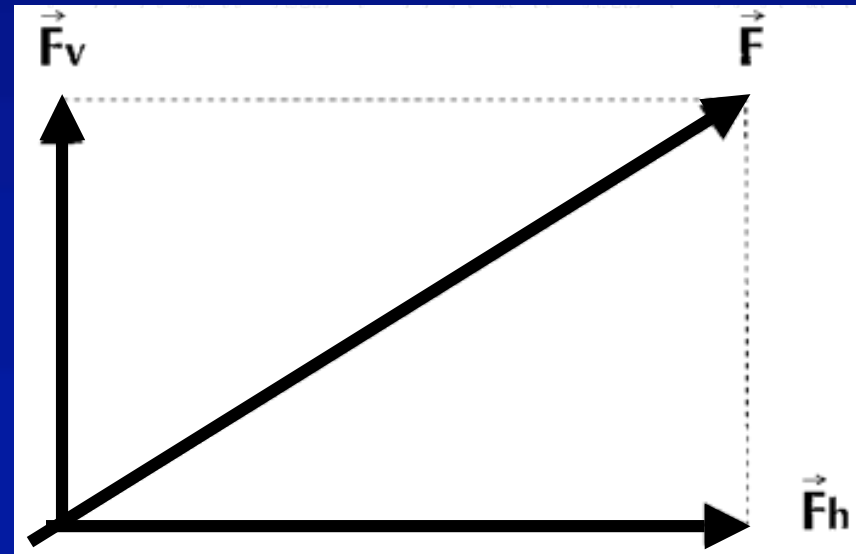
Combinaison de plusieurs forces

- La résultante de deux forces est la diagonale du parallélogramme qui a pour côtés les deux forces. Son point d'application est le plus souvent ramené au centre de gravité du corps.



Combinaison de plusieurs forces

- De la même façon, une force peut être décomposée en deux forces qui peuvent être verticale (compression) et horizontale (friction ou cisaillement)



Combinaison de plusieurs forces

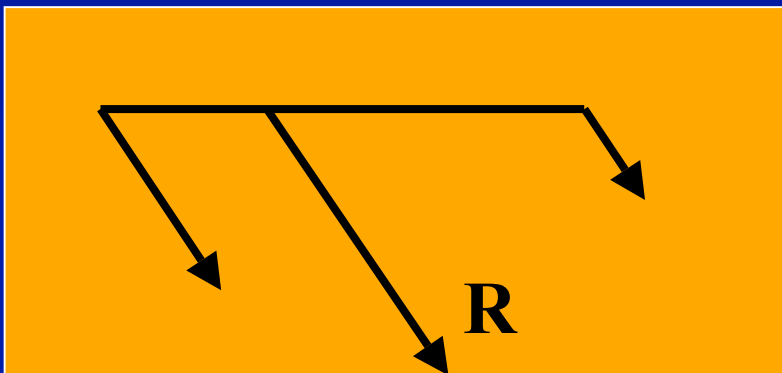
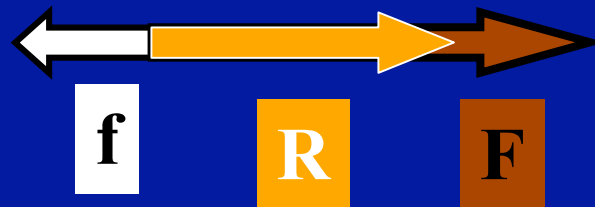
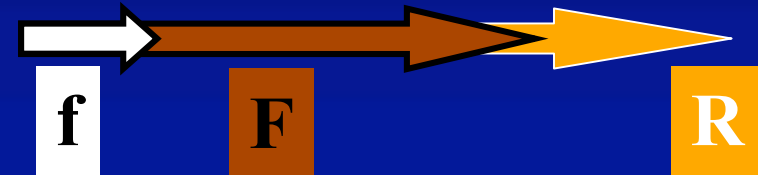
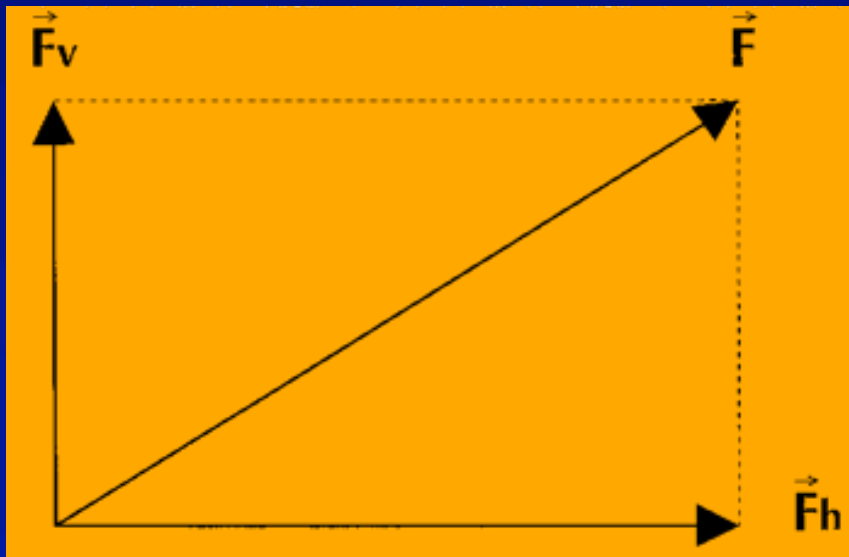
Forces concourantes

