

module de biophysique

RHEOLOGIE et BIORHEOLOGIE

# RHEOLOGIE

## Introduction et notions fondamentales

Pr. M. CHEREF

Département de Médecine

Faculté de Médecine - Université ALGER 1

# RHEOLOGIE

*HOOKE*

SOLIDE PARFAIT



ELASTICITE

*NEWTON*

LIQUIDE PARFAIT



VISCOSITE

CORPS REELS  
(1928)

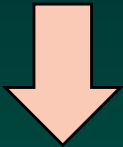


# A- Rhéologie (1) : intérêt et applications

## ETUDE DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE

---

EXPERIMENTATION

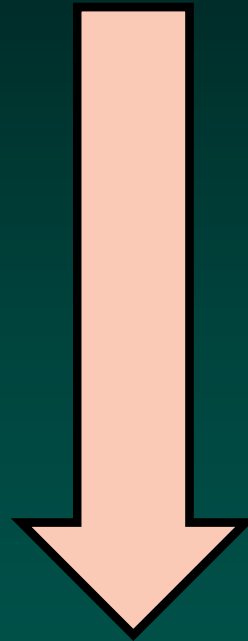


EXEMPLE DU RHEOMETRE

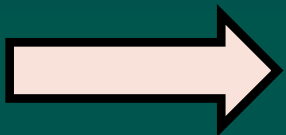
MODELISATION



TENTATIVES DE PREDICTION  
DES COMPORTEMENTS RHEOLOGIQUES



boues, encres, peintures, ..... et le matériau biologique



**LA BIORHEOLOGIE**

# A- Rhéologie (2) : définition

## RHEOLOGIE :

La rhéologie est la discipline qui traite de l'écoulement et des déformations des matériaux sous l'action de contraintes qui leur sont appliquées

Les modes d'étude sont essentiellement :

