

Les tissus biologiques

Hélène Walter – Le Berre


helene.walter-le-berre@insa-lyon.fr

INSA

Année 2020 - 2021 Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique 1

Introduction

Bio-ingénierie?



Ou la rencontre du « mécanicien » avec le corps humain....

Année 2020 - 2021 Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique 2

Introduction

Objectifs de la Mécanique (RDM, MMC, etc...) ?

- étudier la **résistance** des pièces mécaniques
- étudier la **déformation** des pièces mécaniques

Comment?

- études expérimentales
- calculs analytiques et/ou calculs numériques...

→ utilisation de la **Méthode des Éléments Finis (MEF)**

→ nécessité de **caractériser le comportement mécanique des matériaux** constituant les pièces étudiées

Introduction

Pour le corps humain ?



Santé



Sécurité des transports



Sport

Introduction

Pour le corps humain ?

- L'utilisation de la **Méthode des Éléments Finis** est fréquente dans :
 - ✓ le domaine de la santé
 - ✓ le domaine de la sécurité et des transports
 - Cette méthode permet :
 - ✓ une meilleure compréhension des phénomènes physiques
 - ✓ d'effectuer des études irréalisables expérimentalement
 - ✓ de prédire des comportements (pour réaliser une chirurgie assistée par ordinateur, par exemple)
- Pour réaliser ces études, il est nécessaire de **connaître, comprendre et caractériser le comportement mécanique** des matériaux qui composent le corps humain : **les tissus biologiques**

Introduction : qu'est-ce qu'un tissu biologique?

De quoi est constitué le corps humain ?

- systèmes (nerveux)
- appareils (digestif, respiratoire, urinaire...)
 - organes (cœur, foie, rate, estomac...)
 - os
 - **tissus**
 - cellules
 - organites
 - molécules

échelle macro

échelle méso

échelle micro

échelle nano

Introduction : qu'est-ce qu'un tissu biologique?

En biologie...

- Définition :

« Les tissus sont des ensembles coopératifs de cellules différenciées qui forment une triple association, **territoriale, fonctionnelle et biologique** »

- territoriale → forme un ensemble topographiquement bien individualisé
- fonctionnelle → remplit un rôle
- biologique → comporte des caractéristiques biologiques propres

- Constitution :

- cellules
- matrice extra-cellulaire (MEC)

Introduction : qu'est-ce qu'un tissu biologique?

4 grandes familles de tissus :

épithéliums	épithélium de revêtement
	épithélium glandulaire
tissus conjonctifs	tissu conjonctif lâche
	tissu réticulaire
	tissu conjonctif dense
	tissu adipeux
	tissu osseux
	tissu cartilagineux
tissus musculaires	tissu musculaire strié squelettique
	tissu musculaire strié cardiaque
	tissu musculaire lisse
tissus nerveux	tissu du système nerveux central
	tissu du système nerveux périphérique

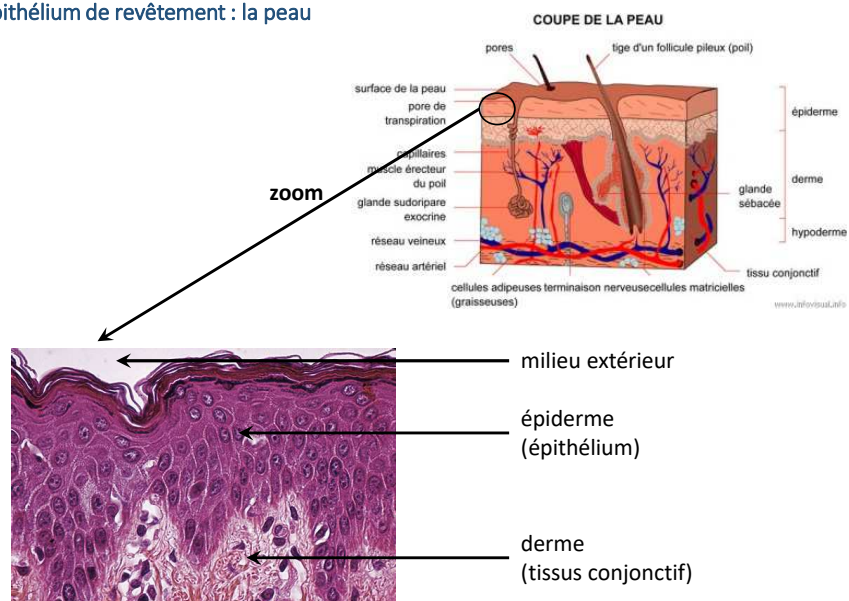
Introduction : qu'est-ce qu'un tissu biologique?

Épithéliums de revêtement

- Les ensembles tissulaires qui bordent la **surface externe du corps** et ses **cavités intérieures** ont en commun d'être constitués par un **épithélium de revêtement** reposant sur une couche de tissu conjonctif sous-jacent.
- À chaque type de localisation s'associe une terminologie différente :
 - ✓ l'épithélium de la peau s'appelle l'épiderme et le tissu conjonctif sous-jacent le derme
 - ✓ l'épithélium de l'endocarde du cœur et de l'intima des vaisseaux s'appelle un endothélium et le tissu conjonctif sous-jacent la couche sous-endothéliale
 - ✓ etc...
- Les épithéliums de revêtement sont constitués de **cellules jointives étroitement juxtaposées**, sans interposition de fibres ou de substance fondamentale

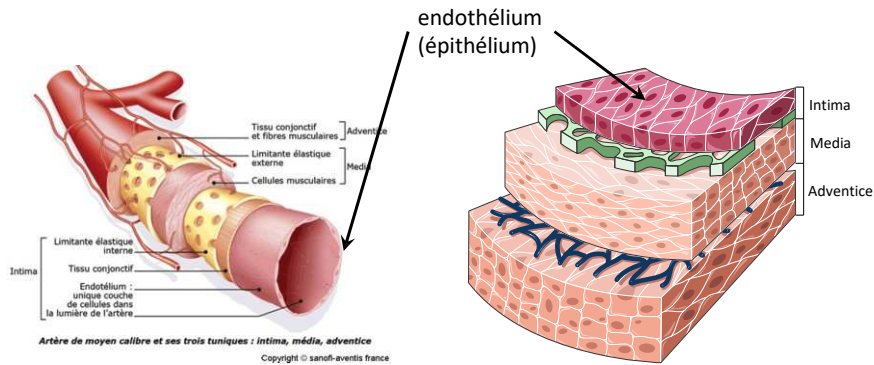
Introduction : qu'est-ce qu'un tissu biologique?

Épithélium de revêtement : la peau



Introduction : qu'est-ce qu'un tissu biologique?

Épithélium de revêtement : les parois artérielles



L'épithélium est constitué d'une monocouche de cellules endothéliales qui sont des mécanorécepteurs et qui empêchent la coagulation du sang

Introduction : qu'est-ce qu'un tissu biologique?

Tissus conjonctifs

- tissus dont les cellules sont séparées par de la matrice extra-cellulaire
 - ils constituent la majorité de la masse de l'homme (2/3 du volume total)
 - ils sont impliqués dans des fonctions de **soutien**, de **protection**, de **mouvement**, de **réponse immunitaire** et de **croissance**
- la matrice extra-cellulaire (MEC) est composée de :
 - fibres (collagène, réticuline, élastine)
 - substance fondamentale
 → classification des tissus conjonctifs:
 - ✓ MEC souple et fibreuse: tissus conjonctifs lâches, réticulaires, denses, élastiques
 - ✓ MEC très cellulaire : tissus adipeux
 - ✓ MEC solide : cartilage
 - ✓ MEC solide et minéralisée : tissu osseux

Introduction : qu'est-ce qu'un tissu biologique?

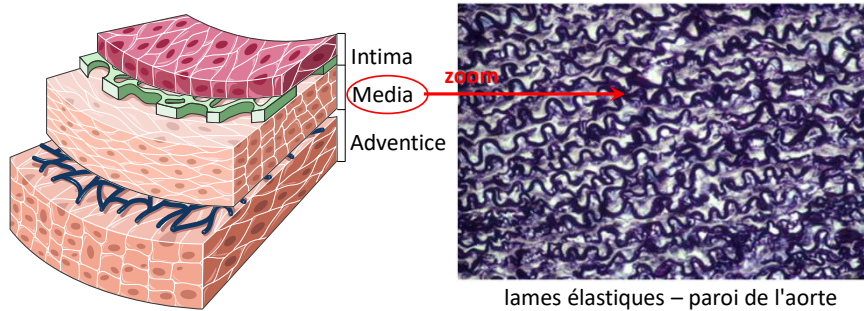
Tissus conjonctifs denses

Les tissus conjonctifs denses, riches en fibres et pauvres en cellules et substance fondamentale, ont une fonction essentiellement mécanique

→ tissus conjonctifs fibreux denses

→ tissus conjonctifs élastiques denses :

exemple : la média de l'aorte est composée de fibres élastiques et de cellules musculaires lisses



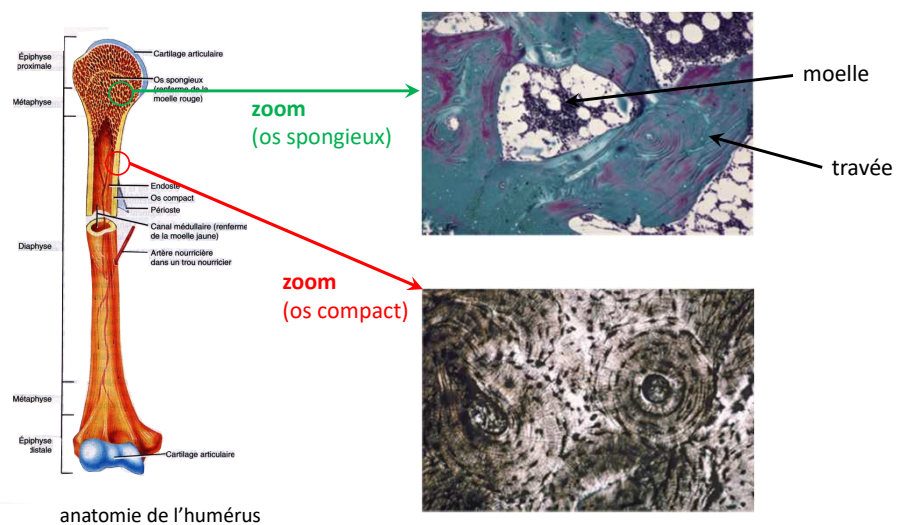
Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

13

Introduction : qu'est-ce qu'un tissu biologique?

