



CENTRALE LYON
ENISE

Introduction à la biomécanique

19 janvier 2026



SOMMAIRE

1.

Définitions & applications

2.

Mécanique vs biomécanique

3.

Exemples d'applications

4.

Rappels de MMC

5.

Physiologie musculo-squelettique



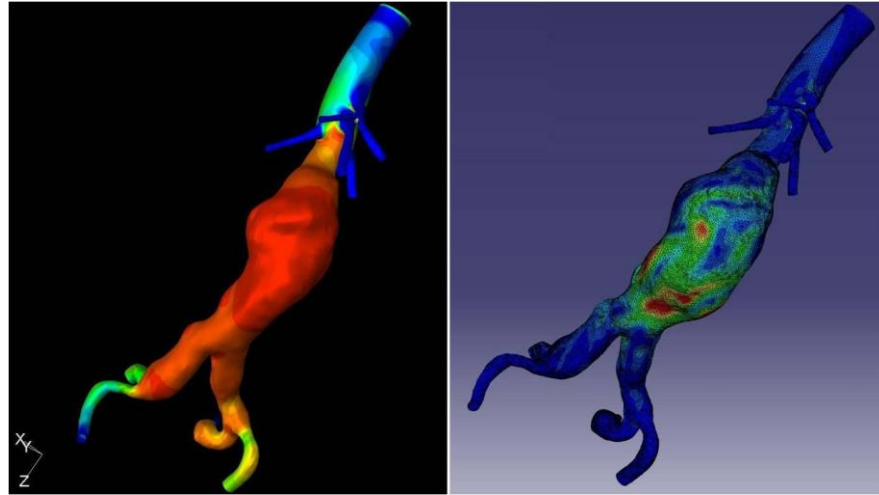
Définitions et applications

Biomécanique :

- discipline scientifique à l'interface entre la **mécanique**, la **biologie** et la **médecine**
- étudie les **structures biologiques** (os, muscles, articulations, organes) et leurs **fonctions mécaniques**, en utilisant des outils issus de la physique, des mathématiques et de l'ingénierie.
- objectif : comprendre comment les forces agissent sur le corps humain ou animal, et comment ces forces influencent le mouvement, la croissance, la pathologie ou la conception de dispositifs médicaux.

Biomécanique

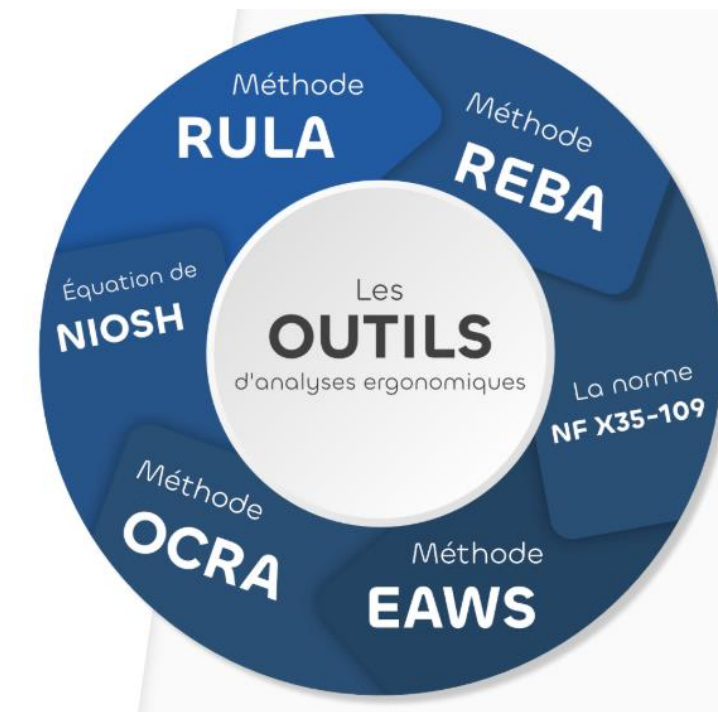
Domaines d'applications



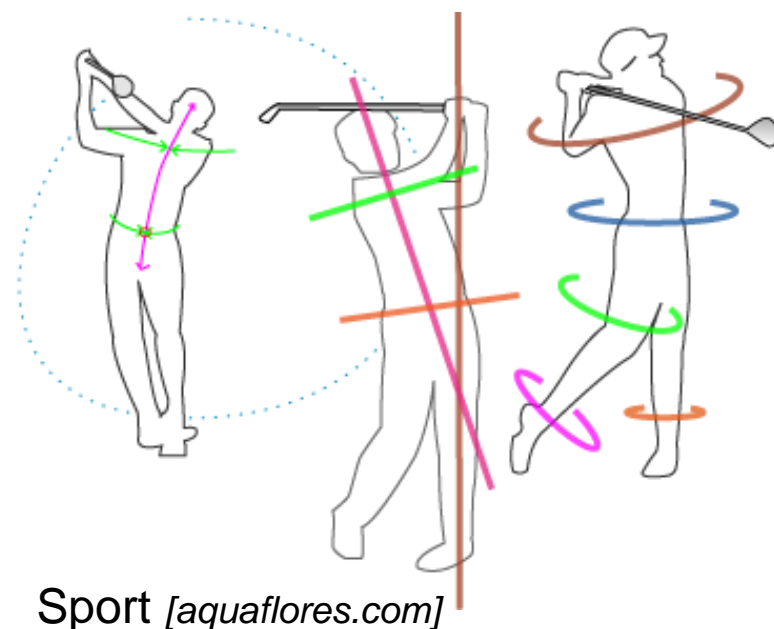
Cardiovasculaire [vascularbiomechanics.org]



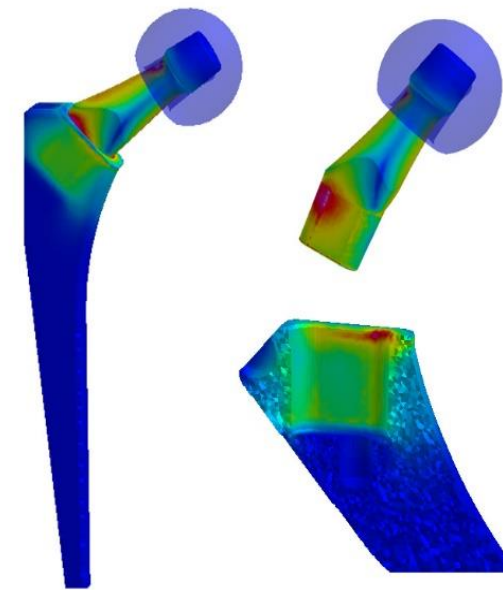
Sécurité [aroundworldstuff.blogspot.fr]



Ergonomie [nawo-solution.com]



Sport [aquaflares.com]



Orthopédique [esi-group.com]



Plantes [D. Pioletti]

Biologie – Bioprocédés – Imagerie – Biorobotique – Informatique – Médecine

Biomécanique de l'humain

Domaines d'applications



- **Biomécanique musculo-squelettique** : Étude des mouvements, des forces articulaires et des prothèses
- **Biomécanique des fluides** : Analyse des écoulements sanguins, respiratoires ou lymphatiques
- **Biomécanique cellulaire et tissulaire** : Comportement mécanique des cellules et des tissus mous (ex. : peau, vaisseaux sanguins)
- **Biomécanique des traumatismes** : Étude des chocs et des blessures (ex. : accidents, sports)

Léonard de Vinci (1452–1519) : Le Père de l'Anatomie Mécanique

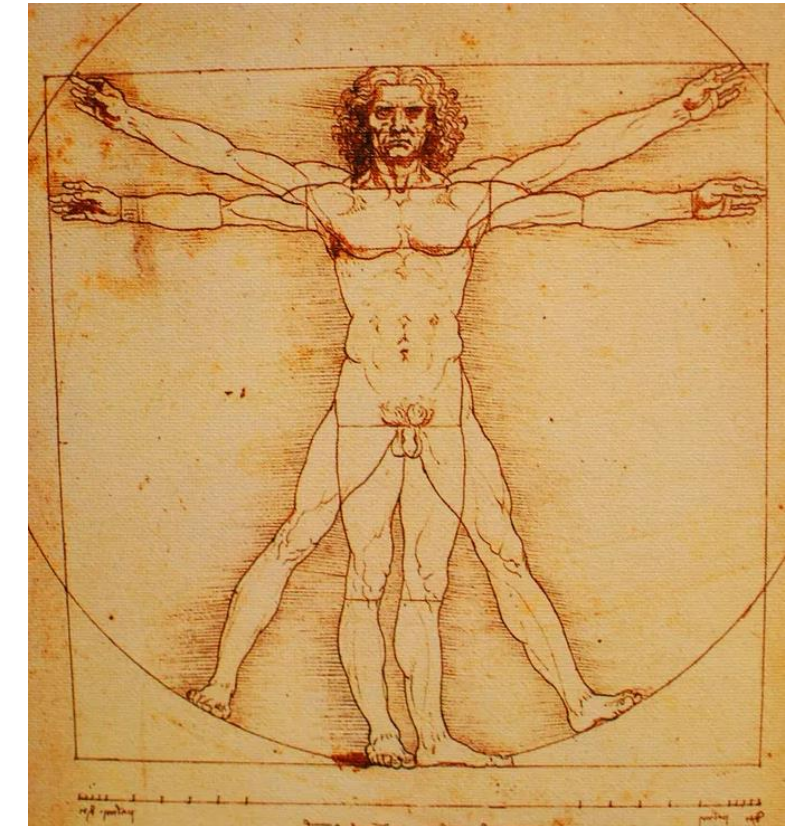
- **Contributions**
 - Premier à dessiner des **schémas anatomiques détaillés** (muscles, squelette) avec une approche mécanique
 - Étude des **mouvements humains** et des **forces musculaires** (ex. : bras comme système de leviers)
 - Croquis de **machines inspirées du corps humain** (ex. : robot chevalier, ailes battantes)
- **Exemple marquant**
 - Son dessin du "**Homme de Vitruve**" illustre les proportions idéales du corps humain, un concept clé pour la biomécanique moderne