- 
- ESSAIS RHEOLOGIQUES
  - MODELISATION DE COMPORTEMENT

DEFORMATIONS D'UN CORPS SOUS L'EFFET  
DES CONTRAINTES QUI LUI SONT APPLIQUEES

---

**RHEOLOGIE**

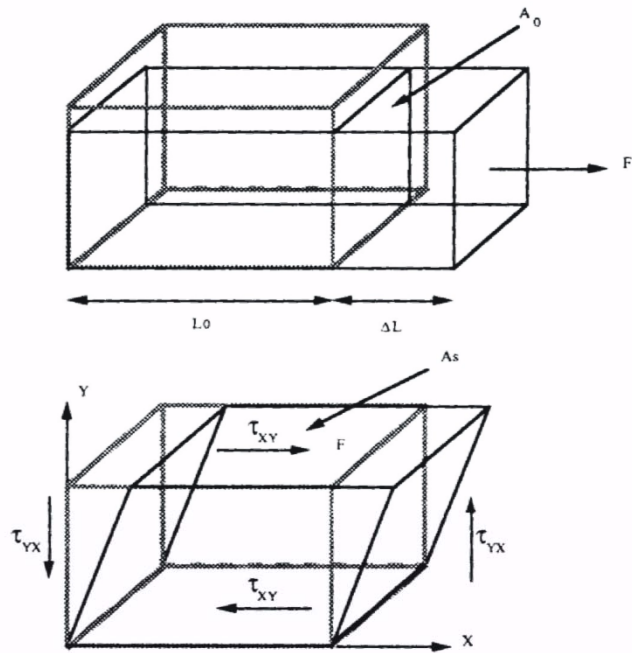


**PHYSICO-CHIMIE**

---

STRUCTURES INTERNES DES CORPS ET LIASONS  
INTERATOMIQUES OU INTERMOLECULAIRES

# B- Caractérisation (1)



$$\epsilon_c = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_c}$$

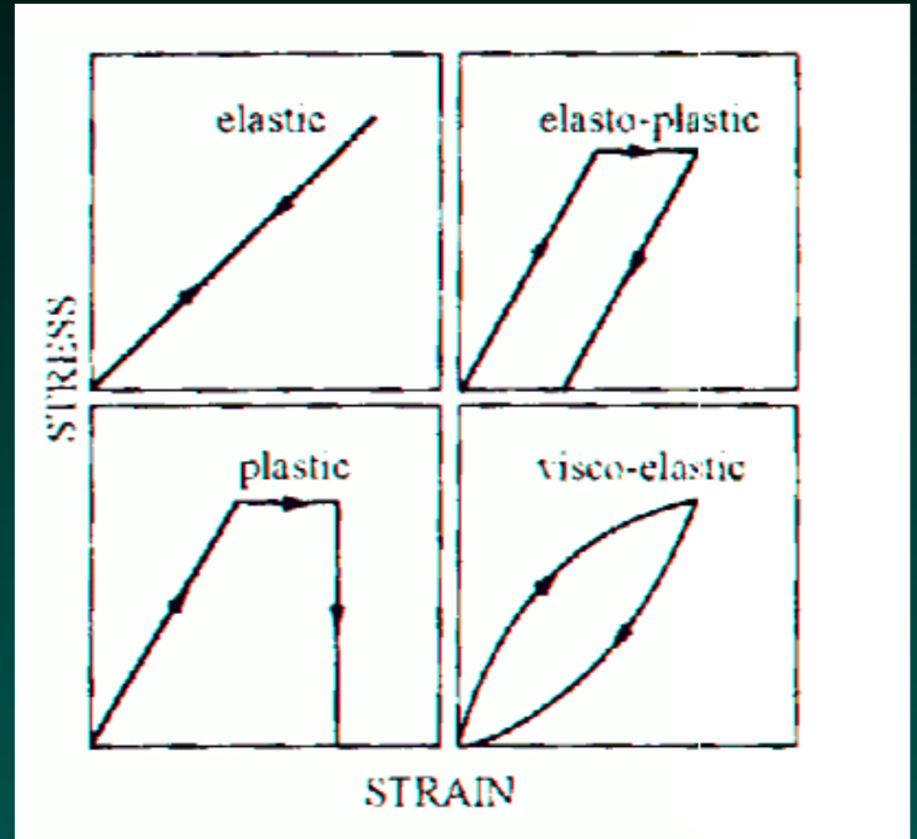
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$\lambda = \frac{L}{L_0}$$

$$\tau_{xy} = \frac{F}{A_s}$$

$$G = \frac{\tau_{xy}}{\gamma}$$

$$\nu_{xy} = \frac{-e_y}{e_x}$$



↑  
contraintes normales et de cisaillement

↑  
Notions de base

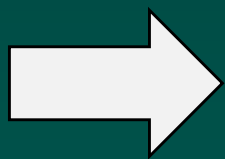
# B- Caractérisation (2)

Nombre de DEBORAH (De) : notion de temps caractéristique



$$De = T_R / T_{OBS}$$

temps caractéristique qui traduit la cinétique de restructuration (temps de relaxation)  $T_R$ , vis-à-vis du temps d'observation  $T_{OBS}$ . Le rapport de ces deux temps exprime le nombre de Deborah



exemple d'un solide :  $De \gg 1$  ( $T_R$  très grand devant  $T_{OBS}$ )  
exemple d'un fluide :  $De \ll 1$  ( $T_R$  très petit devant  $T_{OBS}$ )  
exemple des polymères :  $De \sim 1$



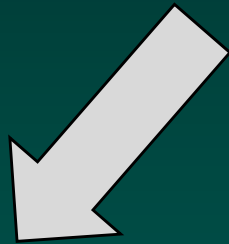
Etablir des relations mathématiques entre contraintes et déformations : lois de comportement tenant compte du temps