Tissus conjonctifs osseux



anatomie de l'humérus

Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

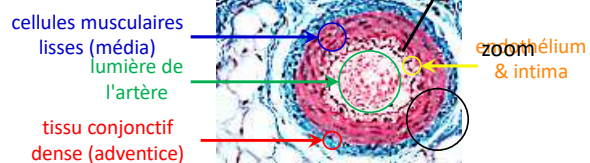
14

Introduction : qu'est-ce qu'un tissu biologique?

Tissus musculaires

- association de cellules appelées fibres musculaires, différenciées en vue de la **contraction**
- la contraction massive d'un ensemble de fibres entraîne le mouvement des tissus auxquels elles sont fixées
- la contraction permet de mouvoir
 - des parties du corps s'il s'agit de muscles squelettiques
 - des substances à l'intérieur du corps s'il s'agit de cardiaques

- Exemple :
artère musculaire



Introduction : qu'est-ce qu'un tissu biologique?

En mécanique....

on distingue 2 types de tissus :

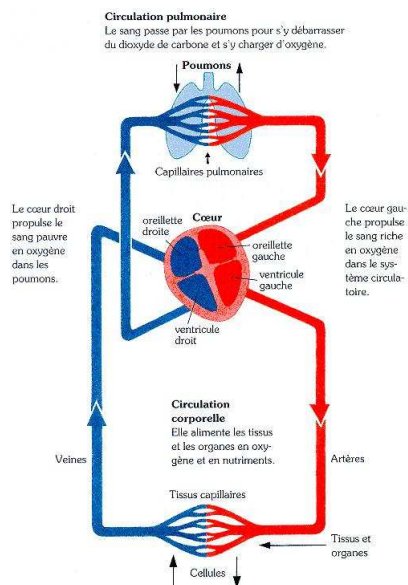
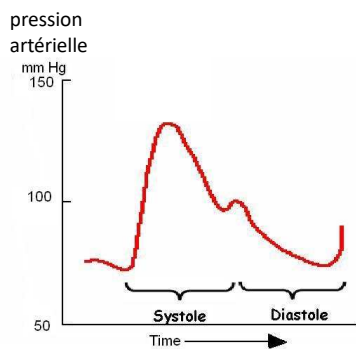
- les tissus « **mous** » : artères, ligaments, peau, muscles...
- les tissus « **durs** » : os, cartilages...

- il existe une **très grande variété** de tissus biologiques
- pour comprendre le comportement mécanique des tissus, il est nécessaire de connaître leur structure
- seuls quelques exemples seront présentés

1. Exemple de tissu mou : l'aorte

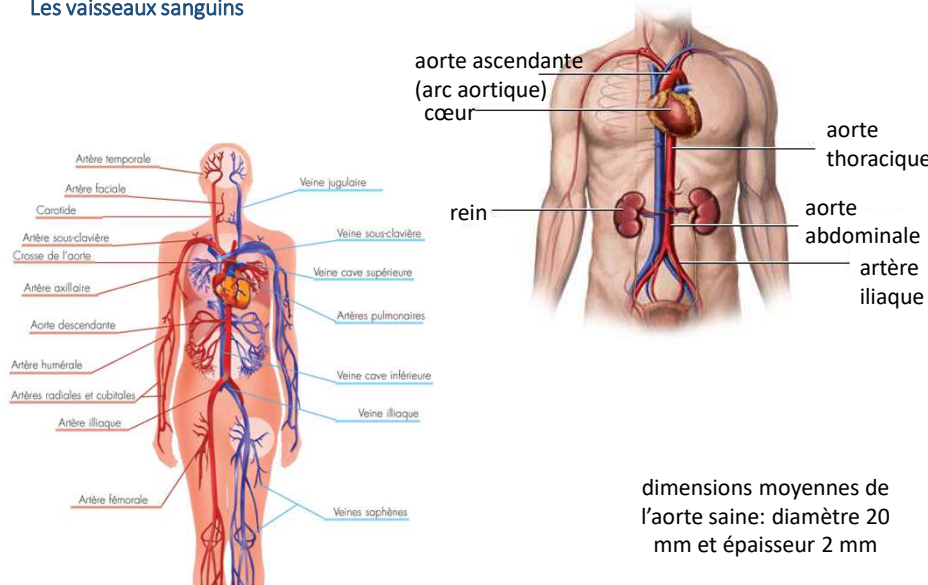
La circulation sanguine

cycle cardiaque :



1. Exemple de tissu mou : l'aorte

Les vaisseaux sanguins



dimensions moyennes de l'aorte saine: diamètre 20 mm et épaisseur 2 mm

1. Exemple de tissu mou : l'aorte

Fonctions

Le rôle du système artériel est d'assurer un **débit sanguin continu** vers les organes et les tissus de l'organisme :

- ✓ **fonction "conduit"** : connexion entre le cœur et les organes
- ✓ **fonction d'amortissement** ou **compliance artérielle** : transformation du **débit sanguin pulsé** provenant du cœur en un **débit continu** au niveau des tissus grâce aux propriétés viscoélastiques de la paroi

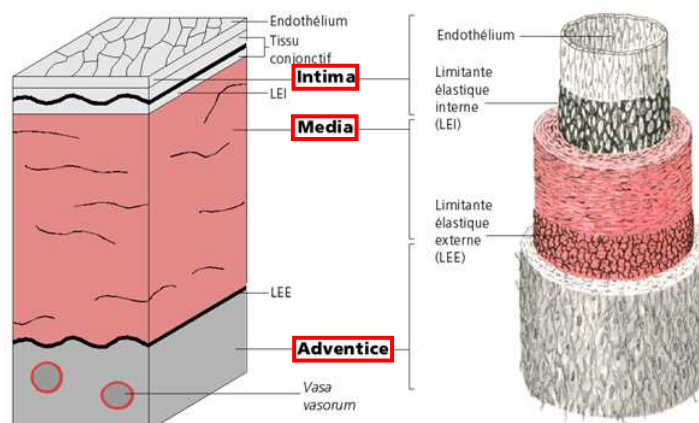
→ systole : dilatation de l'artère (stockage du sang)

→ diastole : contraction de l'artère (restitution du sang stocké)

1. Exemple de tissu mou : l'aorte

Microstructure

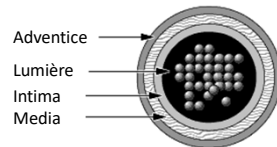
→ structure d'une artère normale : une structure en « couches »



1. Exemple de tissu mou : l'aorte

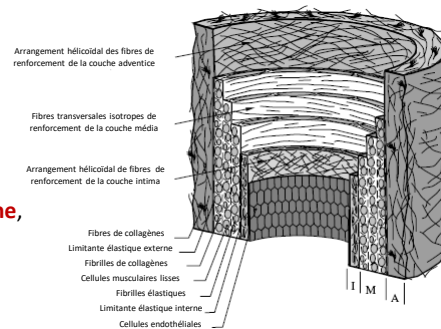
Microstructure

→ structure d'une artère normale : une structure stratifiée



3 constituants fondamentaux (fibres d'**élastine**, fibres de **collagène** et fibres **musculaires** lisses) réparties différemment suivant les couches :

- intima : riche en élastine
- média : contenant des fibres de collagène et musculaires
- adventice : riche en collagène



Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

21

1. Exemple de tissu mou : l'aorte

Comportement mécanique

→ observations

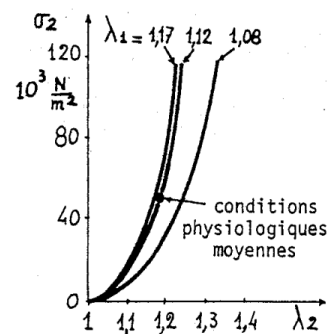
1. Structure stratifiée « en couches » comprenant 3 constituants en proportions et arrangements variés → comportement mécanique de l'aorte **anisotrope**
2. Courbes contrainte-déformation en traction fortement **non linéaires**

Exemple pour une artère iliaque :

σ_2 : contrainte circonférentielle

λ_1 : allongement longitudinal

λ_2 : allongement circonférentiel



Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

22

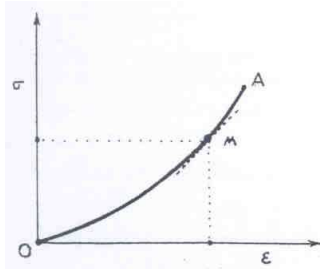
1. Exemple de tissu mou : l'aorte

Comportement mécanique

→ observations

3. État physiologique moyen est un **état de contrainte non nulle** (point M sur la courbe)