Giovanni Alfonso Borelli (1608–1679) : Le Fondateur de la Biomécanique Mathématique

- **Contributions**
 - Auteur de "*De Motu Animalium*" (1680), premier traité sur la **mécanique du mouvement animal**
 - Application des **lois de la statique et de la dynamique** aux muscles et aux articulations
 - Modélisation du **système musculo-squelettique comme un ensemble de leviers**
- **Exemple marquant**
 - Calcul des **forces musculaires** nécessaires pour maintenir une posture ou soulever un poids

Thomas Young (1773–1829) et la Mécanique des Tissus

- **Contributions**
 - Introduction du **module d'Young** (mesure de la rigidité des matériaux), appliqué aux tissus biologiques
 - Étude de l'**élasticité des artères** et des **propriétés mécaniques des fibres musculaires**



Homme de Vitruve [Leonardo Da Vinci]

Biomécanique

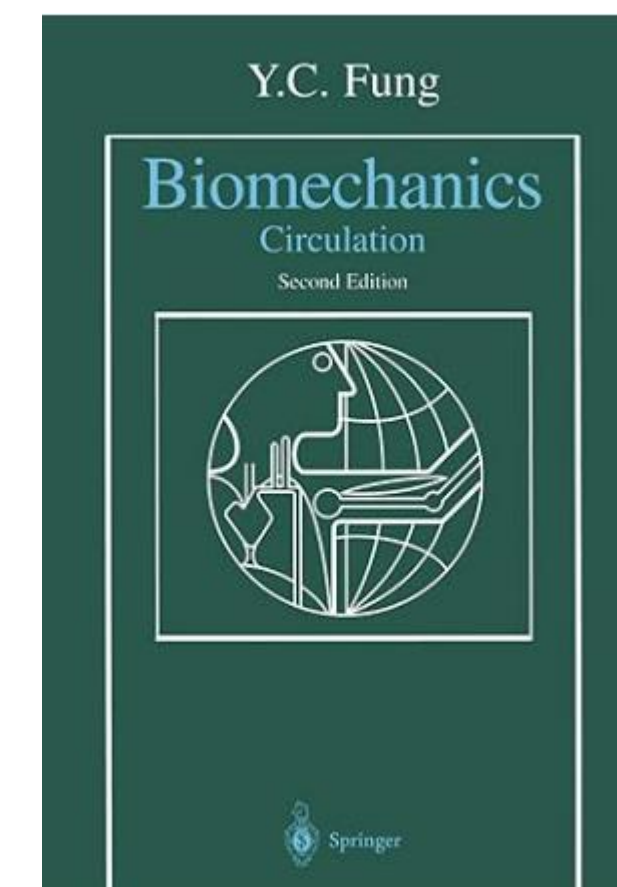
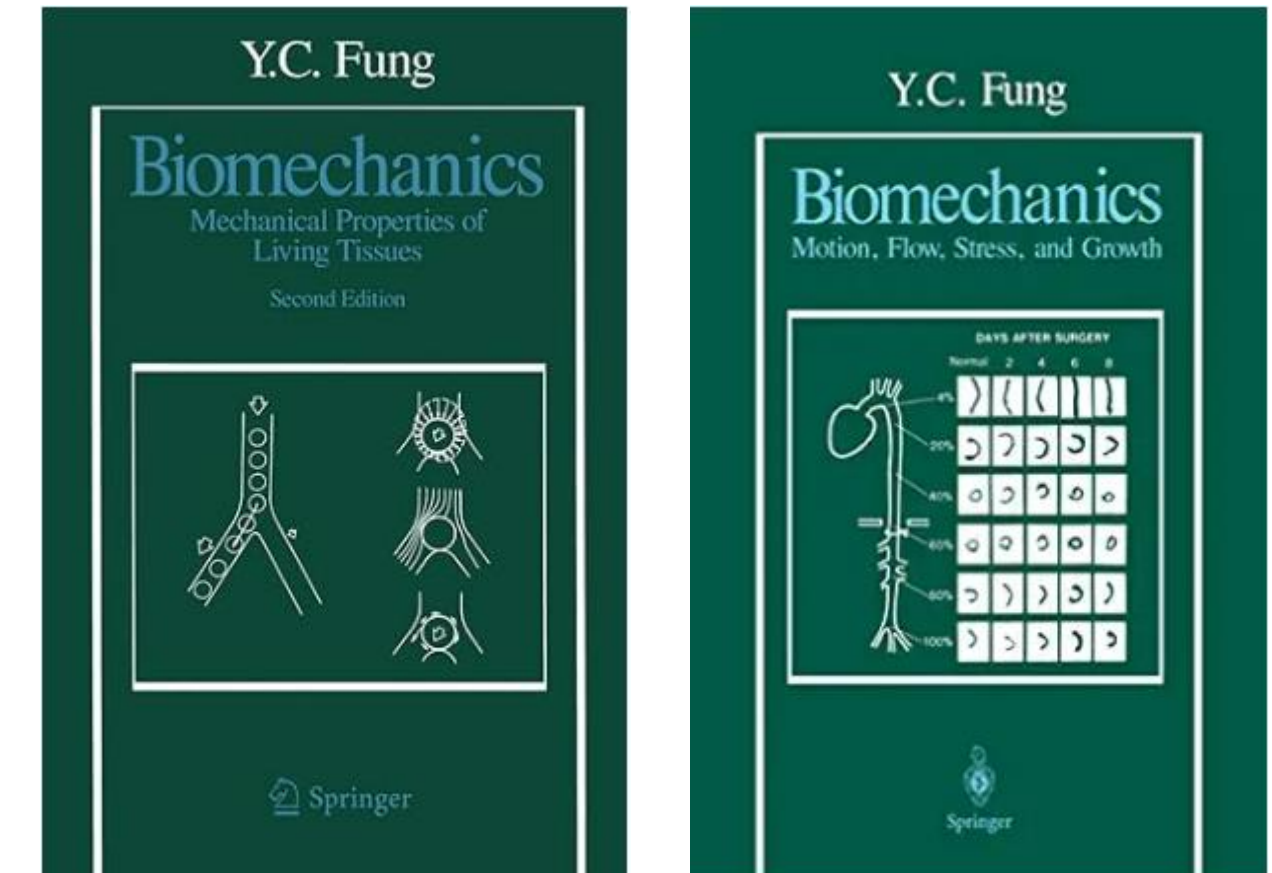
Historique

Wilhelm et Richard Weber (XIXe siècle) : La Biomécanique Expérimentale

- **Contributions**
 - Mesures précises des **forces et des déformations** dans les muscles et les tendons
 - Développement des premiers **capteurs de force** pour l'analyse du mouvement

Y.C. Fung (1919–2019) : Le Père de la Biomécanique Moderne

- **Contributions**
 - Fondateur de la **biomécanique des tissus mous** (ex. : vaisseaux sanguins, poumons)
 - Auteur de "*Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues*" (1981), ouvrage de référence
 - Introduction des **modèles viscoélastiques** pour décrire le comportement des tissus biologiques
 - Applications en **ingénierie médicale** (prothèses, valves cardiaques)
- **Exemple marquant** :
 - Modélisation de la **réponse mécanique des artères** sous pression sanguine, utilisée pour concevoir des stents