# B- Caractérisation (3)

## COMPORTEMENTS COMPLEXES :



SUPERPOSITION DE DIVERS TYPES SIMPLES DE COMPORTEMENT



ELASTIQUE



RESSORT



VISQUEUX



AMORTISSEUR



PLASTIQUE



PATIN

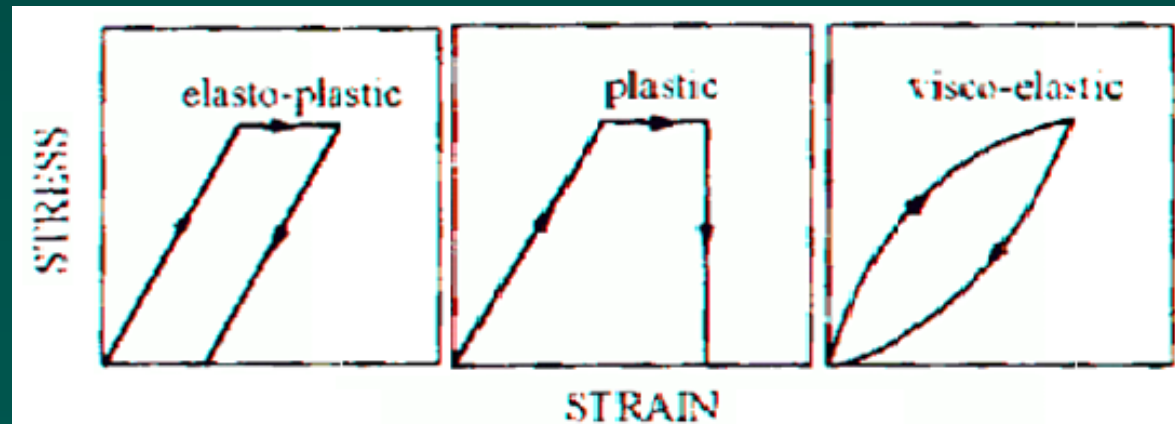


# B- Caractérisation (4)

## HYSTERESIS :

La viscosité et la plasticité engendrent des hystérèses : les courbes de charge et de décharge ne coïncident pas. Deux cas peuvent se produire:

- La courbe ne se ferme pas et la déformation augmente à chaque période (jusqu'à la RUPTURE)
- la courbe se ferme au bout d'un certain nombre de cycles. La courbe représentative décrit une boucle fermée : il y a ACCOMMODATION.

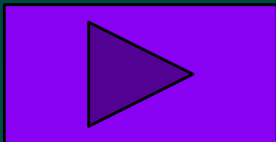


# B- Caractérisation (5) : exemple applicatif

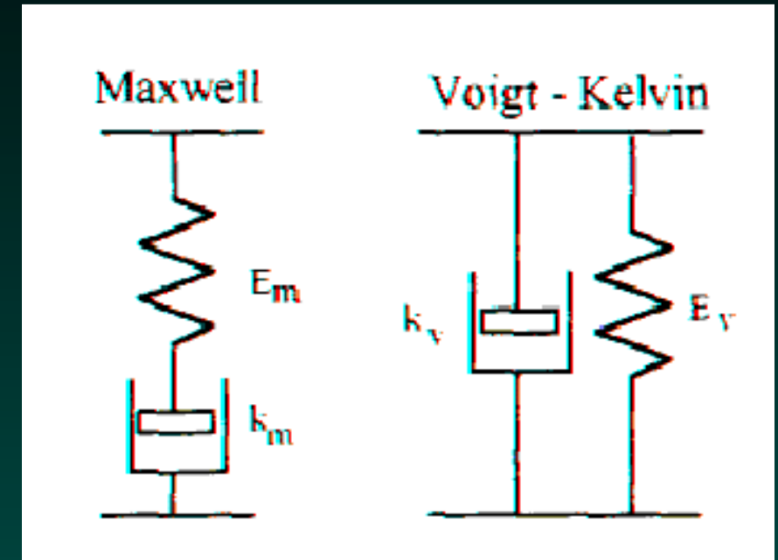
## La viscoélasticité

VISCOELASTICITE :