→ étude du comportement se fait autour de ce point

→ définition du module incrémental E_{inc} au point M: $E_{inc} = \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_M$ 

Propriétés des artères dans les conditions physiologiques :

- $(E_{inc})_{circulaire} \in [0,4 ; 4]$ MPa- $(E_{inc})_{longitudinal} \approx 10 \times (E_{inc})_{circulaire}$ - coefficient de Poisson: $\nu \approx 0,45$ → les artères sont quasiment **incompressibles**

Dans les conditions physiologiques : variation relative maxi du rayon des artère autour de la position moyenne (pression transmurale de 100 mm Hg) = 7 à 10 %

Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

23

1. Exemple de tissu mou : l'aorte

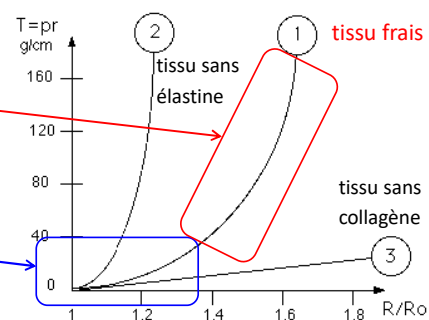
Comportement mécanique

→ observations

4. Module d'Young des fibres d'élastine $\approx 0,3$ MPaModule d'Young des fibres de collagène ≈ 300 MPaModule d'Young des fibres musculaires en tension active $\in [0,006 ; 6]$ MPaDiagramme tension - allongement
circconférentiel d'une artère iliaque:

les boucles de collagène se défont l'une après l'autre pour résister à la traction et limiter la dilatation du vaisseau

les fibres d'élastine résistent à la traction
les fibres de collagène forment des boucles lâches qui résistent peu



Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

24

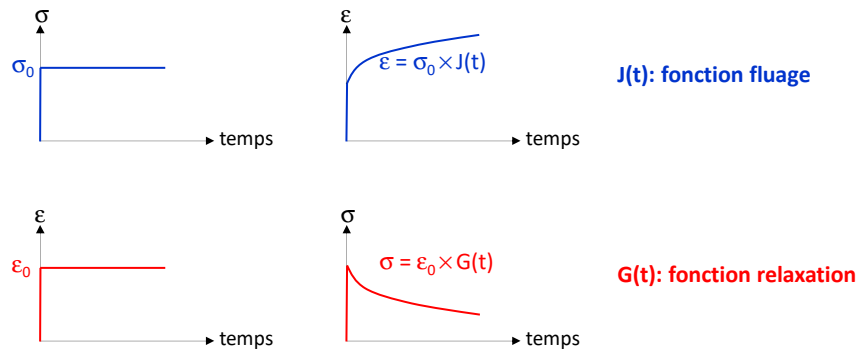
1. Exemple de tissu mou : l'aorte

Comportement mécanique

→ observations

5. Les parois vasculaires se comportent comme des **corps viscoélastiques** :

→ 5.1. allure des réponses aux essais uni axiaux :



Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

25

1. Exemple de tissu mou : l'aorte

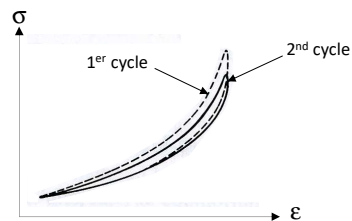
Comportement mécanique

→ observations

5. Les parois vasculaires se comportent comme des **corps viscoélastiques** :

→ 5.2. apparition du phénomène d'**hystérésis** si la sollicitation appliquée est cyclique

→ les courbes de charge et de décharge ne coïncident plus (retard)



En général, on considère:

Fibres **musculaires** lisses et fibres de **collagène** : comportement **viscoélastique**

Fibres d'**élastine** : comportement purement **élastique**

Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

26

1. Exemple de tissu mou : l'aorte

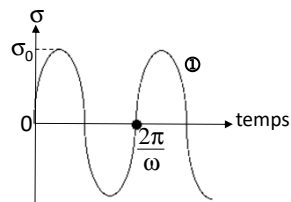
Comportement mécanique

→ observations

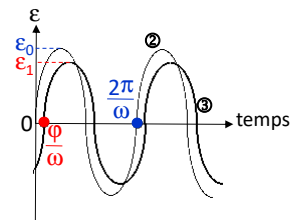
6. Comportement **dynamique** : comportement à l'application d'une contrainte sinusoïdale

→ **déformation** sinusoïdale (de même pulsation) en **retard de phase** sur la **contrainte**

→ amplitude de la déformation < celle obtenue si le matériau était purement élastique



① Contrainte sinusoïdale
 $\sigma = \sigma_0 \sin \omega t$



② Déformation élastique
 $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$

③ Déformation viscoélastique
 $\varepsilon = \varepsilon_1 \sin(\omega t - \varphi)$ avec $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$

Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

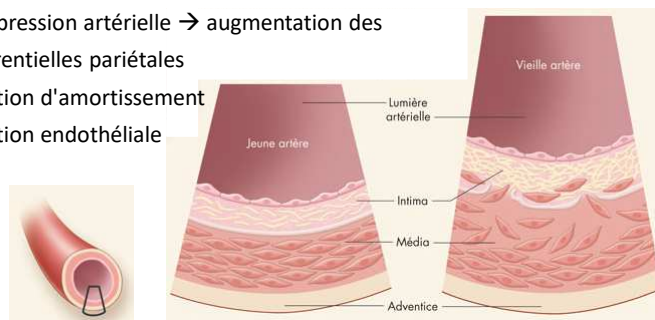
27

1. Exemple de tissu mou : l'aorte

Vieillessement artériel : l'artériosclérose

modifications structurales de l'intima et de la média qui entraînent :

- augmentation du calibre et de la lumière des grosses artères riches en tissus élastiques
- augmentation de la longueur → apparition de tortuosités
- augmentation de l'épaisseur de la paroi artérielle
- augmentation de la rigidité artérielle
- augmentation de la pression artérielle → augmentation des contraintes circonférentielles pariétales
- altération de la fonction d'amortissement
- altération de la fonction endothéliale



Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

28

1. Exemple de tissu mou : l'aorte

Vieillesse artérielle : l'artériosclérose

➤ altération de la fonction d'amortissement

systole

diastole

personne jeune

personne âgée

Année 2020 - 2021 Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique 29

1. Exemple de tissu mou : l'aorte

Les artères affectées

- L'**athérosclérose** : dégénérescence de la paroi artérielle s'accompagnant de dépôts lipidiques sous forme de plaques blanchâtres appelées athérome

→ à l'origine de la majorité des maladies cardio-vasculaires

→ première cause de mortalité au niveau mondial

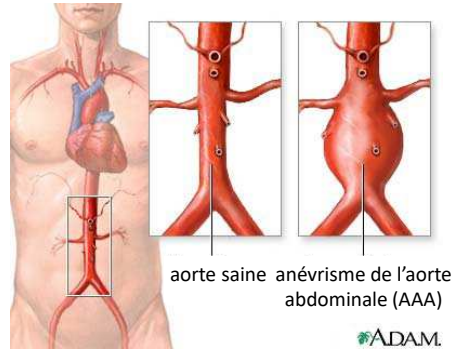
plaques d'athérome

Année 2020 - 2021 Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique 30

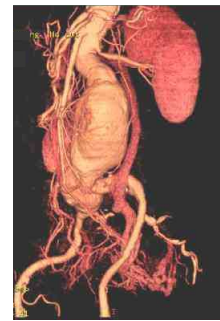
1. Exemple de tissu mou : l'aorte

Les artères affectées

→ exemple : l'Anévrisme de l'Aorte Abdominale



Définition: **dilatation localisée** de la paroi de l'**aorte** se traduisant par la formation d'une poche de taille variable



Année 2020 - 2021

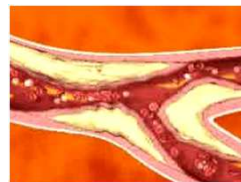
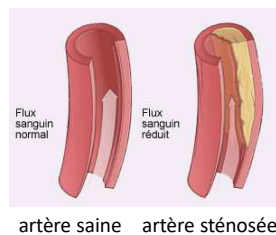
Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

31

1. Exemple de tissu mou : l'aorte

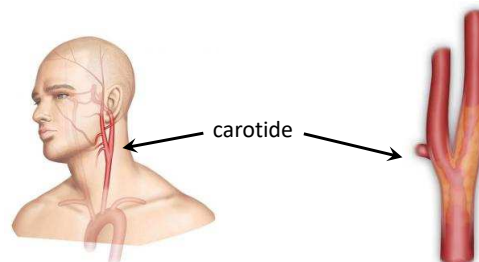
Les artères affectées

→ exemple : la sténose



Définition : **rétrécissement** du diamètre de l'artère pouvant aboutir à une occlusion
→ manque d'irrigation des organes et/ou des muscles

exemple : une sténose de la carotide peut provoquer un Accident Vasculaire Cérébral (AVC)



Année 2020 - 2021

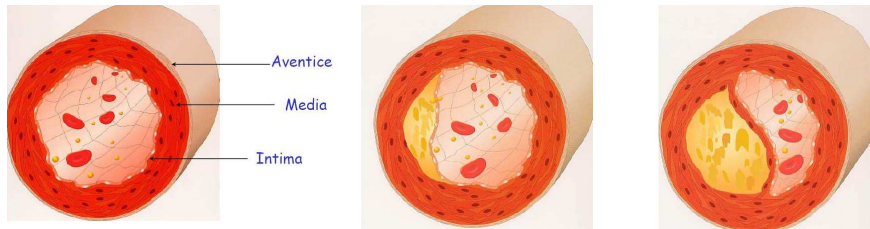
Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