Prothèses, Orthèses et Implants

- **Historique**

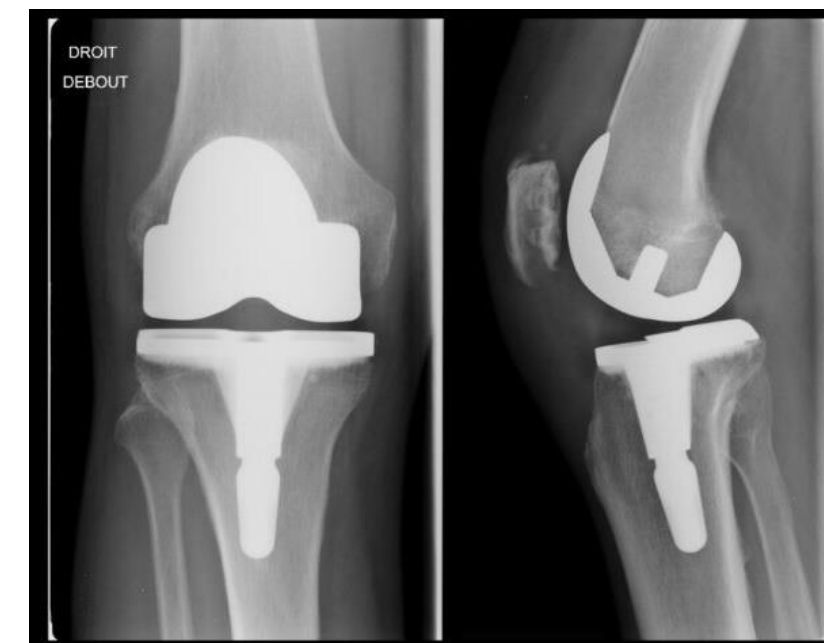
- **Premières prothèses** : En Égypte ancienne (orteils en bois, ~1000 av. J.-C.)
- **Prothèses modernes**
 - **Sir Harold Gillies** (XXe siècle) : Pionnier de la chirurgie reconstructrice (Première Guerre mondiale)
 - **Prothèses myoélectriques** (années 1960) : Contrôlées par les signaux musculaires (ex. : main robotisée)
 - **Prothèses intelligentes** (XXIe siècle) : Avec capteurs et IA (ex. : genou adaptatif)

- **Enjeux actuels**

- **Biocompatibilité** : Matériaux (titane, céramique) et rejet immunitaire
- **Personnalisation** : Impression 3D de prothèses sur mesure (ex. : [Open Bionics](#), OSMI)



<https://www.eurodentaire.com/>



<https://www.dr-hossenbaccus.fr/>

Analyse du Mouvement

- **Historique**

- **Eadweard Muybridge** (1878) : Première **décomposition du mouvement** (chevaux, humains) avec la photographie.
- **Etienne-Jules Marey** (1882) : Invention du **chronophotographe** pour étudier la locomotion.
- **Systèmes modernes** :
 - **Motion Capture (Mocap)** : Utilisation de marqueurs et caméras 3D (ex. : Vicon, OptiTrack).
 - **Capteurs portables** : Accéléromètres, gyroscopes (ex. : analyse des athlètes).

- **Applications**

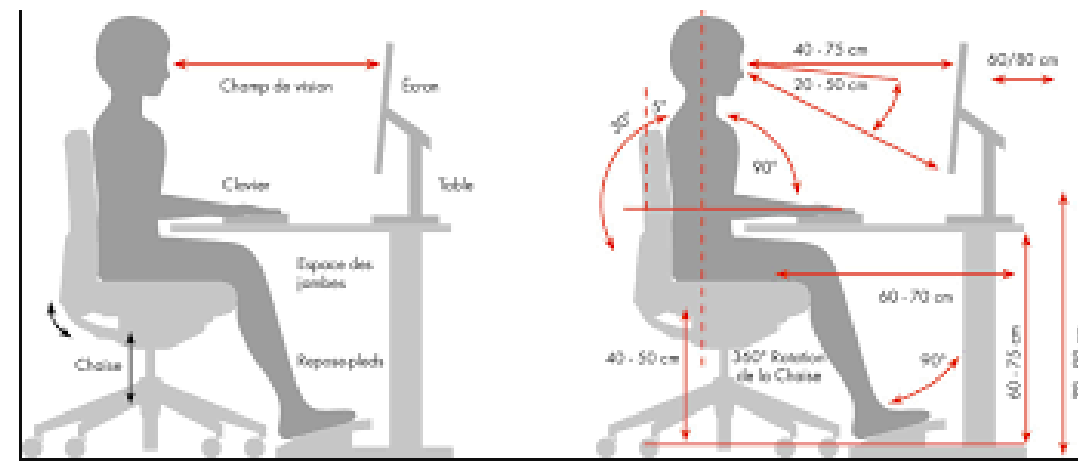
- **Sport** : Optimisation des performances (ex. : nage, saut).
- **Rééducation** : Analyse de la marche post-AVC.
- **Ergonomie** : Conception de postes de travail.



[<https://lagarrigue.com/>]

Ergonomie et Biomécanique Occupationnelle

- **Historique :**
 - **Frederick Winslow Taylor** (1911) : Étude des **mouvements au travail** pour améliorer l'efficacité.
 - **Bernardino Ramazzini** (1700) : Premier à décrire les **troubles musculo-squelettiques** liés au travail.
- **Enjeux modernes :**
 - **Prévention des TMS** (Troubles Musculo-Squelettiques) : Conception de sièges, outils, postes informatiques.
 - **Exosquelettes** : Assistance mécanique pour les travailleurs (ex. : [HAL de Cyberdyne](https://www.cyberdyne.com/)).
- **Exemple :**
 - Étude biomécanique des **gestes répétitifs** dans l'industrie automobile (ex. : assemblage de pièces).



[<https://www.rb3d.com/>]

2.

Mécanique « classique » vs biomécanique

Mécanique « classique » vs biomécanique



Différences notables

- Matériaux
- Échelles
- Contraintes

Rappels de mécanique : Lois de Newton, contraintes/déformations, élasticité linéaire.

En plus, pour la biomécanique, nécessité de **notions de physiologie** : anatomie musculo-squelettique, types de tissus (os, cartilage, muscle).

Comparatif Mécanique vs biomécanique



Tableau

Critère	Mécanique « classique »	Biomécanique
Matériaux	Métaux, polymères, céramiques, composites	Tissus vivants : os, cartilage, muscle, tendon, peau
Propriétés mécaniques	Homogènes, isotropes, linéaires (loi de Hooke)	Hétérogènes, anisotropes, non-linéaires, viscoélastiques
Echelles	Macro (pièces mécaniques, structures)	Multi-échelles : moléculaire → cellulaire → tissulaire → organe → corps entier
Contraintes	Prédictibles, statiques/dynamiques contrôlées	Variables, cycliques, dépendantes du temps et de l'environnement (ex. : hydratation, température)
Chargement	Forces externes bien définies	Forces internes (musculaires) + externes (impacts, pression)
Durée de vie	Conçue pour durer (fatigue calculée)	Auto-réparation, remodelage, vieillissement
Modélisation	Équations analytiques, MEF (éléments finis)	Modèles multi-physiques (mécanique + biologie + chimie)
Objectifs	Résistance, durabilité, performance	Fonctionnalité, biocompatibilité, adaptation
Exemples d'applications	Ponts, voitures, avions	Prothèses, analyse du mouvement, ergonomie

Mécanique vs biomécanique

1 - Matériaux

Mécanique Classique

- **Types** : Acier, aluminium, béton, composites (fibre de carbone).
- **Propriétés** :
 - **Homogènes** : Composition uniforme.
 - **Isotropes** : Propriétés identiques dans toutes les directions (sauf composites).
 - **Linéaires** : Suivent la loi de Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$) dans le domaine élastique.
 - **Prédictibles** : Module d'Young, limite élastique, résistance à la rupture bien caractérisés.
- **Exemple** : Une poutre en acier a un module d'Young de **200 GPa** et une limite élastique claire.

Biomécanique

- **Types** : Os (composite collagène/hydroxyapatite), cartilage (gel poroélastique), muscle (fibres contractiles), tendon (fibres de collagène alignées).
- **Propriétés** :
 - **Hétérogènes** : Composition variable (ex. : os cortical vs. os spongieux).
 - **Anisotropes** : Propriétés dépendent de la direction (ex. : résistance de l'os le long des travées).
 - **Non-linéaires** :
 - Comportement viscoélastique (dépend du temps, ex. : cartilage).
 - Poroélasticité (ex. : disque intervertébral, influencé par la pression du fluide).
 - Plasticité et remodelage (ex. : os qui se renforce sous charge).
 - **Adaptatifs** : Réponse à des stimuli mécaniques (ex. : hypertrophie musculaire).
- **Exemple** : Le **cartilage articulaire** a un module d'Young de **1–20 MPa**, mais sa réponse dépend de la vitesse de chargement et de l'hydratation.

Mécanique vs biomécanique

2 – Echelle d'analyse

Mécanique Classique

- **Échelle unique** : Macro (de la pièce mécanique à la structure complète)
- **Exemple** : Analyse d'une aile d'avion en composite (échelle centimétrique à métrique)

Biomécanique

- **Multi-échelles**
 - **Moléculaire** : Protéines (collagène, élastine)
 - **Cellulaire** : Mécanotransduction (comment les cellules sentent et répondent aux forces)
 - **Tissulaire** : Interaction entre fibres de collagène dans un tendon
 - **Organe** : Fonctionnement du cœur ou du poumon
 - **Corps entier** : Marche, posture, mouvements sportifs
- **Exemple** : La **rupture d'un tendon** peut être analysée à l'échelle des fibres de collagène (micro) ou du tendon entier (macro)

Mécanique vs biomécanique

3 – Contraintes et chargements

Mécanique Classique

- **Contraintes** :
 - Statiques (poids propre) ou dynamiques (vibrations, chocs).
 - Bien définies et reproductibles (ex. : charge sur un pont).
- **Limites** : Calculées pour éviter la rupture ou la déformation permanente.