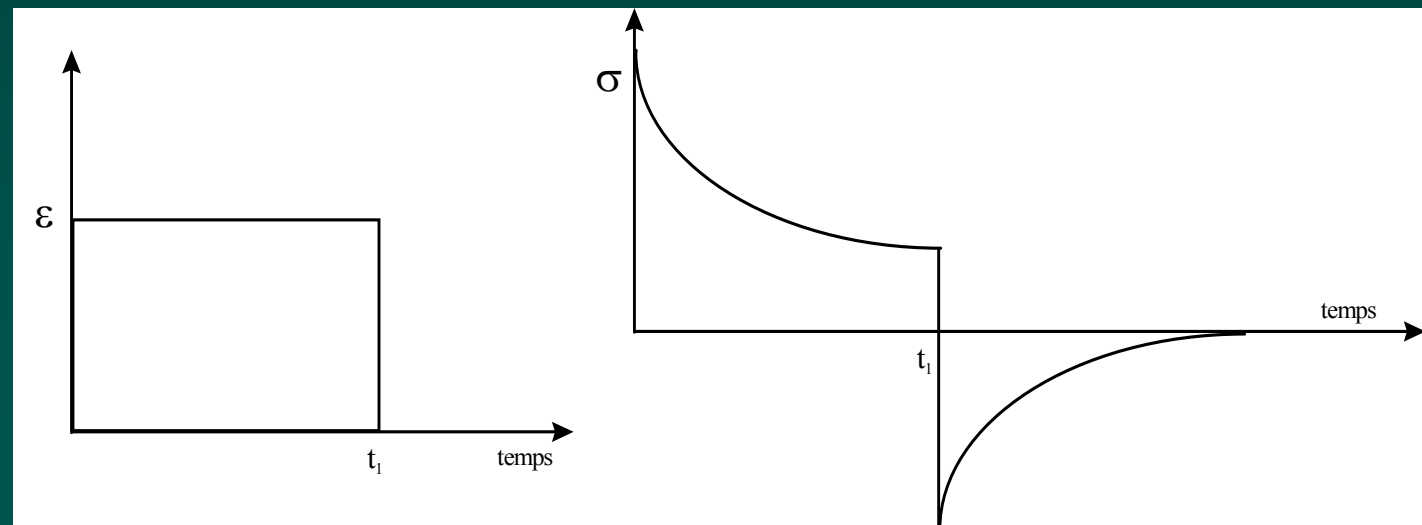
MANIFESTATION D'UN COMPORTEMENT ELASTIQUE ET/OU VISQUEUX



expérimentation  
=  
exemple du  
TEST DE RELAXATION

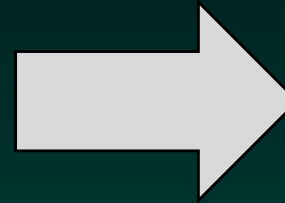


modélisation



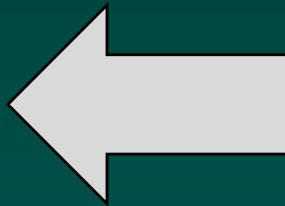
# C- Application à la viscoélasticité (1)

le solide hookéen : soumis à une contrainte constante, il se déforme immédiatement à une déformation constante, puis récupère instantanément et complètement lorsque la contrainte est éliminée (tel un ressort en acier)

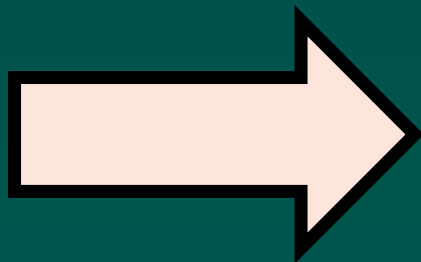


ELASTICITE

VISCOSITE



le fluide newtonien : il se déforme continuellement pendant que la contrainte est appliquée, et ne récupère pas sa forme lorsque la contrainte est éliminée (exemple de l'eau)