32

1. Exemple de tissu mou : l'aorte

Les artères affectées

Athérosclérose : lente métamorphose de l'intima artérielle



→ modification du comportement mécanique de la paroi artérielle

	âge ∈ [35 ; 55] ans		âge ∈ [56 ; 77] ans	
	tissu sain	tissu affecté	tissu sain	tissu affecté
module d'Young (MPa)	1,02	2,77	1,25	3,06

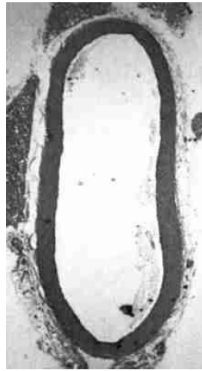
1. Exemple de tissu mou : l'aorte

Artériosclérose vs athérosclérose : 2 processus différents

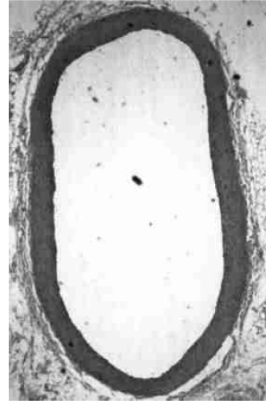
artériosclérose	athérosclérose
physiologique	pathologique
atteinte diffuse	atteinte localisée
à l'âge adulte	dès l'enfance ou l'adolescence
augmente la lumière de l'artère	diminue la lumière de l'artère

1. Exemple de tissu mou : l'aorte

Artériosclérose vs athérosclérose : 2 processus différents



personne jeune



personne âgée



personne atteinte
d'athérosclérose

1. Exemple de tissu mou : l'aorte

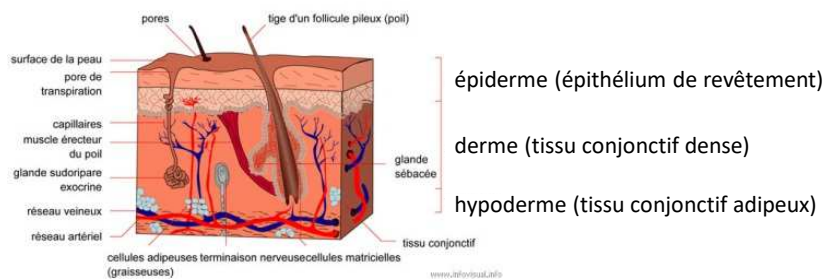
En résumé...

- L'aorte est un corps de **structure complexe et inhomogène** (composé de plusieurs tissus biologiques) qui possède un **comportement mécanique anisotrope et fortement viscoélastique**
- Les propriétés mécaniques de l'aorte varient d'un individu à l'autre
- Les propriétés mécaniques du tissu sain diffèrent de celles du tissu affecté

2. Exemple de tissu mou : la peau

La peau...

- recouvre la quasi-totalité du corps humain (1,5 à 2 m²)
- assure la protection des organes contre les agressions du milieu extérieur
- son épaisseur varie suivant les régions du corps et les sollicitations qui lui sont appliquées
- possède une structure multicouche :



Année 2020 - 2021

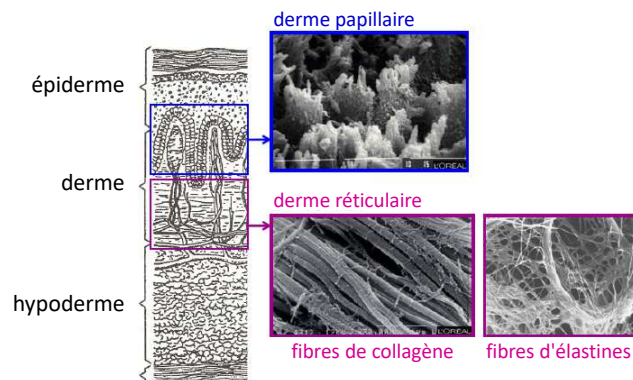
Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

37

2. Exemple de tissu mou : la peau

La couche intermédiaire : le derme

- couche la plus épaisse de la peau
- tissu conjonctif dense (riche en **fibres de collagène**, pauvres en cellules et en substance fondamentale) → tissu fibreux non orienté
- divisé en 2 couches : derme papillaire et derme réticulaire



Année 2020 - 2021

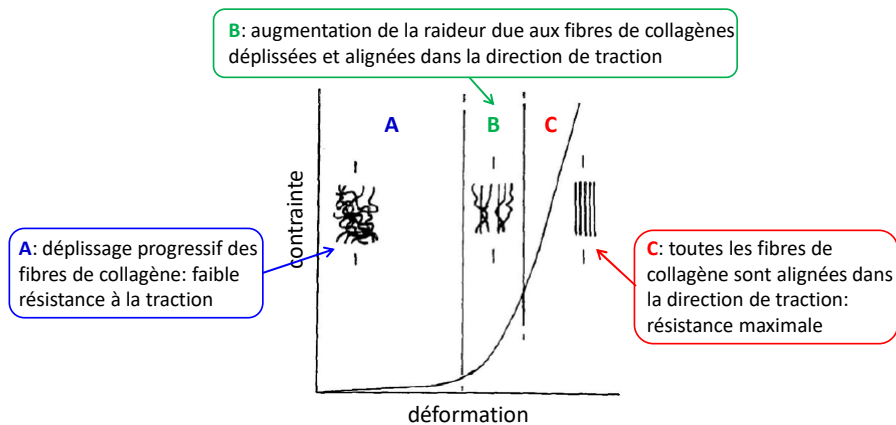
Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

38

2. Exemple de tissu mou : la peau

Comportement mécanique en traction

- rôles de l'**épiderme** et de l'**hypoderme** en traction sont **négligeables**
- le **derme** est le **constituant mécanique majeur** de la peau
- le réseau de **fibres de collagène** est le seul élément à considérer en traction



Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

39

2. Exemple de tissu mou : la peau

Propriétés mécaniques : observations

- comportement **bilinéaire élastique en traction**
- 2 modules d'élasticité peuvent être définis : E_1 pour la phase A (compris entre 5 et 700 kPa) et E_2 pour la phase C (compris entre 20 et 37 MPa)
- la déformation varie de 50 à 200%
- eau principal constituant → la peau est supposée **incompressible**
- comportement **viscoélastique** pour des **déformations relativement faibles**
- structure multicouches → comportement orthotrope ou **anisotrope** (lié peut-être à des directions privilégiées de fibres)
- variation des propriétés mécaniques en fonction de la **localisation de la peau** sur le corps liée aux densités de fibres
- **l'âge modifie la microstructure de la peau** et donc ses propriétés mécaniques
- les propriétés sont « optimales » jusqu'à ~30 ans, âge à partir duquel la dégradation commence

Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

40

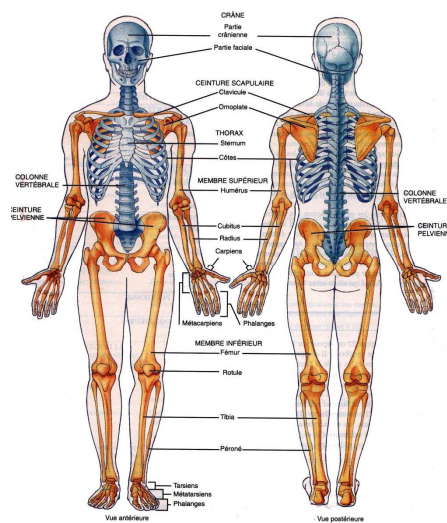
2. Exemple de tissu mou : la peau

En résumé...

- La peau humaine est un matériau composite multicouches
- De par leur **structure complexe et inhomogène** (composé de plusieurs tissus biologiques), la peau possède un **comportement mécanique anisotrope** et à priori **hyperélastique bilinéaire**
- Les propriétés mécaniques de la peau varient selon les individus (âge, sexe, environnement...) et selon sa localisation sur le corps humain

3. Exemple de tissu dur : le tissu osseux

Le squelette



Le squelette est composé d'environ 206 os.

Il a 3 fonctions:

1. fonction **mécanique** : soutien du corps et protection des organes
2. fonction **métabolique** : libération ou stockage de sels minéraux
3. fonction **hématopoïétique** : élaboration de cellules sanguines par la moelle

3. Exemple de tissu dur : le tissu osseux

Classification des os

On distingue :

- les os longs
- les os courts
- les os plats
- les os irréguliers
- les os pneumatiques
- les os sésamoïdes

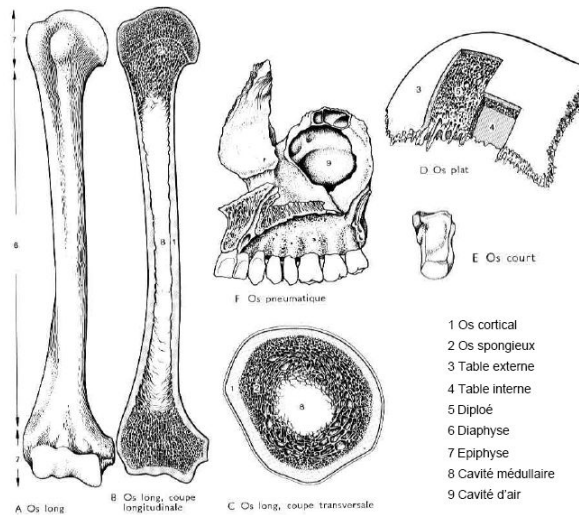
Les os sont composés :