- Même point d'application
- Règle du parallélogramme
- De même direction
 - Résultante a la même direction
 - Intensité = somme ou différence des 2 selon sens
- De direction différente

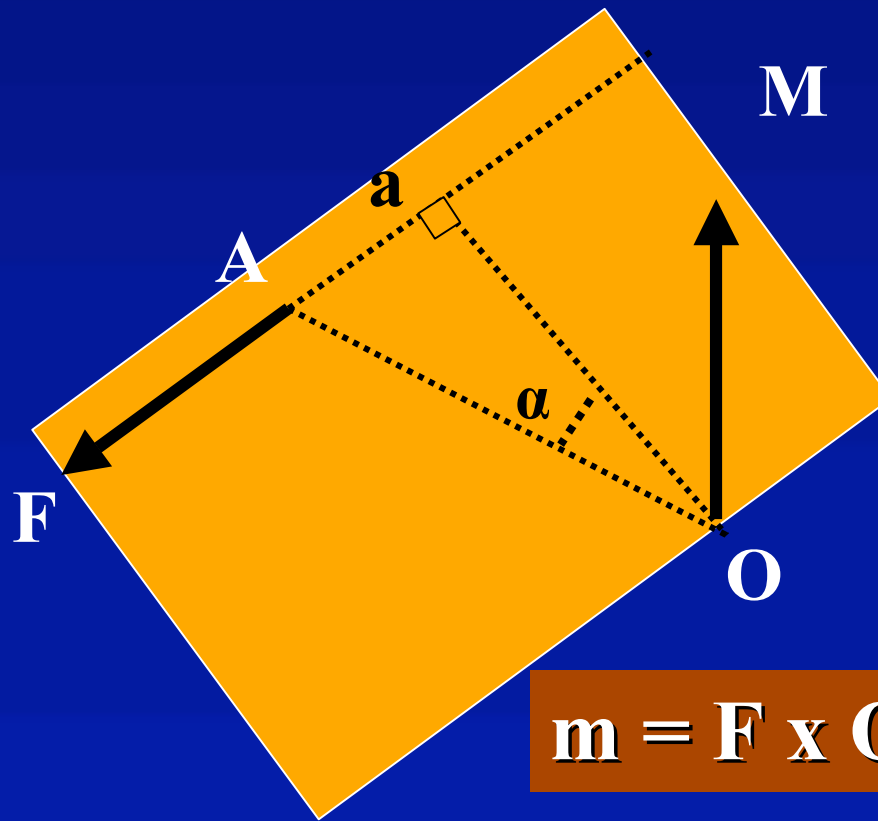
Forces non concourantes (ramenées aux F concourantes)