Biomécanique

- **Contraintes** :
 - **Cycliques** : Marche, battement cardiaque (100 000 cycles/jour pour le cœur).
 - **Dépendantes du temps** :
 - Viscoélasticité (ex. : relaxation du muscle après étirement).
 - Fatigue biologique (ex. : fractures de stress chez les athlètes).
 - **Environnementales** :
 - Influence de la température, du pH, de l'hydratation (ex. : cartilage moins résistant en cas de déshydratation).
- **Chargements complexes** :
 - **Forces internes** : Contraction musculaire (ex. : biceps tirant sur le radius).
 - **Forces externes** : Impact, pression (ex. : pied au sol lors de la course).
 - **Interactions fluide-structure** : Sang dans les artères, air dans les poumons.
- **Exemple** : Le **genou** subit des forces de **3–5 fois le poids corporel** lors de la course, avec des contraintes de cisaillement et de compression variables.

Mécanique vs biomécanique

4 – Méthodes d'analyse

Mécanique Classique

- **Outils :**
 - Équations analytiques (poutres, plaques).
 - Méthode des éléments finis (MEF) pour des géométries complexes.
 - Essais normalisés (traction, fatigue).
- **Logiciels :** ANSYS, SolidWorks, ABAQUS.

Biomécanique

- **Outils spécifiques :**
 - **Imagerie médicale :** IRM, scanner pour géométrie 3D
 - **Motion Capture :** Analyse du mouvement (ex. : marche, geste sportif)
 - **Modèles multi-physiques :**
 - Couplage mécanique/biologique (ex. : croissance osseuse sous charge).
 - Interaction fluide-structure (ex. : écoulement sanguin dans une artère).
 - **Essais *in vivo/in vitro* :**
 - Tests sur tissus vivants (ex. : machine de traction pour tendons).
 - Simulations numériques avec logiciels « classiques » (Ansys, Abaqus, LSDyna) et dédiés (OpenSim, AnyBody)
- **Défis :**
 - Variabilité inter-individuelle (ex. : géométrie osseuse unique à chaque personne)
 - Adaptation des modèles aux changements (ex. : cicatrisation, vieillissement)

Mécanique vs biomécanique

5 – Exemples et valeurs

Critère	Mécanique « classique »	Biomécanique
Matériau typique	Acier ($E = 200 \text{ GPa}$).	Os cortical ($E = 10\text{--}20 \text{ GPa}$, mais anisotrope)
Échelle d'étude	Poutre en flexion (échelle centimétrique)	Cellule musculaire → muscle → membre inférieur
Contrainte typique	Charge statique de 10 kN sur une poutre	Force de $3\,000 \text{ N}$ sur le genou lors d'un saut
Modélisation	MEF pour une aile d'avion	Modèle musculo-squelettique + EMG pour la marche
Durée de vie	50 ans pour un pont	Remodelage osseux constant (ex. : 10 \% /an)

Mécanique vs biomécanique

6 – En ingénierie et recherche

Mécanique Classique

- Objectif : **Maximiser la résistance et la durabilité**
- Exemple : Concevoir une aile d'avion pour résister à des charges aérodynamiques

Biomécanique

- Objectif : **Restaurer ou optimiser la fonction biologique**
- Exemples :
 - **Prothèse de hanche** : Must supporter des charges cycliques **sans rejet biologique**
 - **Rééducation** : Adapter les exercices pour **stimuler la repair tissulaire** sans causer de dommage
 - **Ergonomie** : Concevoir un siège pour **minimiser les contraintes sur la colonne vertébrale**

Mécanique vs biomécanique

7 – Défis de la biomécanique



- **Variabilité biologique** : Chaque individu a une anatomie et une réponse mécanique unique
- **Dynamique et adaptation** : Les tissus vivants se remodelent (ex. : os après une fracture)
- **Éthique** : Tests sur humains ou animaux, consentement, réglementations strictes

3.

Exemples d'applications

Biomécanique

Exemples d'applications

Médecine

Conception de **valves cardiaques** et **stents**.
Simulation de **chirurgies** (ex. : remplacement de hanche).

Sport

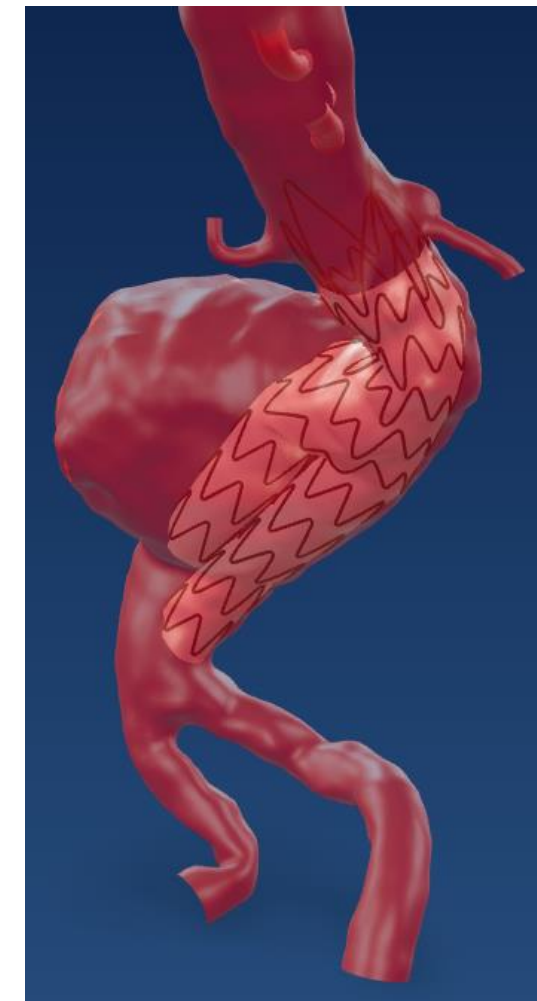
Optimisation des **équipements** (chaussures, raquettes).
Prévention des **blessures** (ex. : ACL chez les footballeurs).

Robotique

Développement de **robots chirurgicaux** (ex. : Da Vinci).
Exosquelettes pour la rééducation ou l'assistance (ex. : ReWalk).



[ccos64.fr]



[Predisurge.com]



ReWalk [neuro-concept.ca]



Da Vinci Xi [intuitive.com]



[wikihow.com]

4.

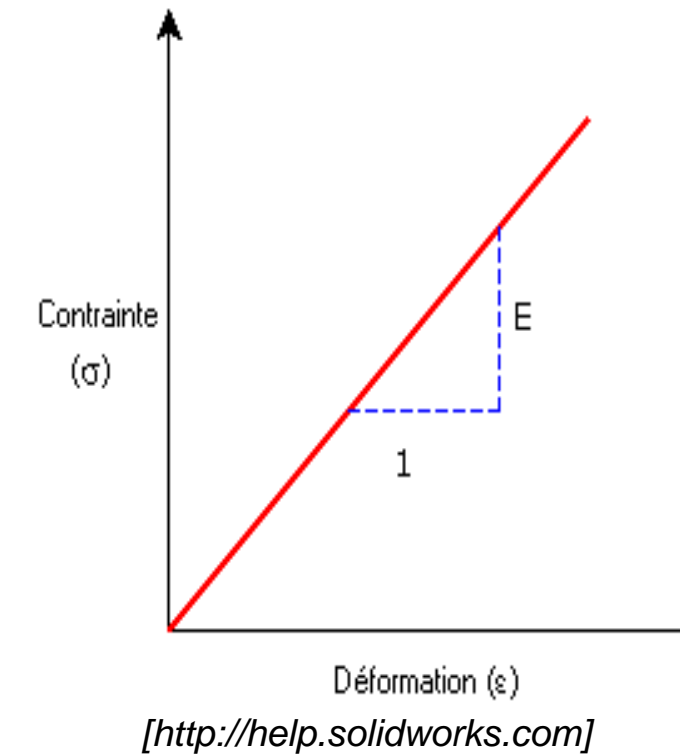
Rappels de Mécanique des Milieux Continus

(MMC)

Fondamentaux

Contrainte (σ) vs Déformation (ε)

- **Contrainte** : force par unité de surface $\rightarrow \sigma = \frac{F}{S}$, en Pa
- **Déformation** : variation relative de longueur $\rightarrow \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$, sans unité
- **Loi de Hooke** : $\sigma = E \cdot \varepsilon$ (E = module d'Young ou limite d'élasticité)
 - **Limite** : Valable uniquement pour les matériaux **linéaires et élastique** \rightarrow
 - Le matériau revient à sa forme initiale après suppression de la charge, **sans déformation permanente** (comportement réversible).
 - La linéarité n'est valable que dans un **domaine élastique** (avant la limite élastique). Au-delà, le matériau peut devenir non-linéaire (plasticité, rupture)
 - **Biomécanique** : Tissus bien souvent **non-linéaires** –ex : cartilage, muscle)