- d'une substance rigide :

le **tissu osseux**

- d'une substance molle :

la **moelle**



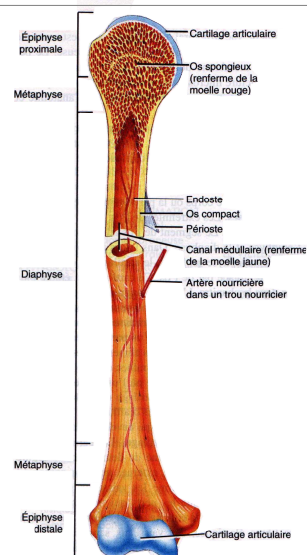
3. Exemple de tissu dur : le tissu osseux

Structure macroscopique

En coupe, l'os présente de la superficie

vers la profondeur 3 zones distinctes :

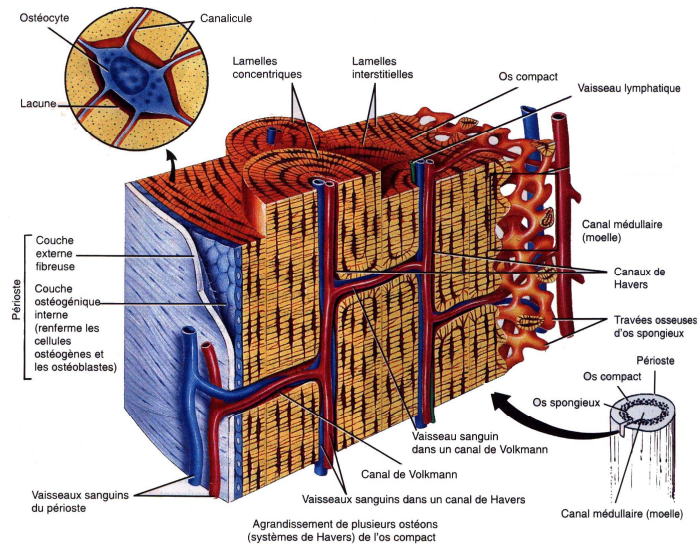
- le périoste
- l'os cortical ou os compact
- l'os spongieux ou os trabéculaire



anatomie de l'humérus

3. Exemple de tissu dur : le tissu osseux

Structure microscopique de l'os cortical



Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

45

3. Exemple de tissu dur : le tissu osseux

Structure microscopique de l'os trabéculaire ou os spongieux



→ matériau **inhomogène** constitué d'une **phase solide** et une **phase liquide**
 → la structure trabéculaire est généralement orientée pour avoir la plus grande résistance dans les directions des sollicitations dominantes

- **cellules** : ostéoblastes, ostéocytes et ostéoclastes
 - **matrice extracellulaire** : partie organique (fibrilles de **collagène** principalement) + phase minérale
- **structure lamellaire**

Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

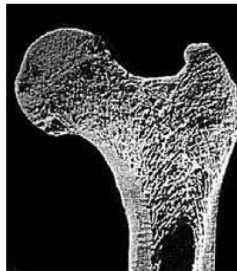
46

3. Exemple de tissu dur : le tissu osseux

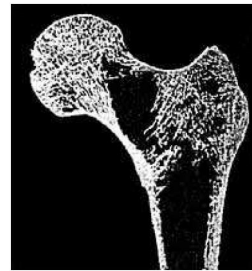
Remodelage et perte osseuse

- L'os est un **tissu vivant** qui se régénère sans cesse afin d'assurer ses fonctions
→ **remodelage osseux** et **adaptation fonctionnelle**
- 3 grandes phases caractérisent l'évolution de la masse osseuse au cours de la vie :
 - de la naissance à 18-20 ans : phase de croissance rapide qui génère le capital osseux
 - de 20 à 30 ans : phase de plateau
 - après 30 ans : ostéopénie : phase de perte osseuse physiologique et inévitable

Ostéoporose : pathologie qui se définit comme une **raréfaction osseuse** conduisant à un risque inacceptable de fracture



os fémoral sain



os fémoral ostéoporotique

3. Exemple de tissu dur : le tissu osseux

Propriétés élastiques de l'os cortical

- ✓ l'os cortical peut être considéré comme transversalement isotrope
- ✓ ordre de grandeur des propriétés mécaniques élastiques :

Module d'Young longitudinal	[16 ; 27] GPa
Module d'Young transversal	[8 ; 18] GPa
Contrainte maximale longitudinale en traction	[130 ; 150] MPa
Contrainte maximale transversale en traction	[45 ; 65] MPa
Contrainte maximale longitudinale en compression	[160 ; 220] MPa
Contrainte maximale transversale en compression	[110 ; 150] MPa

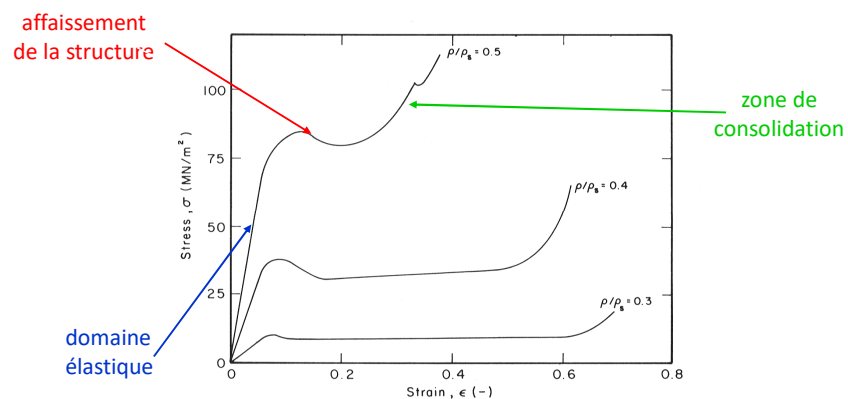
3. Exemple de tissu dur : le tissu osseux

Propriétés élastiques de l'os trabéculaire

- ✓ la dimension et la structure des travées osseuses rendent difficile la mesure des propriétés mécaniques de l'os spongieux
 - ✓ les propriétés mécaniques varient suivant l'os testé et la position de l'échantillon dans l'os
 - ✓ les propriétés mécaniques sont liées à la densité apparente
 - établissement de relations
 - ✓ l'os spongieux est fortement **anisotrope**, parfois **orthotrope** sur certains sites
- Module d'Young $\in [1 ; 9800]$ MPa
- Contrainte maximale $\in [0,1 ; 45]$ MPa

3. Exemple de tissu dur : le tissu osseux

Comportement mécanique de l'os trabéculaire en compression



3. Exemple de tissu dur : le tissu osseux

Comportement viscoélastique

- Dépendance de la contrainte σ , lors d'un essai de compression, à la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ pour **l'os cortical**

exemple de loi : $\sigma = 11,31 \cdot \ln(\dot{\epsilon}) + 2305$ pour $\dot{\epsilon} \in [0,001; 1500] \text{ s}^{-1}$

- Dépendance de la contrainte σ , lors d'un essai de compression, à la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ pour **l'os trabéculaire**

exemple de loi : $\sigma = 68 \cdot \dot{\epsilon}^{0,06} \cdot \rho_{app}^2$ ou $\sigma = (-5,8 + 37,1 \cdot \rho_{app}) \cdot \dot{\epsilon}^{0,073}$

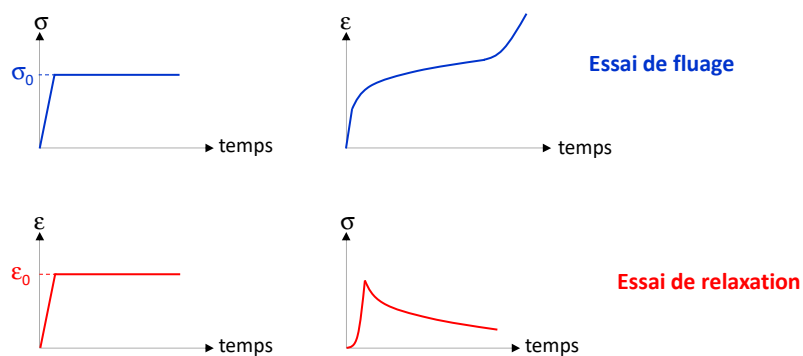
→ la contrainte dépend de la densité apparente

→ la moelle modifie les propriétés mécaniques de l'os spongieux pour des vitesses de déformation supérieure à 10 m.s^{-1}

3. Exemple de tissu dur : le tissu osseux

Comportement viscoélastique

→ Réponse de l'os trabéculaire à un essai de relaxation et à un essai de fluage :



→ Comportement viscoélastique

3. Exemple de tissu dur : le tissu osseux

En résumé...

- L'os est un matériaux vivant de constitution multiphasique
- De par leur **structure complexe et inhomogène**, les os possèdent un **comportement mécanique fortement anisotrope** et à priori **viscoélastique** et/ou **élastoplastique**
- Les propriétés mécaniques du tissu osseux varient selon les individus et selon l'os considéré...

Les tissus biologiques...

... sont des **matériaux vivant** qui possèdent une **structure complexe** responsable d'un **comportement mécanique complexe** souvent **anisotrope** et **non linéaire**.

Leurs propriétés mécaniques varient d'un individu à l'autre, d'un site à l'autre

→ ce qui posent de nombreuses questions:

- à quelle échelle étudier leur comportement mécanique?
- Comment les caractériser mécaniquement?
- Comment reproduire expérimentalement les conditions *in vivo*?
- Comment modéliser le comportement mécanique des tissus biologiques?
Quelles lois de comportement faut-il utiliser?