Forces parallèles

Combinaison de plusieurs forces



Moment d'une force

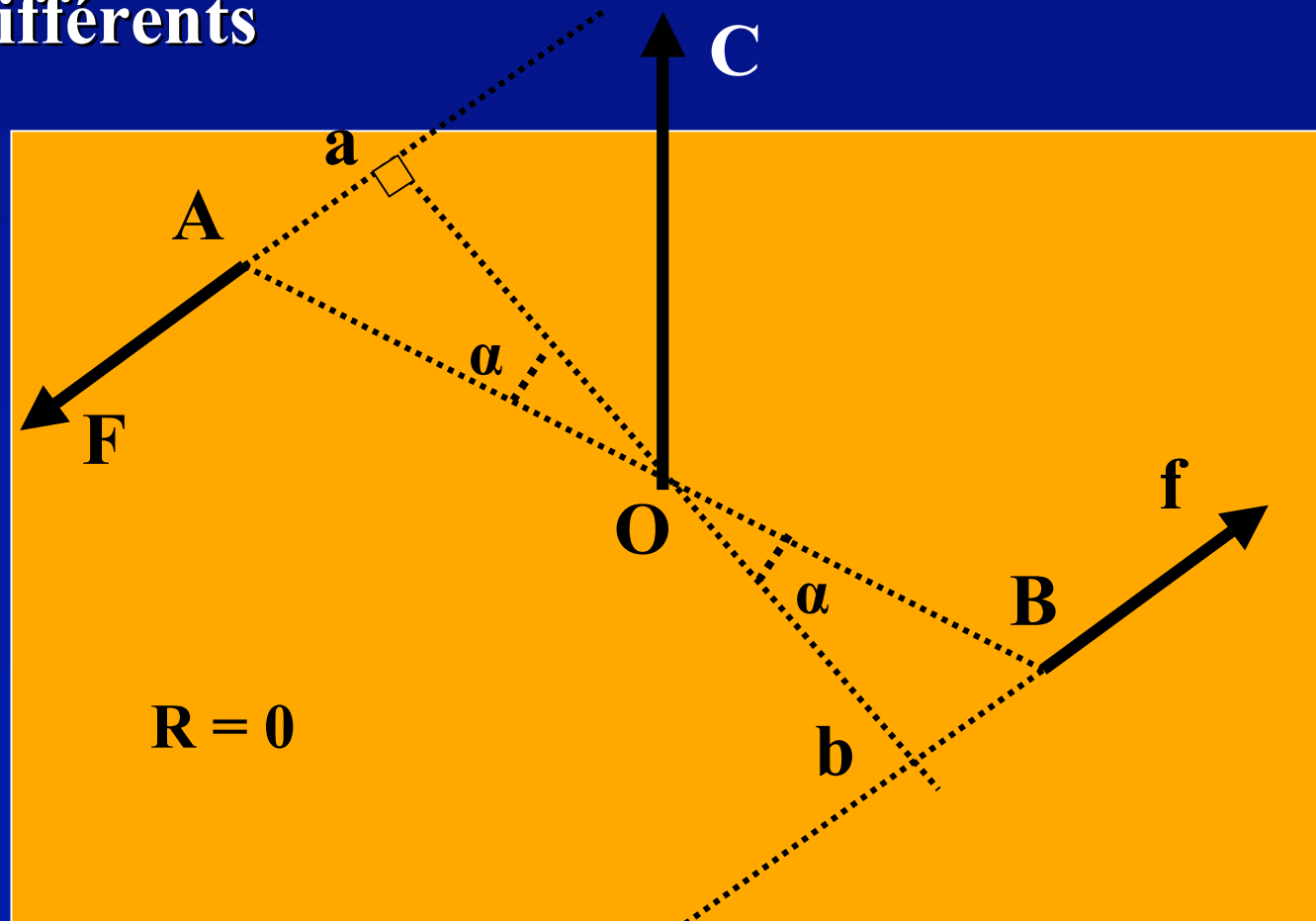


$$m = F \times Oa = F \times OA \times \cos\alpha$$

plus le bras de levier (OA) est grand plus le moment de la force F en O est grand