LA VISCOELASTICITE

# C- Application à la viscoélasticité (2)

## LA VISCOELASTICITE

### SOLIDE PARFAIT ELASTIQUE

comportement d'un solide élastique parfait

### FLUIDE (LIQUIDE) NEWTONIEN

comportement d'un liquide newtonien



Le matériau à comportement viscoélastique : dépendance au temps  
la déformation continue : une incomplète récupération de la déformation

# C- Application à la viscoélasticité (3)

## EQUATION RHEOLOGIQUE :

### MATERIAUX A COMPORTEMENT VISCOELASTIQUE (1) : EXPRESSION GENERALE

- Cette équation est obtenue en utilisant les équations rhéologiques des constituants élémentaires
- Ils définissent ainsi le comportement global du matériau, tenant compte de la phase fluide et de la phase solide (élastique) parfait.
  - un ressort pour le solide élastique parfait
  - un amortisseur pour le liquide visqueux
- Application des lois d'association « série » ou parallèle, et qui produit différents modèles : Maxwell, Kelvin Voigt, ....

# C- Application à la viscoélasticité (4)

## EQUATION RHEOLOGIQUE :

MATERIAUX A COMPORTEMENT VISCOELASTIQUE (2) : VISCOELASTICITE LINEAIRE

- Sur la base d'expériences de fluage et de relaxation :  
et tenant compte du principe de superposition de Boltzman

La modélisation se traduit par une association de ressorts et/ou d'amortisseurs :

Le ressort idéal :

Il obéit à la loi de Hooke (solide parfait)

L'amortisseur :

Il obéit à la loi de Newton



Modèle de Maxwell



Modèle de Kelvin Voigt

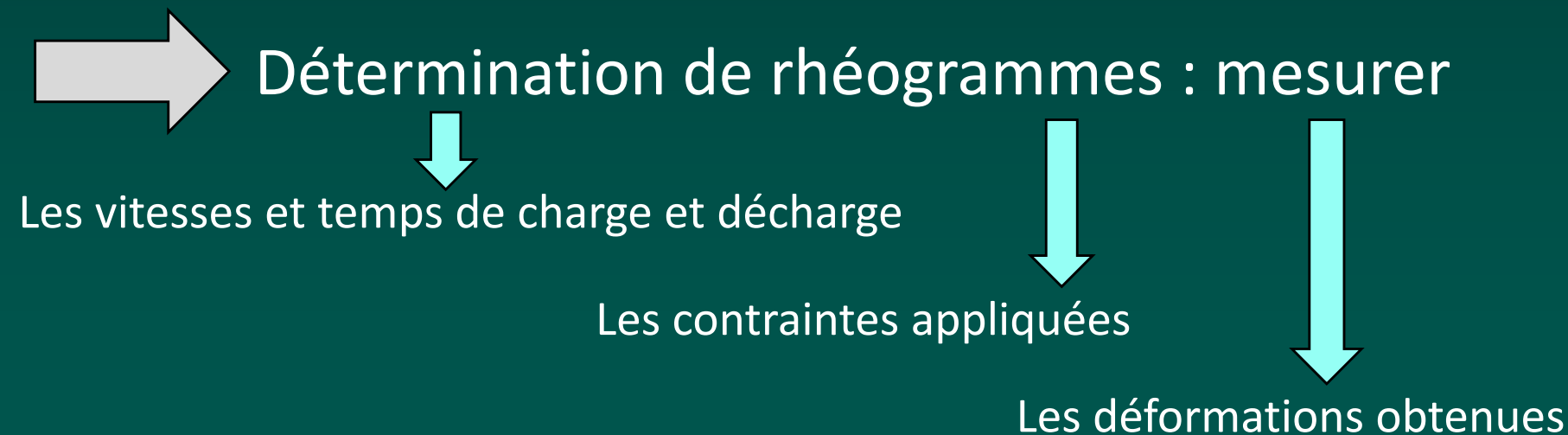
# D- expérimentation et modélisation (1)

De manière plus générale, ....