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

À propos de la difficulté à obtenir des données expérimentales...

Avant tout calcul EF, il faut déterminer **EXPÉRIMENTALEMENT** les **propriétés mécaniques** du tissu considéré nécessaires à l'utilisation d'une loi de comportement.

MAIS les tissus biologiques sont des matériaux **VIVANTS** :

→ Le comportement mécanique d'un échantillon de **tissu prélevé** (« **mort** ») est-il le même que celui de **ce même tissu dans son environnement** (« **vivant** »)?

→ À quelle **échelle** faut-il réaliser les essais? Sur des **échantillons** de tissu ou sur des **pièces anatomiques**?

→ Comment réaliser des essais **in vivo** ou dans des conditions similaires?

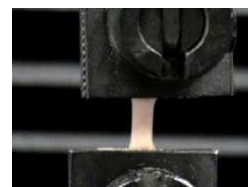
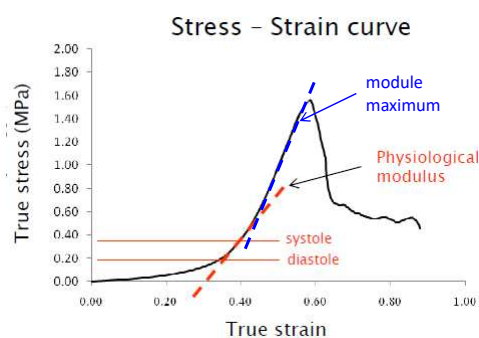
→ La réalisation d'une base de données en fonction de l'âge, du sexe, du degré de calcification serait-elle suffisante? Les données issues de la littérature sont-elles adéquates?

→ On obtient généralement des **ordres de grandeur** des propriétés mécaniques : est-ce suffisant pour une modélisation correcte?

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Exemple : caractérisation mécanique in vitro : essais uniaxiaux

- Mesure du **module d'Young « physiologique »** sur des aortes thoraciques ascendantes atteintes d'un anévrisme avec des **essais de traction**



(Duprey & al., *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, 2008)

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Exemple : caractérisation mécanique in vitro : essais uniaxiaux

- Essais de traction uniaxiale sur des échantillons de crosse aortique humaine



Aorte thoracique humaine



Éprouvette rectangulaire
(sens longitudinal)



Éprouvette mouchetée

Échantillon sain issu d'un donneur d'organes (42ans), conservé à + 4 °C, testé 48h après le décès, tissu hydraté jusqu'au début de l'essai, mouchetis à la peinture aérosol

(M. Menut, LaMCoS, 2016)

Année 2020 - 2021

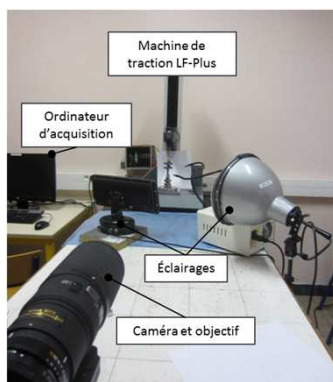
Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

57

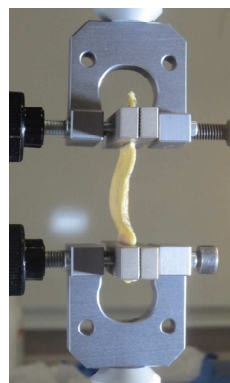
4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Exemple : caractérisation mécanique in vitro : essais uniaxiaux

- Essais de traction uniaxiale sur des échantillons de crosse aortique humaine



Montage



Éprouvette avant application
d'un pré-chargement



Éprouvette aplatie après
application d'un chargement

(M. Menut, LaMCoS, 2016)

Année 2020 - 2021

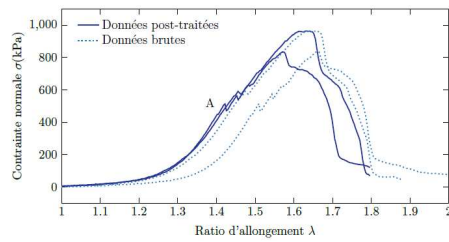
Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

58

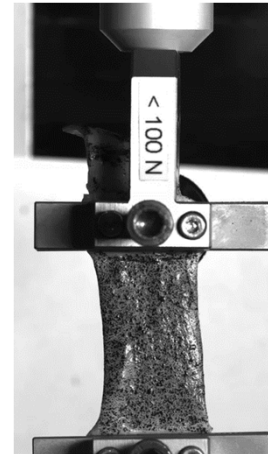
4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Exemple : caractérisation mécanique in vitro : essais uniaxiaux

- Essais de traction uniaxiale sur des échantillons de crosse aortique humaine
- Traitement des données avec Vic 2D©
- La corrélation d'images permet d'obtenir l'état initial de déformation
- Courbe caractéristique des matériaux hyperélastiques



Résultats des tests uni-axiaux longitudinaux sur une crosse aortique humaine



(M. Menut, LaMCoS, 2016)

Année 2020 - 2021

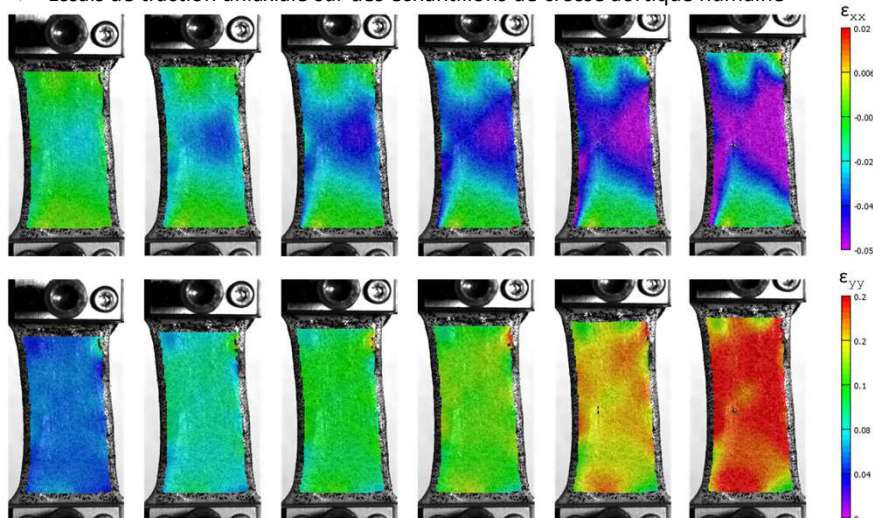
Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

59

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Exemple : caractérisation mécanique in vitro : essais uniaxiaux

- Essais de traction uniaxiale sur des échantillons de crosse aortique humaine



(M. Menut, LaMCoS, 2016)

Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

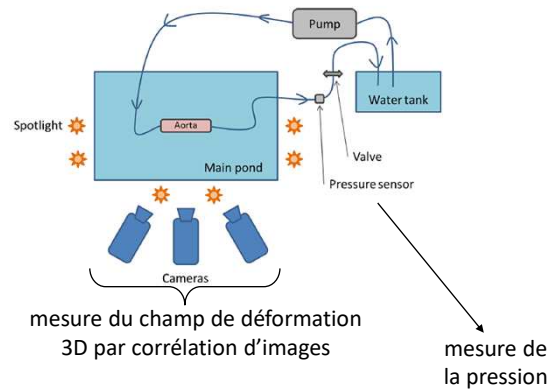
60

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Exemple : caractérisation mécanique in vitro à l'échelle de la structure

- Essais de gonflement d'aorte humaine

→ conditions de chargement proches des conditions in situ



(M. Menut, LaMCoS, 2014)

Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

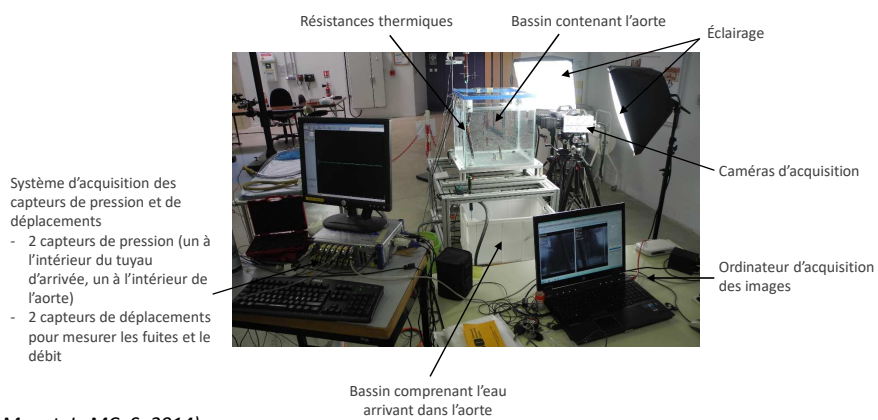
61

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Exemple : caractérisation mécanique in vitro à l'échelle de la structure

- Essais de gonflement d'aorte humaine

→ l'aorte mouchetée installée sur son support est plongée dans un bassin d'eau chauffée à 37°C de façon à s'approcher des conditions physiologiques



(M. Menut, LaMCoS, 2014)

Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

62

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Exemple : caractérisation mécanique in vitro à l'échelle de la structure

➤ Essais de gonflement d'aorte humaine

- ✓ L'aorte est prélevée entière et dans sa membrane protectrice de façon à ne pas altérer les artérioles.
- ✓ L'aorte, rendue étanche, est fixée sur son support après l'installation des tuyaux à ses deux extrémités.
- ✓ Elle est ensuite mouchetée à l'aide d'une bombe de peinture aérosol noire résistante à l'eau et au séchage rapide.