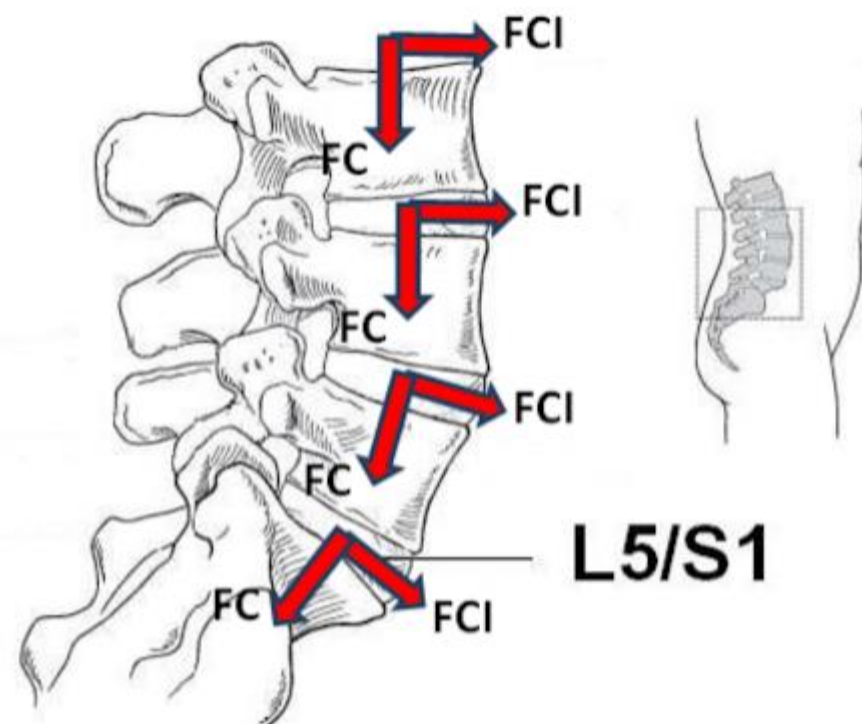
Fondamentaux

Types de Contraintes

Normale (traction/compression) vs. **Cisaillement** ($\tau = G \cdot \gamma$)

Exemple biomécanique :

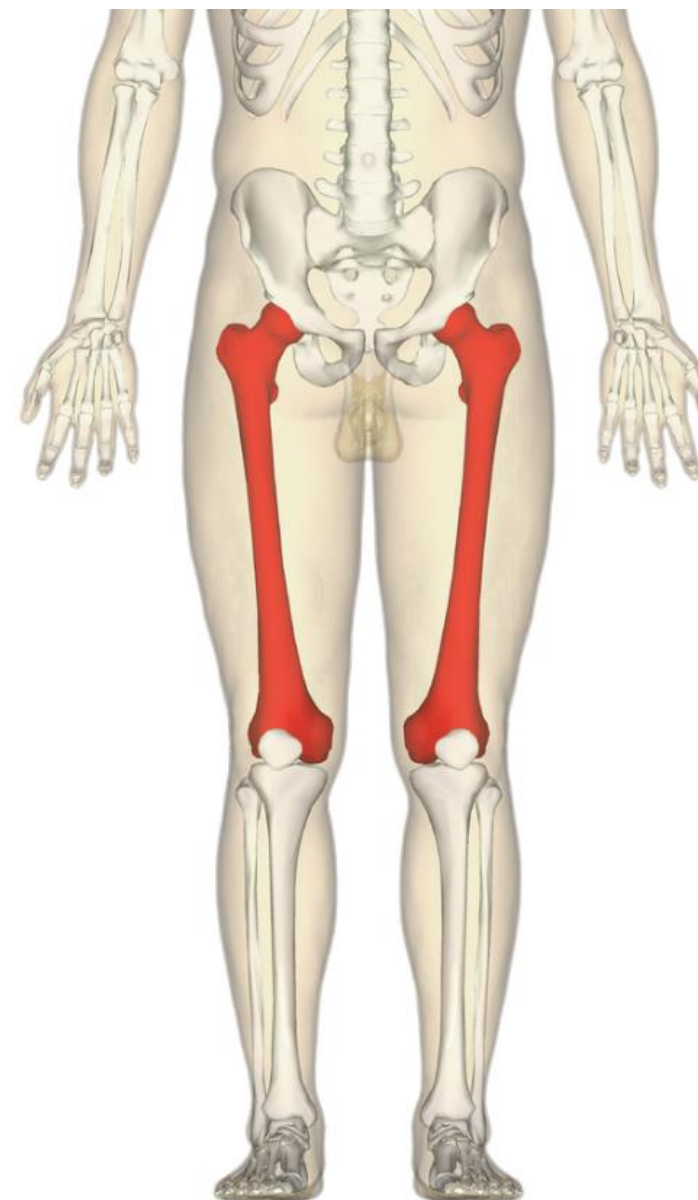
- Contrainte normale dans un **fémur** lors de la marche.
- Contrainte de cisaillement dans un **disque intervertébral**.



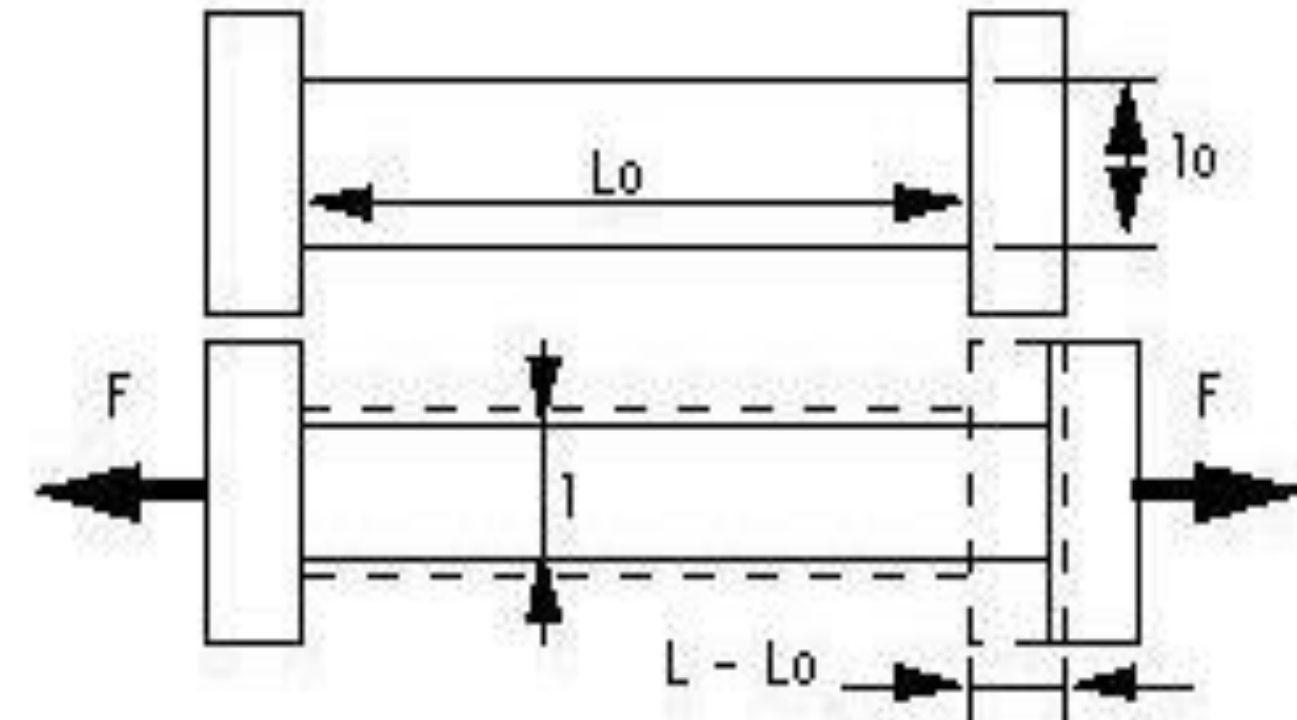
FC = Force de compression

FCI = Force de cisaillement antéro-postérieure

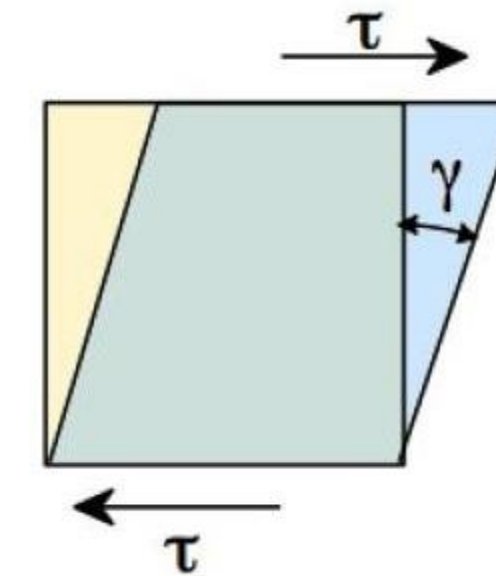
[<https://un-medecin-vous-informe.blogspot.com>]