## 1- EXPERIMENTATION RHEOLOGIQUE :

### PLUSIEURS TYPES DE BANCS POSSIBLES

- Rhéomètre plan
- Rhéomètre rotatifs cylindriques (cf cours précédent : rhéomètres de type couette)
- Rhéomètre rotatifs à cônes plateau



# D- expérimentation et modélisation (2)

## 2- MODELISATION :

### a- exemple du corps plastique de BINGHAM

- Au dessous de la contrainte seuil, le corps de BINGHAM se comporte comme un solide élastique
- Au dessus de cette contrainte, le comportement de ce corps s'apparente au comportement fluide, il s'écoule comme un liquide

### b- exemple du corps rhéofluidifiant (corps pseudo-plastique)

- la viscosité apparente diminue lorsque le gradient de vitesse augmente (exemple du sang)

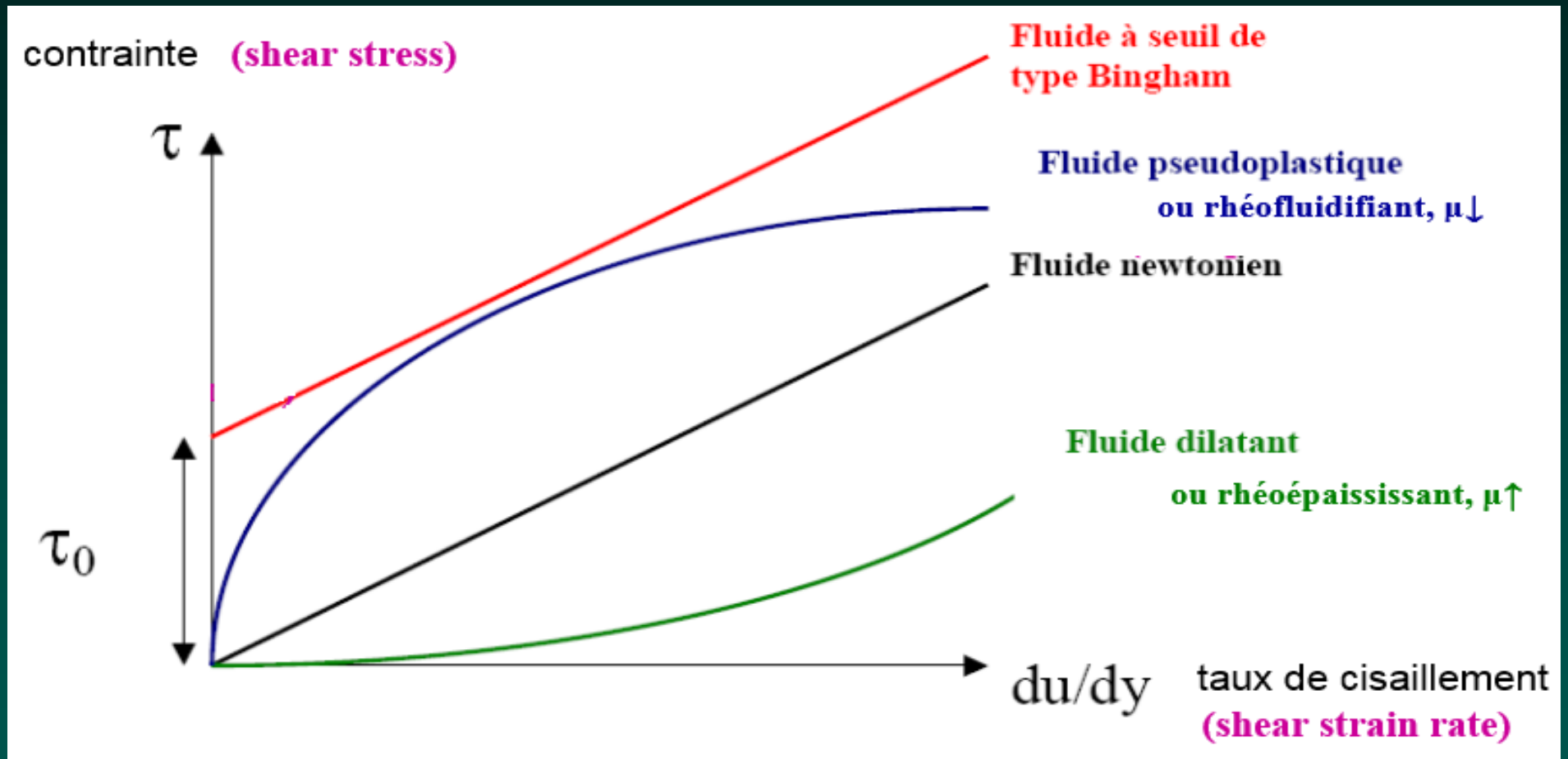
### c- exemple du corps rhéoépaississant (ou dilatant)