Aorte nettoyée



Aorte rendue étanche et fixée sur son support



Aorte mouchetée

NB: Les prélèvements d'aortes ont été effectués sur des sujets humains provenant du Laboratoire d'Anatomie de la Faculté de médecine de Lyon dans le cadre du don du corps à la science et les essais ont été réalisés au LBMC, IFSTTAR.

(M. Menut, LaMCoS, 2014)

Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

63

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Exemple : caractérisation mécanique in vitro à l'échelle de la structure

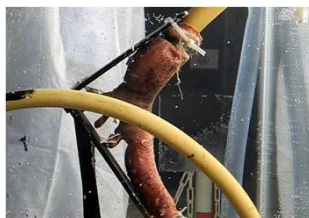
➤ Essais de gonflement : évolution de la pression dans l'aorte

On observe 2 phases :

- * 1^{ère} phase exploitée par corrélation d'images : 15% d'expansion au diamètre
- * 2^{ème} phase avec augmentation importante de pression jusqu'à rupture

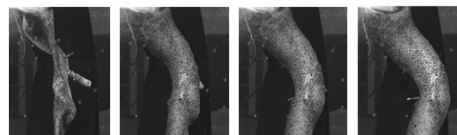


Vidéo d'un essai sur aorte décongelée



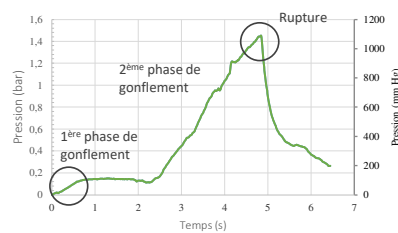
(M. Menut, LaMCoS, 2014)

Différentes étapes de gonflement (débit moyen 5 L/min)



0 bar 0,1 bar 0,6 bar 1,4 bar

Pression à l'intérieur de la crosse aortique



Année 2020 - 2021

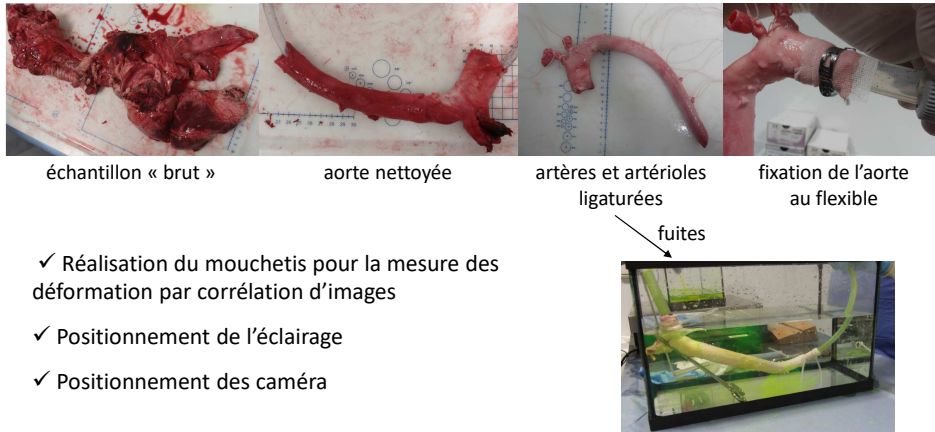
Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

64

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Exemple : caractérisation mécanique in vitro à l'échelle de la structure

- Essais de gonflement : difficultés
- ✓ Préparation des échantillons



- ✓ Réalisation du mouchetis pour la mesure des déformation par corrélation d'images
- ✓ Positionnement de l'éclairage
- ✓ Positionnement des caméra

(M. Menut, LaMCoS, 2014)

Année 2020 - 2021

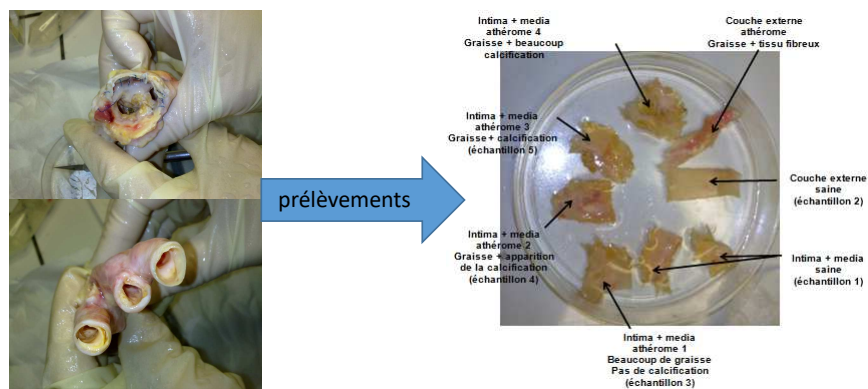
Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

65

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Exemple : caractérisation mécanique in vitro nanoscopique

- Le microscope à force atomique (AFM) permet la mesure du **module d'Young** d'un matériau mou (**aorte**) par indentation
- caractérisation mécanique **nanoscopique** des **couches** constituant l'aorte en fonction de leur teneur en graisse et de leur degré de calcification



(G. Mouktadiri, LaMCoS, 2011)

Année 2020 - 2021

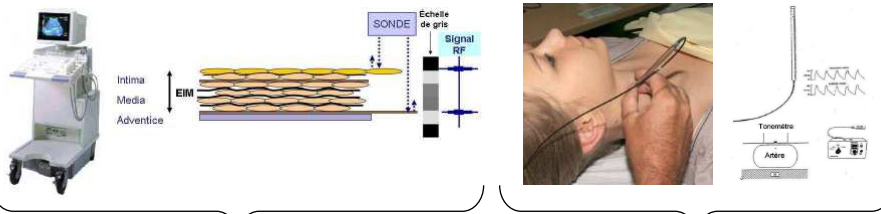
Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

66

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Exemple : caractérisation mécanique in vivo

- mesure **non-invasive** du diamètre, de l'épaisseur de la paroi et de la pression artérielle sur des **artères carotides communes** humaines par méthode ultrasonore



système de mesure du **diamètre et de l'épaisseur de la paroi** par **méthode ultrasonore**

système de mesure de **pression artérielle** par **tonométrie d'aplanation**

- ✓ mesures réalisables uniquement sur **les artères de distribution superficielle** : carotide, fémorale...
- ✓ nombre d'informations issues de la caractérisation in vivo réduit
- ✓ pas d'information sur la limite adventice/tissus périvasculaires

(thèse I. Masson, 2008)

Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

67

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Homogène ou hétérogène ?

- ✓ Les tissus biologiques sont **hétérogènes** :
 - matériaux multicouches
 - différents constituants par couches
- ✓ Faut-il prendre en compte ces hétérogénéité? Si oui, comment?
- ✓ Outil : **imagerie médicale**
 - les niveaux de gris indiquent des propriétés mécaniques différentes (dus à une variation de densité osseuse ou à un degré de calcification différent pour les parois artérielles affectées)
 - difficulté : déterminer et affecter des propriétés mécaniques à chaque niveau de gris

Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

68

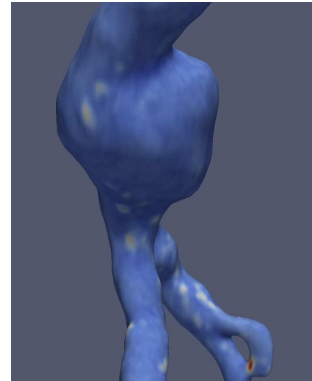
4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Homogène ou hétérogène ?

- ✓ Les parois vasculaires sont composées de **3 couches** : l'intima, la média et l'adventice
- ✓ L'aorte est constituée de parties saines et de parties calcifiées (à différents degrés)

→ plusieurs modélisations peuvent être envisagées :

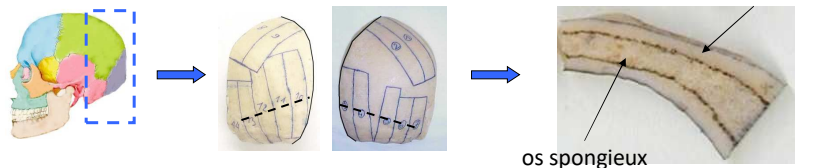
1. l'aorte est considérée comme étant un solide **homogène** et ses propriétés mécaniques sont les mêmes en tout point
2. l'aorte est considérée comme étant **hétérogène** et **différentes propriétés** sont attribuées à chacune des **couches**
3. des zones de l'aorte possédant **des degrés de calcification différents** sont identifiées (à partir de niveaux de gris sur les images) et différentes propriétés sont attribuées à chaque zone



4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Homogène ou hétérogène ?

- ✓ Exemple des os crâniens



le crâne: 8 os reliés
par des sutures

structure composite de
type « sandwich »

- Peut-on modéliser le crâne comme un matériaux homogène?
- Est-il nécessaire de modéliser le crâne comme un matériau composites?
- Est-il nécessaire de différencier les sutures?

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Isotrope ou anisotrope ?