[wikipedia.fr]



[<http://www.futura-sciences.us>]



Elasticité vs viscoélasticité

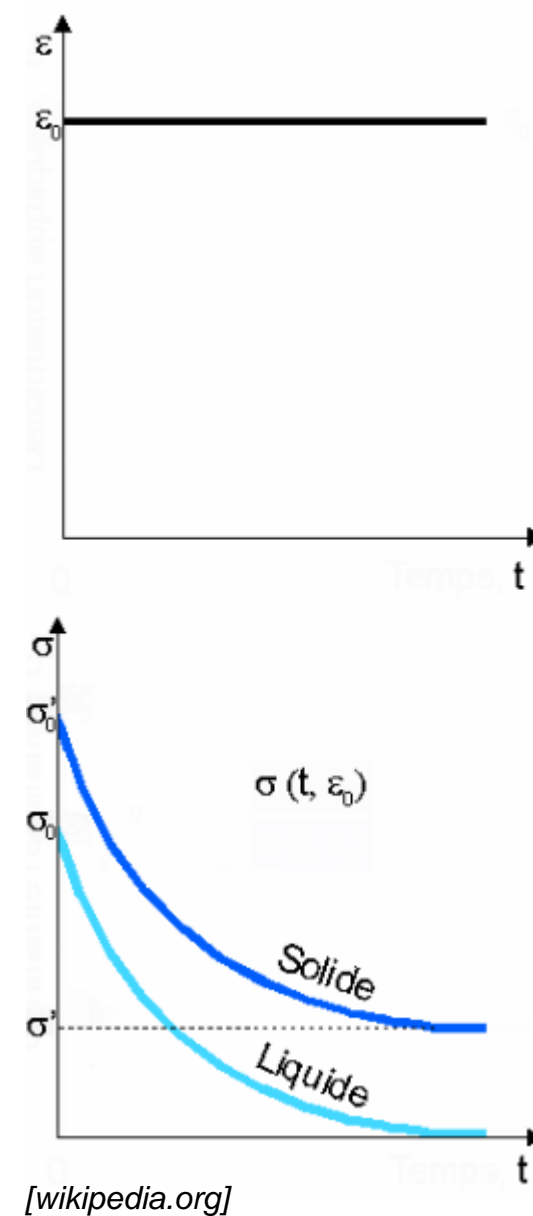
Élasticité : Déformation instantanée et réversible (ex. : ressort)

Viscoélasticité : Déformation dépendante du temps (ex. : cartilage, muscle, tendons, vaisseaux sanguin)

- Propriétés élastiques (ressort) + visqueuses (amortisseur)
- **Modèles** : Maxwell, Kelvin-Voigt (pour décrire la relaxation et le fluage)

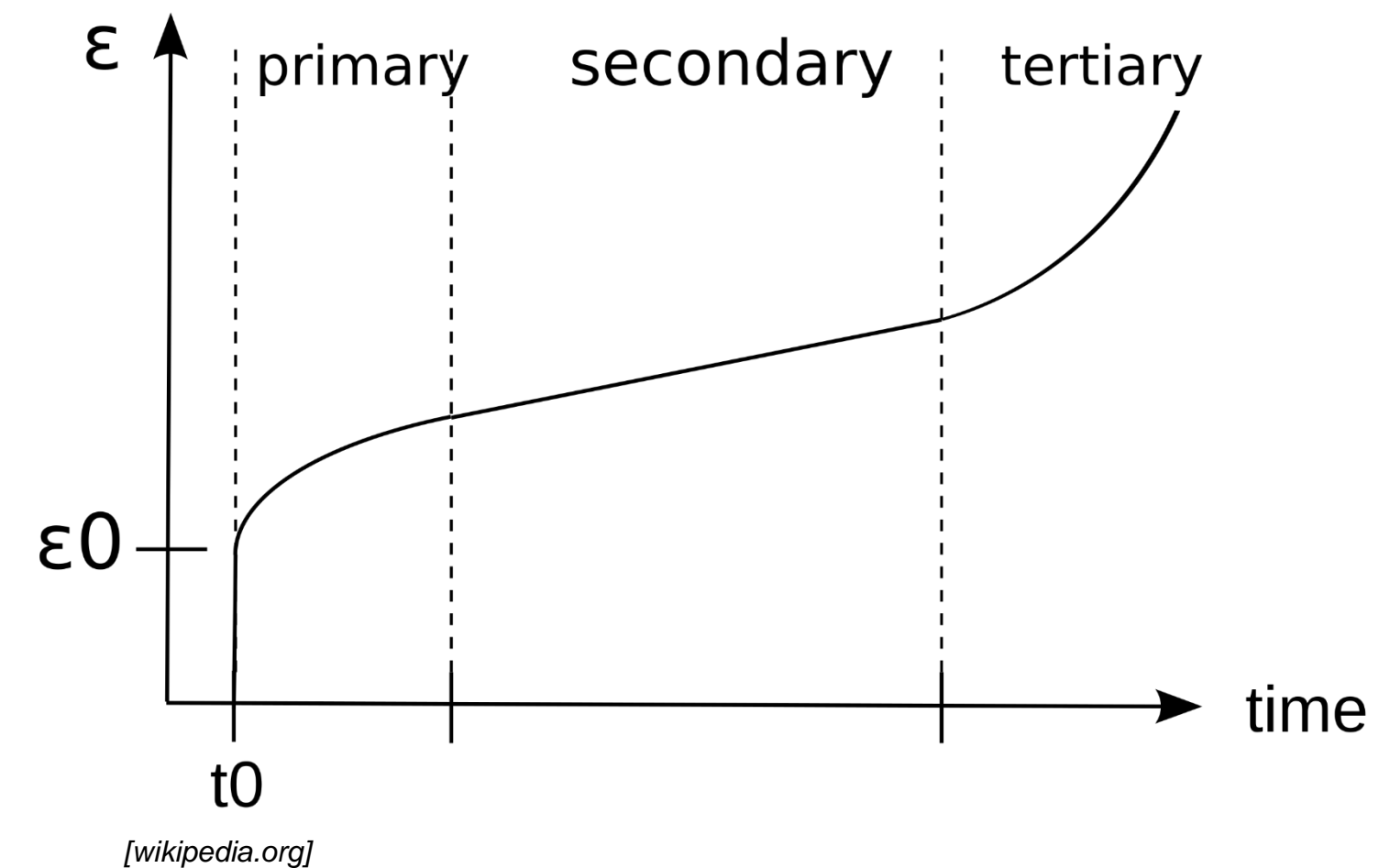
Relaxation de contrainte (stress relaxation) : Maintien de la déformation (constante), mesure de la contrainte (qui diminue avec le temps)

ex : tendon



Fluage (creep) : Maintien d'une contrainte (constante), mesure la déformation (qui augmente avec le temps)

ex : livres sur une étagère



Fondamentaux

Modèle de Maxwell



Description

- Un **ressort** (élément élastique, module E) en **série** avec
- Un **amortisseur** (élément visqueux, coefficient de viscosité η)

Equation constitutive

- **Déformation totale** ϵ : somme des déformations du ressort (ϵ_e) et de l'amortisseur (ϵ_v) : $\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_v$
- **Contrainte** (σ) : est la même dans les deux éléments (car ils sont en série) : $\sigma = E\epsilon_e - \eta\dot{\epsilon}_v$
où $\dot{\epsilon}_v$: **vitesse de déformation** de l'amortisseur
- **Équation différentielle** : En dérivant par rapport au temps, on obtient : $\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta}$

Cette équation décrit comment la déformation évolue avec le temps sous une contrainte donnée.

Fondamentaux

Modèle de Maxwell



Comportements caractéristiques

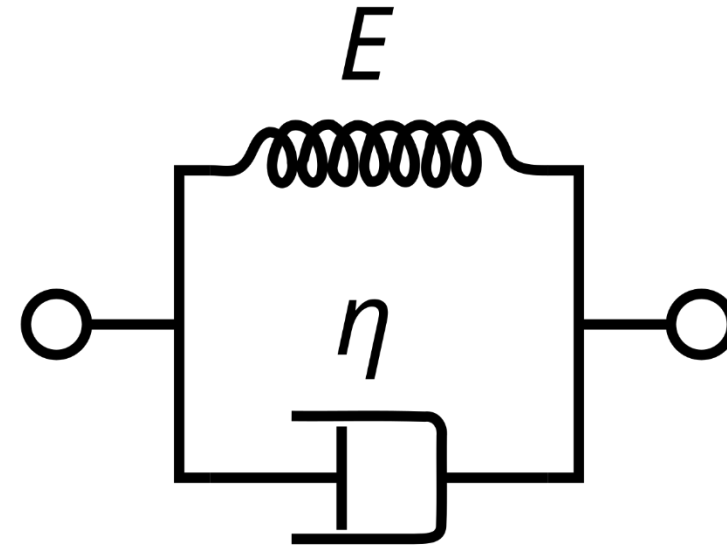
- **Relaxation de contrainte** : si on impose une déformation constante ($\varepsilon = \text{cste}$), la contrainte σ **décroît exponentiellement** avec le temps : $\sigma(t) = \sigma_0 e^{-t/\tau}$ où $\tau = \frac{\eta}{E}$ est le **temps de relaxation** (tps nécessaire pour que la contrainte diminue de 63 %)
- **Fluage** : Sous une contrainte constante ($\sigma = \text{cste}$), la déformation ε **augmente linéairement avec le temps** (à cause de l'amortisseur)

Application en biomécanique

- Modélisation de la **relaxation des muscles** ou des **tendons** après un étirement soudain.
- Limite : Le modèle de Maxwell **ne décrit pas bien le fluage réel** des matériaux biologiques (il sous-estime la déformation à long terme), car il prédit une déformation infinie sous charge constante (ce qui n'est pas réaliste pour les tissus biologiques).