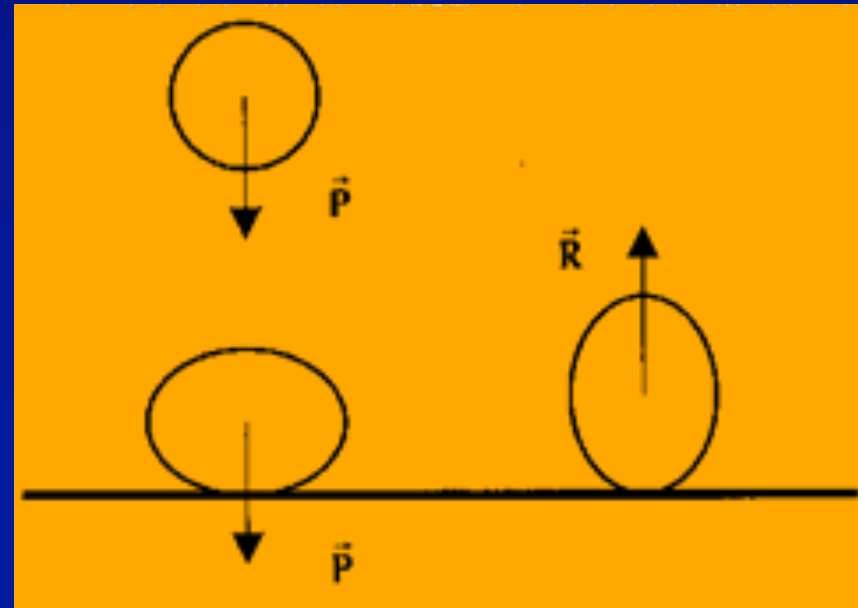
Notion de couple

- C'est un système de 2 forces parallèles (même plan), égales entre elles et de sens contraire appliquées en 2 points différents



Loi d'action - réaction

- Pour chaque force agissant sur un corps, il existe une seconde force égale en intensité, de même direction mais de sens opposé qui agit sur ce corps.
- A chaque action P , il existe une réaction R (Archimed) .



Quantité d'énergie

- **Tout corps en mouvement emmagasine de l'énergie qui est la somme de:**
 - **L' énergie potentielle**
 - **L' énergie cinétique**
 - **L' énergie élastique**

Energie potentielle

- C'est l'énergie que possède un corps en vertu de sa position par rapport au sol ou par rapport à un point d'appui.

Energie cinétique

- C'est l'énergie que possède un corps en mouvement.
 - Mouvement linéaire:
 - $E_c = 1/2 mv^2$ $m = \text{masse}$ $v = \text{vitesse}$
- Le facteur vitesse est très important puisqu'il est le seul variable.

Energie élastique ou de transformation

- C'est l'énergie emmagasinée par un corps préalablement déformé qui a tendance à revenir à sa forme initiale.
- NB: On parle également d'énergie élastique au niveau du système musculaire. Un muscle mis en tension (étiré) emmagasine de l'énergie permettant un retour contractile plus important. La composante élastique du muscle et le réflexe à l'étirement sont mis en jeu (réflexe myotatique).

Transfert d'énergie

- L'énergie emmagasinée dans une partie du corps peut être transmise à une autre partie ou au corps tout entier si celui-ci est tonique et l'articulation verrouillée.