Nombre de propriétés mécaniques à déterminer en fonction du degré d'anisotropie considéré pour un **matériau élastique**:

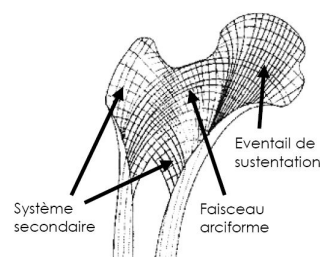
- matériau **isotrope** : **2** constantes indépendantes à déterminer
module d'Young E et coefficient de Poisson ν
- matériau **transversalement isotrope** : **5** constantes indépendantes à déterminer
2 modules d'Young, 1 module d'élasticité transversale et 2 coefficients de Poisson
- matériau **orthotrope** : **9** constantes indépendantes à déterminer
3 modules d'Young, 3 modules d'élasticité transversale et 3 coefficients de Poisson

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

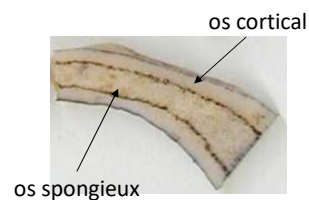
Isotrope ou anisotrope ?

- ✓ Anisotropie des os

* orientation des travées osseuses dans l'os fémoral



* échantillon d'os crânien: pas de direction privilégiée des travées de l'os spongieux



4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Quel modèle choisir ?

- ✓ Quel est le modèle le plus adapté?
- ✓ Quel est le degré de précision visé dans la modélisation?
- ✓ Est-on en mesure d'identifier tous les paramètres matériaux nécessaires?
- ✓ Modèles les plus utilisés :
 - Comportement élastique
 - Comportement élastoplastique
 - Comportement viscoélastique
 - Comportement hyperélastique

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Comportement homogène, isotrope et élastique

* Le comportement d'un matériau est dit **élastique** si ce matériau est capable de retrouver ses dimensions initiales lorsque la force qui le déforme cesse d'être appliquée.

* Les propriétés mécaniques nécessaires à ce modèle sont :

- le module d'Young E
- le coefficient de Poisson ν

→ peu de paramètres, les plus faciles à obtenir

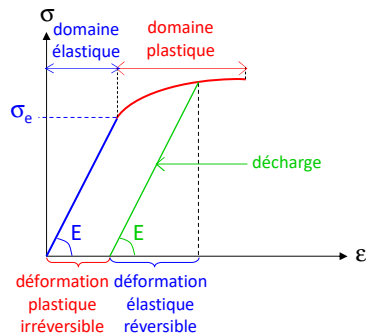
* Ce modèle est - souvent **utilisé** pour sa simplicité
 - souvent **insuffisant** (*exemple* : pour la modélisation EF du comportement d'une endoprothèse aortique abdominale: avec une aorte **élastique** les endofuites de type I ne sont jamais détectées...)

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Comportement homogène, isotrope et élastoplastique

* Le comportement d'un matériau est dit **plastique** si ce matériau ne retrouve pas ses dimensions initiales lorsque la force qui le déforme cesse d'être appliquée.

* Ces **déformations permanentes** n'apparaissent qu'à partir d'un seuil de plasticité, ou **limite élastique** σ_e



Propriétés mécaniques à déterminer:

- * E, ν (propriétés élastiques)
- * σ_e limite élastique
- * la loi d'écrouissage

→ ce type de loi de comportement est généralement utilisé pour les **tissus biologiques durs**

Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

75

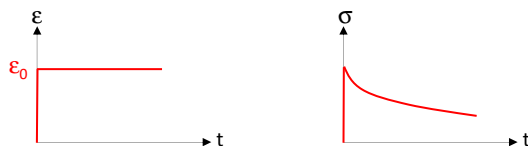
4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Comportement homogène, isotrope et viscoélastique

Le comportement d'un matériau est dit **visqueux** si l'allongement qu'il subit dû à une force dépend non seulement de cette force mais aussi du **temps** pendant lequel elle agit

En petites déformations ($< 1\%$), la réponse du temps et des déformations peuvent être séparées donnant l'équation général suivante pour un **solide viscoélastique linéaire** :

$$\sigma = \epsilon \cdot G(t)$$



$$\sigma = \epsilon_0 \times G(t)$$

$G(t)$: fonction relaxation

→ la connaissance de la fonction relaxation d'un matériau permet de déterminer toutes les propriétés viscoélastique de celui-ci

Année 2020 - 2021

Les tissus biologiques - 5e année Génie Mécanique

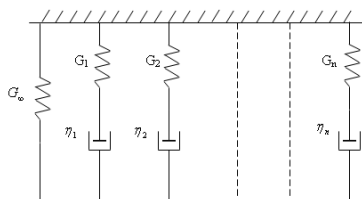
76

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Comportement homogène, isotrope et viscoélastique

* Modèle de Maxwell généralisé

Comportement solide avec élasticité instantanée et retardée



Propriétés mécaniques à déterminer:

- * E, nu (propriétés élastiques)
- * les couples (G_i, tau_i) (propriétés viscoélastiques)

Fonction de relaxation de ce modèle:

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^n G_i \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)$$

$$G_0 = \frac{E_0}{2 \cdot (1 + \nu)} = G_{\infty} + \sum_{i=1}^n G_i$$

G₀: module de cisaillement instantané (Pa)

G_∞: module de cisaillement retardé (Pa)

G_i: module de rigidité (Pa)

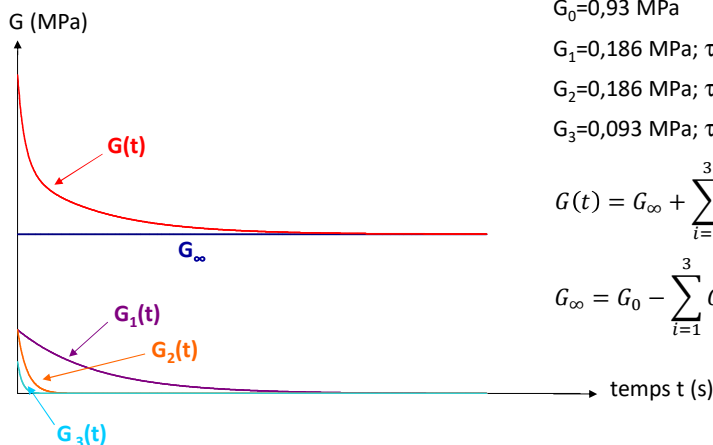
η_i: viscosité (Pa.s)

τ_i = η_i/G_i: temps de relaxation (s)

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Comportement homogène, isotrope et viscoélastique

* Modèle de Maxwell généralisé : exemple de l'aorte



G₀=0,93 MPa

G₁=0,186 MPa; τ₁=0,166 s

G₂=0,186 MPa; τ₂=0,02 s

G₃=0,093 MPa; τ₃=0,01 s

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^3 G_i \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)$$

$$G_{\infty} = G_0 - \sum_{i=1}^3 G_i$$

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Comportement hyperélastique

- ✓ modèles initialement développés pour modéliser le comportement mécanique des élastomères
 - ✓ modèles dont la particularité est de **ne pas dissiper d'énergie**
 - ✓ modèles utilisables pour des matériaux **incompressible** ou **quasi-incompressible**
 - ✓ modèles utilisables pour des matériaux **isotropes** ou **anisotropes**
- description d'un comportement **élastique non linéaire en grandes déformations réversibles** (phénomène de recouvrance)
- modèles à priori bien **adaptés** à la modélisation du **comportement mécanique des tissus mous**

4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

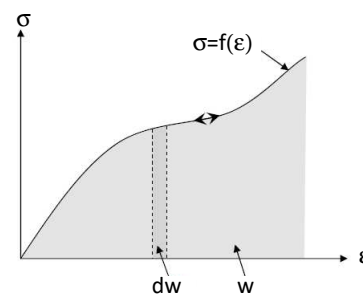
Comportement hyperélastique

* Définition

- comportement **élastique** : modélisation avec des **fonctions** mathématiques **reliant** des états de **contraintes σ** à des états de **déformations ϵ** : $\sigma=f(\epsilon)$
- comportement **hyperélastique** : existence d'un **potentiel d'énergie de déformation élastique w** , fonction de l'état de déformations ϵ , reliant l'état de contraintes à l'état de déformations par :

$$dw = \sigma d\epsilon \quad \text{ou} \quad \sigma = \frac{dw}{d\epsilon}$$

- la définition d'un modèle de comportement mécanique hyperélastique nécessite la **définition d'un potentiel d'énergie de déformation w**



4. Modélisation du comportement mécanique des tissus

Comportement hyperélastique

* modèles pour un matériau isotrope et incompressible

- ✓ modèle « néo-Hookéen » → **1** constante matériaux à identifier
- ✓ modèle de « Mooney-Rivlin » → **2** constantes matériaux à identifier
- ✓ modèle d'Ogden → **2N** constantes matériaux à identifier

* modèles développés pour les tissus mous

- ✓ Modèle de Fung (prise en compte de l'anisotropie)
→ **7** constantes matériaux à identifier
- ✓ Modèle d'Holzapfel & al. : prise en compte des couches et de l'orientation des fibres
→ au minimum **5** constantes matériaux à identifier

→ de nombreux paramètres à déterminer expérimentalement

→ utilisation de méthodes inverses

Conclusion

Les tissus biologiques sont **des matériaux VIVANTS** dont la structure et les propriétés mécaniques varient selon les individus et évoluent au cours de la vie.

Les tissus biologiques possèdent une **structure complexe** en couches avec différents constituants en proportions et arrangements variés.

- ils possèdent un **comportement mécanique complexe, anisotrope** et fortement **non linéaire**
- la caractérisation mécanique expérimentale est complexe à réaliser
- une modélisation EF nécessite l'utilisation d'une **loi de comportement adaptée** :
 - bien poser le problème et identifier les objectifs de la modélisation EF
 - commencer par un modèle simple et le compliquer si nécessaire
 - trouver le meilleur **compromis** possible : un **modèle capable de reproduire le comportement mécanique général du tissu biologique considéré** avec un **nombre de paramètres expérimentaux à déterminer limité**