Fondamentaux

Modèle de Kelvin-Voigt



Description

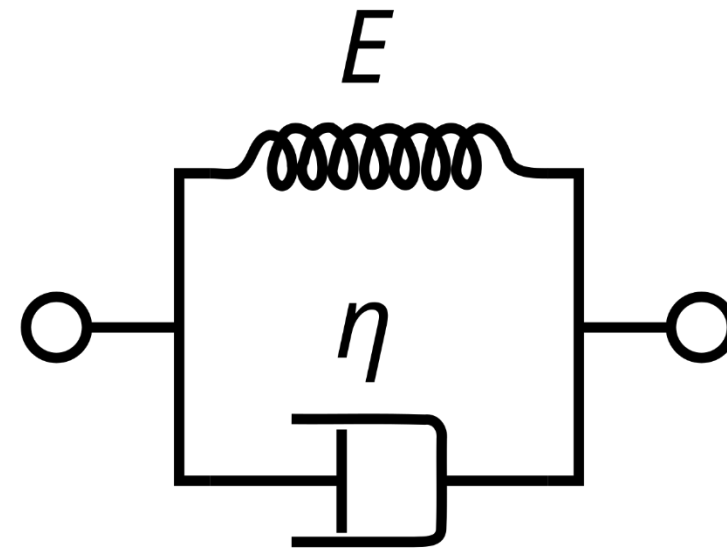
- Un **ressort** (élément élastique, module E) en **parallèle** avec
- Un **amortisseur** (élément visqueux, coefficient de viscosité η)

Equation constitutive

- **Contrainte totale** σ : somme des contraintes dans le ressort (σ_e) et l'amortisseur (σ_v) : $\sigma = \sigma_e + \sigma_v = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon}$

Fondamentaux

Modèle de Kelvin-Voigt



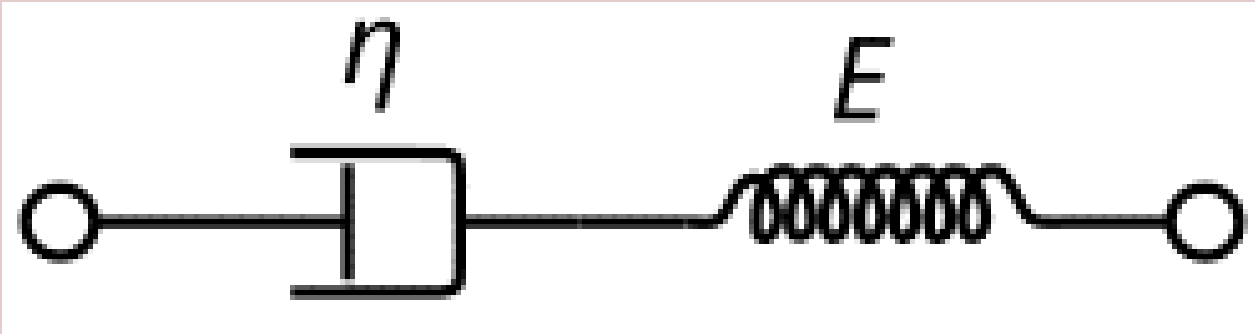
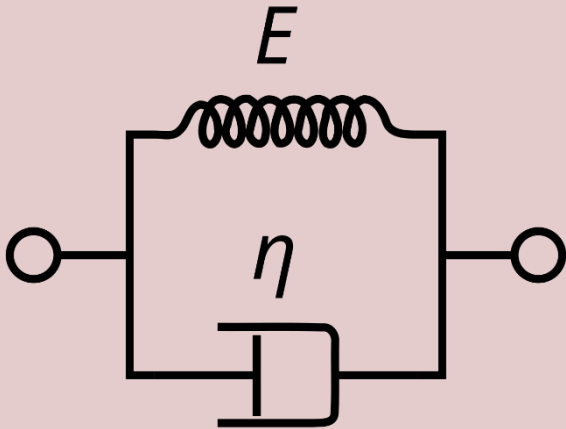
Comportements caractéristiques

- **Relaxation de contrainte** : si on impose une déformation constante ($\varepsilon = \text{cste}$), la contrainte σ **ne se relaxe pas**, elle reste constante à $\sigma = E \cdot \varepsilon \rightarrow$ Ce modèle ne décrit pas la relaxation (contrairement à Maxwell)
- **Fluage** : Sous une contrainte constante ($\sigma = \text{cste}$), la déformation ε **augmente progressivement** et tend vers une valeur asymptotique : $\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} (1 - e^{-t/\tau})$ où $\tau = \frac{\eta}{E}$ est le **temps de retard** (tps nécessaire pour atteindre 63 % de la déformation finale)
 \rightarrow Modèle décrit bien le **fluage** des matériaux viscoélastiques

Applications en Biomécanique

- Modélisation du **fluage du cartilage** sous charge (ex. : disque intervertébral comprimé)
- Description de la **déformation progressive des tissus mous** (ex. : peau, vaisseaux sanguins)
- Limite : Ne décrit pas la **relaxation de contrainte**

Comparaison Modèle de Maxwell et Kelvin-Voigt

Critère	Modèle de Maxwell	Modèle de Kelvin-Voigt
Configuration	Ressort + amortisseur en série 	Ressort + amortisseur en parallèle 
Relaxation	Oui (décroissance exponentielle de σ)	Non (contrainte reste constante)
Fluage	Déformation linéaire avec le temps (non réaliste)	Déformation asymptotique (réaliste)
Application typique	Relaxation des muscles/tendons	Fluage du cartilage ou des vaisseaux
Exemple biologique	Tendon après un étirement soudain	Cartilage sous charge prolongée

Modèle standard linéaire

Combinaison de Maxwell + Kelvin-Voigt → Modèle de Zener

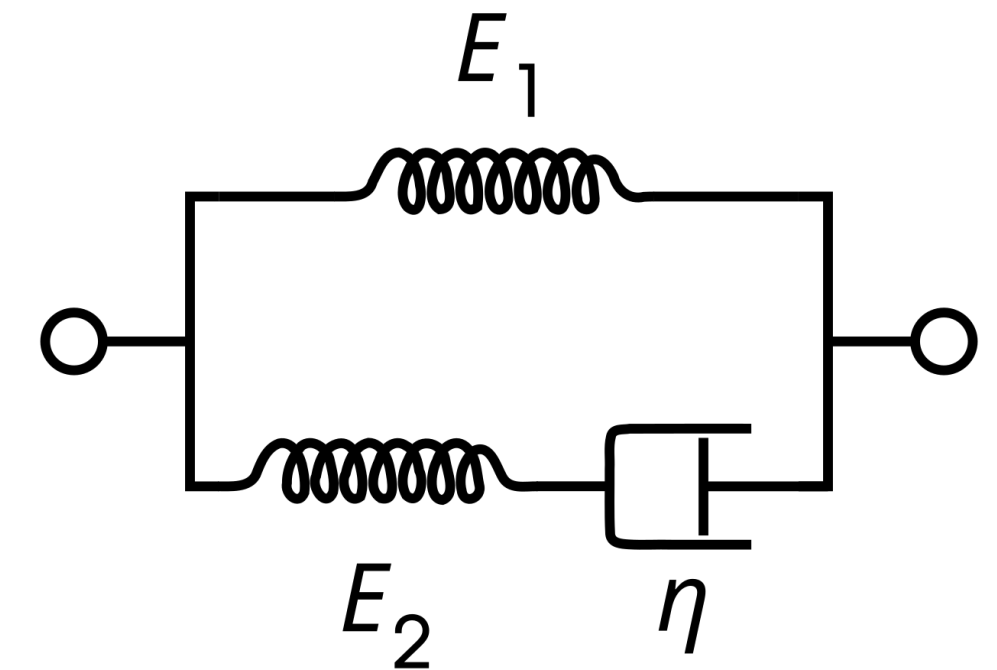
Pour mieux décrire les tissus biologiques, on combine souvent les deux modèles en **série**

Ce modèle (appelé **modèle standard linéaire** ou **modèle de Zener**) permet de décrire à la fois :

- La **relaxation de contrainte** (grâce à l'élément Maxwell implicite)
- Le **fluage** (grâce à l'élément Kelvin-Voigt).