- la viscosité apparente augmente lorsque le gradient de vitesse augmente



# D- expérimentation et modélisation (3)

## 3- REPRESENTATION GENERALE : schématisation simple



Graph « contraintes de cisaillement en fonction du taux de cisaillement »

# D- expérimentation et modélisation (4)

## 4- THIXOTROPIE et RHEOPEXIE

### THIXOTROPIE

Un fluide qui se caractérise par une viscosité qui diminue avec le temps lorsqu'il lui est appliqué une contrainte constante

### RHEOPEXIE

Un fluide qui se caractérise par une viscosité qui augmente avec le temps lorsqu'il lui est appliqué une contrainte constante

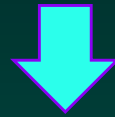
Intérêt pratique : le mucus bronchique est thixotrope

Le mucus peut être considéré comme un gel capable de s'écouler comme les liquides (viscosité) et de se déformer comme les solides (élasticité). Intérêt par oscillations à fréquences données (dizaine de Hz)

# E- application au tissu sanguin

## COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU SANG (1)

01 globule blanc pour 30 plaquettes et 600 globules rouges



le comportement rhéologique du sang est étroitement lié à celui des globules rouges

### Remarques :

- Du fait de la très grande déformabilité des globules rouges, le sang ne se comporte pas comme une suspension de particules solides mais comme une suspension de gouttes déformables.
- Cette déformabilité dépend des propriétés mécaniques (rhéologiques) membranaires et de la viscosité interne. Il est remarquable de constater qu'avec une hématoците de 95% le sang continue à se comporter comme un liquide.

# E- application au tissu sanguin

## COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU SANG (2)

### - Le sang : un fluide newtonien ?

Lorsque le diamètre des conduits est bien plus grand que celui des globules, le sang peut être considéré comme un fluide newtonien.

### - Le sang : un fluide non newtonien ?

Quand les contraintes visqueuses sont insuffisantes, les globules rouges s'agglomèrent formant des rouleaux et la présence de ces rouleaux modifient profondément le comportement rhéologique du sang

### Remarque :

si l'échelle des longueurs n'est plus grande devant le diamètre des globules, des phénomènes nouveaux se manifestent comme une baisse de la viscosité apparente du sang lorsqu'il s'écoule dans des conduits de diamètres décroissants :

c'est l'effet FAHAREUS – LINQUIST (découvert en 1931) : l'hypothèse retenue est que se forme un film plasmatisque sans globule au contact de la paroi vasculaire. Cette couche plasmatisque a été observée par Poiseuille en 1835

# F- application aux structures vasculaires

## ARTERES

géométries différentes selon le site  
(diamètres internes : de #35 $\mu$ m à #2,5 cm)  
compositions et natures différentes selon le site

## VEINES

géométries différentes selon le site  
(diamètres internes : de #20 $\mu$ m à #3 cm)  
compositions et natures différentes selon le site

## COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE

## COMPOSANTS DE LA PAROI VASCULAIRE ET GEOMETRIES