Cinématique

- C'est l'analyse d'un mouvement
- Fondamental pour connaître le déplacement articulaire
 - Étude d'un mouvement plan
 - Détermination des centres de rotation

Analyse du mouvement plan

- Chaque solide (ou surface articulaire) $S1$ et $S2$ est considéré comme un plan
- $S1$ et $S2$ se déplacent en restant au contact
- On parle de:
 - roulement et glissement (langage courant)
 - translation et rotation (géométrie)
 - uniquement rotation en cinématique avec des notions de
 - Centre instantané de rotation
 - Vitesse instantanée

Analyse du mouvement plan

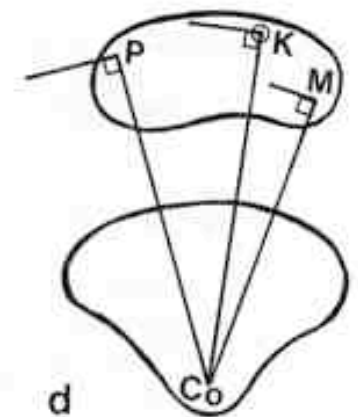
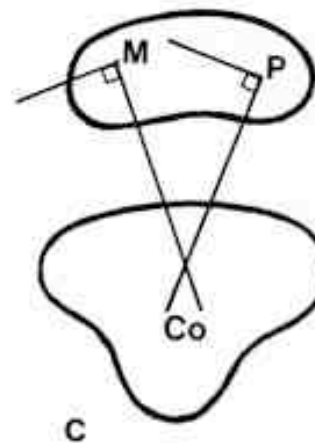
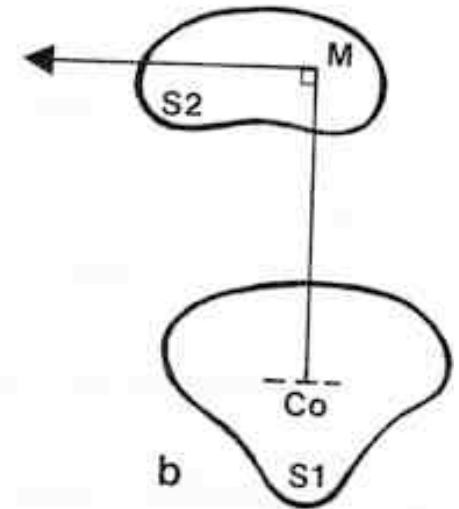
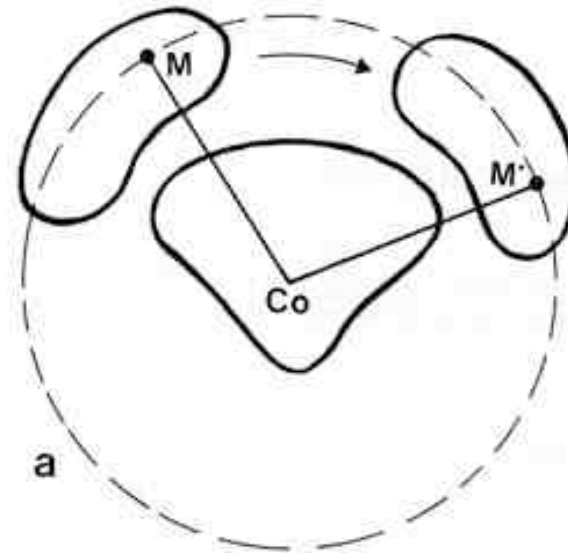
Vitesse de M définie par:

- direction:
perpendiculaire à CM

- Grandeur : vitesse
angulaire (ω) x CM

- sens

CIR est le croisement des
perpendiculaires aux
directions des vitesses de 2
points de même grandeur