Applications :

- Modélisation du **comportement des ligaments**, des **muscles**, ou des **parois artérielles**.
- Tendon d'Achille
 - Si on étire rapidement un tendon, la contrainte augmente puis **relaxe** (modèle de Maxwell)
 - Si on applique une charge constante, le tendon s'allonge progressivement (**fluage**, modèle de Kelvin-Voigt)
 - **Modélisation** : Un modèle **standard linéaire** (combinaison des deux) est souvent utilisé pour capturer ces deux phénomènes



7 - Limites des Modèles Simples

Non-linéarités : Les tissus biologiques ont souvent un comportement **non-linéaire** (ex. : raideur qui augmente avec la déformation). → Solution : Utiliser des modèles plus complexes (ex. : **modèle de quasi-linéaire viscoélastique (QLV)** pour les tendons).

Dépendance à l'histoire : La réponse mécanique dépend des chargements précédents (ex. : effet d'hystérésis). → Nécessite des modèles avec **mémoire** (ex. : intégrales de Boltzmann).

8 - Applications en Biomécanique et Ingénierie

Conception de prothèses : Les implants doivent reproduire la viscoélasticité des tissus naturels (ex. : disque intervertébral artificiel).

Rééducation : Comprendre la relaxation des muscles pour optimiser les étirements.

Analyse du mouvement : Modéliser la réponse des tendons lors de la course ou du saut.

4.

Présentation des outils logiciels

Analyse du mouvement

Acquérir, traiter, analyser des données de mouvement (Capture du mouvement – MoCap, forces, EMG).

Logiciel	Description	Applications
Vicon Nexus	Système de motion capture optique (caméras infrarouges + marqueurs).	Analyse de la marche, du geste sportif, rééducation.
Qualisys	Alternative à Vicon pour la mocap 3D (haute précision).	Recherche biomécanique, analyse clinique.
OptiTrack	Système de mocap abordable (caméras optiques).	Laboratoires universitaires, analyse de mouvements simples.
Kinovea	Logiciel gratuit d'analyse vidéo 2D (mesure d'angles, vitesses).	Pédagogie, analyse rapide de mouvements (ex. : saut, course).
Simi Motion	Logiciel d'analyse 2D/3D (marqueurs ou sans marqueurs).	Recherche, sport, ergonomie.

Modélisation Musculo-squelettique

Création de modèles 3D du corps humain, simuler des mouvements, et analyser les forces articulaires/musculaires.

Logiciel	Description	Applications
OpenSim	Logiciel open-source (Stanford) pour modéliser le système musculo-squelettique.	Simulation de la marche, analyse des forces musculaires, conception de prothèses.
AnyBody	Logiciel commercial pour la modélisation inverse/dynamique.	Analyse des charges articulaires, ergonomie, sport.
Visual3D	Outil d'analyse 3D intégré à C-Motion.	Recherche clinique, analyse de mouvements complexes.
SIMPACK	Logiciel de dynamique multi-corps (utilisé en ingénierie et biomécanique).	Simulation de systèmes mécaniques et biomécaniques (ex. : exosquelettes).
MADYMO	Outil de simulation dynamique (surtout pour les chocs et la sécurité).	Étude des traumatismes (ex. : accidents de voiture).

Simulation par Éléments Finis

Simulation des contraintes et déformations dans les tissus ou dispositifs biomécaniques (os, prothèses, etc.).

Logiciel	Description	Applications
ANSYS	Logiciel commercial de MEF (multi-physique).	Simulation de contraintes dans les os, prothèses, implants.
Abaqus	Outil avancé de MEF (Dassault Systèmes), idéal pour les matériaux non-linéaires.	Modélisation des tissus mous (cartilage, muscles), analyse de fatigue.
COMSOL	Logiciel de simulation multi-physique (couplage mécanique/biologique).	Modélisation de la diffusion de médicaments, interaction fluide-structure (ex. : vaisseaux sanguins).
FEBio	Logiciel open-source spécialisé en biomécanique (développé pour les tissus mous).	Simulation de la déformation des organes, des ligaments.
Mimics	Outil pour créer des modèles 3D à partir d'images médicales (IRM, scanner).	Conception de prothèses sur mesure, analyse anatomique.
LS-Dyna	Outil avancé de MEF, idéal pour les matériaux non-linéaires et la dynamique (crash)	Simulation et modélisation des tissus et de la cinématique
Vitral Performance ou PamCrash	Logiciel dédié au crash	Simulation de la cinématique et lésion des tissus lors d'un crash

Analyse clinique et rééducation



Utilisés en milieu hospitalier ou en rééducation.

Logiciel	Description	Applications
BTS Bioengineering	Système intégré pour l'analyse de la marche et la rééducation	Évaluation des troubles de la marche, suivi post-opératoire
Delsys EMGworks	Logiciel pour l'acquisition et l'analyse de l'EMG	Analyse de l'activation musculaire, rééducation
Noraxon	Plateforme complète pour l'EMG et l'analyse du mouvement	Recherche clinique, sport de haut niveau

Exemple d'utilisation par domaine



Utilisés en milieu hospitalier ou en rééducation.

Domaine	Logiciels Typiques	Exemple d'Application
Analyse de la marche	Vicon, OpenSim, Visual3D	Étude des asymétries chez un patient post-AVC.
Conception de prothèses	Mimics, SolidWorks, ANSYS	Optimisation d'une prothèse de genou personnalisée.
Rééducation	BTS Bioengineering, Delsys EMGworks, Noraxon	Suivi de la récupération musculaire après une rupture du LCA.
Recherche fondamentale	Abaqus, COMSOL, MATLAB	Simulation de la déformation d'un disque intervertébral sous charge.
Sport	Qualisys, OptiTrack, AnyBody	Optimisation de la technique de saut en athlétisme.



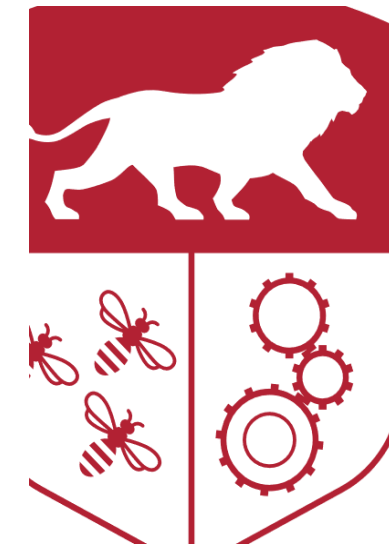
Conclusion

Conclusion

Synthèse



- La biomécanique combine **mécanique des milieux continus** et **physiologie** pour comprendre et modéliser le corps humain
- Les tissus biologiques ont des **propriétés mécaniques complexes** (non-linéaires, anisotropes)
- Prochain cours : **Physiologie musculo-squelettique**



CENTRALE LYON
ENISE

58, rue Jean Parot 42100 Saint-Étienne
www.enise.ec-lyon.fr

5.

Physiologie musculo-squelettique



Anatomie fonctionnelle

Muscles



- **Types** : Squelettiques (volontaires), cardiaque, lisses
- **Structure** :
 - Fibres musculaires → faisceaux → muscle entier
 - Unité motrice : motoneurone + fibres musculaires innervées
- **Types de contractions** :
 - Isométrique (longueur constante, ex. : tenir un poids)
 - Concentrique (raccourcissement, ex. : lever un poids)
 - Excentrique (allongement, ex. : descendre un poids)

Schéma interactif : Dessiner au tableau les muscles et os impliqués dans la flexion du coude.

Visuels

Anatomie fonctionnelle

Système Nerveux et Mouvement



- **Boucle gamma** : Régulation de la tension musculaire *via* les fuseaux neuromusculaires
- **Réflexes** : Ex. : réflexe myotatique (genou)

Biomécanique des articulations

Genou



Visuels,
anatomie

- **Structure** : Fémur, tibia, patella, ménisques, ligaments (LCA, LCP)
- **Mouvements** : Flexion, extension, rotation
- **Forces en jeu** :
 - Force de réaction tibio-fémorale : $3-5 \times$ poids corporel lors de la marche
 - Rôle des ligaments dans la stabilité

Biomécanique des articulations

Hanche et épaules



Visuels,
anatomie

- **Structure** : Fémur, tibia, patella, ménisques, ligaments (LCA, LCP)
- **Mouvements** : Flexion, extension, rotation
- **Forces en jeu** :
 - Force de réaction tibio-fémorale : $3-5 \times$ poids corporel lors de la marche
 - Rôle des ligaments dans la stabilité

Mécanique / Physiologie

La marche



Visuels,
anatomie

Mécanique : Forces de réaction du sol, moments articulaires.

Physiologie : Activation des muscles (EMG), rôle des tendons (stockage d'énergie élastique).

Mécanique / Physiologie

Le saut



Visuels,
anatomie

Phase excentrique : Muscle s'allonge (stockage d'énergie).

Phase concentrique : Muscle se raccourcit (libération d'énergie).

Méthode :

Exercice : Dessiner les forces et muscles impliqués dans un saut vertical.

Discussion : *"Comment une prothèse de cheville doit-elle reproduire ces fonctions ?"*