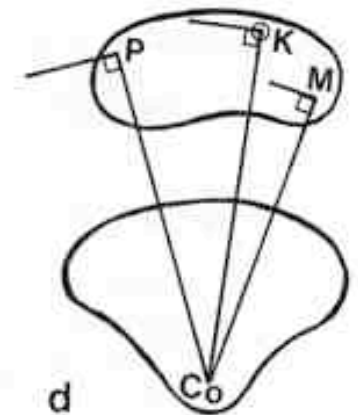
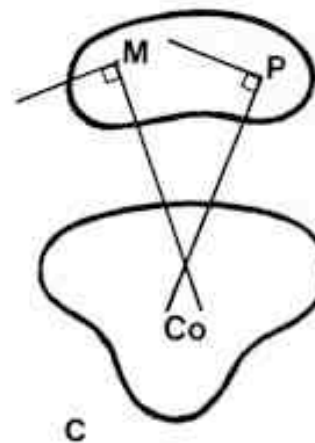
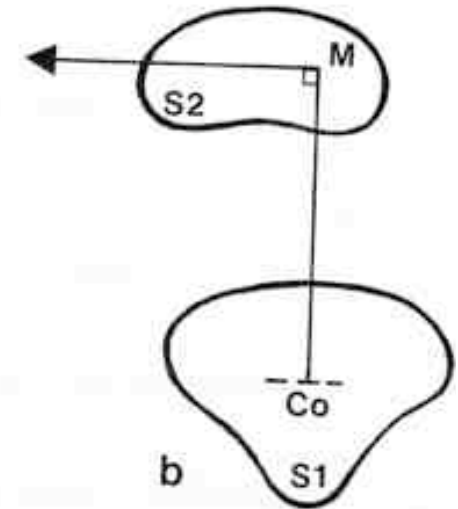
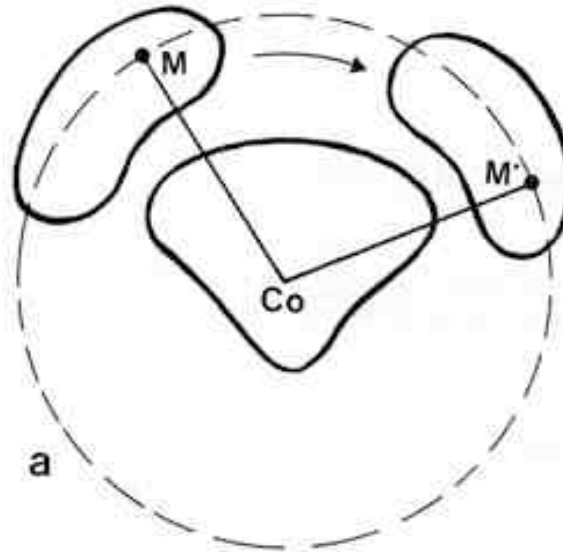


Analyse du mouvement plan

Par la connaissance du CIR, on peut définir la vitesse de tous les points du solide S2 à cet instant

Exemple: pour K

- direction \perp à CK
- sens est le même
- grandeur = $CK \times \omega$



Analyse du mouvement plan

Au cours d'un mouvement, la vitesse instantanée est remplacée par la vitesse moyenne, le centre a lui aussi une position moyenne, intersection des médiatrices

En réalité il y a souvent plusieurs centres instantanés de rotation dans une articulation

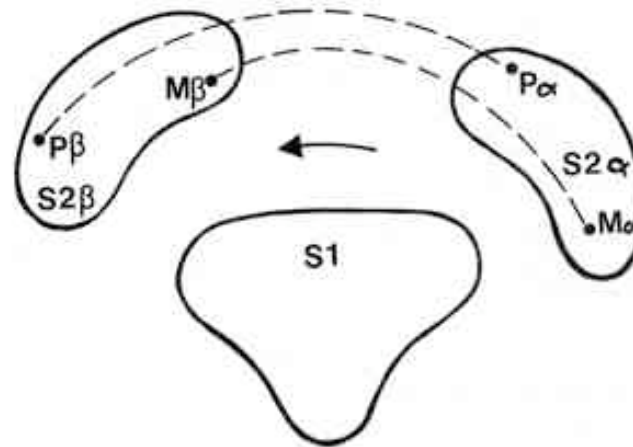


Figure 33 - Mouvement du solide mobile.

