

CHAPITRE I. INTRODUCTION

I.1 Définition

- La **rhéologie** (du grec rheo, couler et logos, étude) est l'étude de la déformation et de l'écoulement de la matière sous l'effet d'une contrainte appliquée. Le mot rheology (en anglais) a été introduit en 1928 par Eugene Bingham, professeur à l'université Lehigh aux États-Unis, le mot est emprunté à la fameuse expression d'Héraclite d'Éphèse (500 avant J.C) «panta rhei : tout s'écoule». Le mot a été francisé en «rhéologie» en 1943. **[Wikipedia]**
- La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées, compte tenu de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps.
- La rhéologie peut être aussi définie comme étant l'étude des changements de forme et de l'écoulement de la matière, comprenant l'élasticité, la viscosité et la plasticité. **[Gillet Steve, D.Sc. La viscosité]**

I.2 Domaine d'étude

Dans la pratique, la rhéologie est une extension des disciplines telles que l'élasticité et la mécanique des fluides newtoniens, aux matériaux dont le comportement mécanique ne peut être décrit par ces théories classiques.

- Verres, bois, polymères ...
- Industrie alimentaire
- Géophysique: volcans, avalanches, coulées de boue...
- Biologie: sang, sève (liquide dans les végétaux), liquide viscoélastique dans les plantes carnivores.
- Science des mouvements de la matière en réponse à une sollicitation.
- Exemples: la mousse à raser ou la peinture peuvent s'étaler mais ne coulent pas.

L'homme pratique depuis toujours la rhéologie sans le savoir dans chacune de ses fonctions de nutrition, de relation et de reproduction. Les astres, le globe terrestre, les métaux qui ont permis de classer les époques successives de la préhistoire, ont impliqué et impliquent des écoulements rhéologiques complexes.

En somme, la rhéologie est universelle, on la rencontre dans tous les domaines de l'activité humaine aussi bien que dans les phénomènes naturels. Ses applications vont de la mise en forme des produits

industriels quel qu'en soit le matériau, aux comportements de la matière vivante, en passant par la tenue des pneumatiques ou la durabilité des constructions. Son impact économique est donc considérable. [Coussot GROSSIORD, Comprendre la rhéologie]

Mécanique des milieux continus	Mécanique du solide ou Résistance des matériaux	Élasticité	
		Plasticité	Rhéologie
	Mécanique des fluides	Fluides non-newtoniens	
		Fluides newtoniens	

I.3 Nombre de Deborah

Le nombre de **Deborah** est un nombre sans dimension, utilisé en rhéologie pour caractériser la fluidité d'un matériau. Tous les matériaux même solides s'écoulent si on les observe sur une longue durée. Ce nombre est défini comme le rapport entre le **temps de relaxation**, caractérisant la fluidité intrinsèque d'un matériau, et le **temps d'observation** (temps caractéristique d'une expérience ou d'une simulation numérique) testant la réponse du matériau. Plus le nombre de Deborah est petit, plus le matériau apparaît fluide.

$$De = \frac{t_{rel}}{t_{obs}}$$

t_{rel} : temps de relaxation du fluide suite à une déformation (propriété intrinsèque de la matière).

t_{obs} : temps d'observation entre 10^{-2} et 10^3 secondes.

A l'échelle humaine:

Temps de relaxation \gg temps d'observation \rightarrow solide

Temps de relaxation \ll temps d'observation \rightarrow fluide

- Eau: $t \sim 10^{-12}$ s $\Rightarrow De \ll 1$
- Polymères : $t \sim 10^{-2}$ s $\Rightarrow De \sim 1$
- Systèmes vitreux (verres, émulsions): $t \sim 10^3$ s $\Rightarrow De \gg 1$
- Pour les ouvrages d'art (ponts, tunnels), le temps d'observation est la durée de mise en service. Il est à comparer au temps de relaxation du béton.

Il faut signaler que la notion de liquide, complexe, recouvre une réalité très diverse : il existe des liquides très fluides comme l'eau, les solvants organiques, les solutions et dispersions diluées, mais aussi des substances beaucoup plus visqueuses et consistantes dont l'aspect peut évoquer un état pâteux, semi-solide ou même solide. Cette différence d'appréciation est souvent due à la très large gamme des échelles de temps des différents mécanismes d'écoulement.

I.4. La contrainte normale et la contrainte de cisaillement

Dans le cas des matériaux solides élastiques, on définit deux types de contraintes :

- une contrainte normale notée σ , elle est appelée ainsi parce qu'elle est appliquée perpendiculairement à une section d'un matériau. Elle est liée à la déformation par le module d'élasticité (module de Young) :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{Loi de Hooke.}$$

- Une contrainte de cisaillement (tangentielle) parallèle à la section, notée τ et liée à la variation de l'angle droit γ par le module de cisaillement G par la relation :

$$\tau = \gamma \cdot G$$

Le module de cisaillement est en général exprimé en mégapascals ou gigapascals. L'angle γ est en radians.

I.5. Les déformations

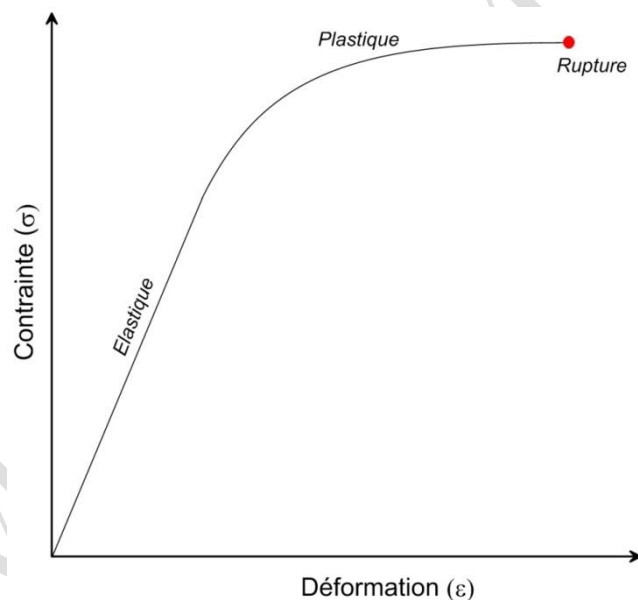


Fig. I.1 Courbe caractéristique Contrainte-Déformation

Il existe trois principaux types de déformations :

- La déformation élastique est une déformation réversible des matériaux. Elle se caractérise par une modification de la position des atomes du matériau auquel on applique une force. Lorsque cette force cesse, les atomes retrouvent leur position d'origine : la déformation est réversible. C'est une déformation proportionnelle aux contraintes appliquées (portion linéaire de la courbe).

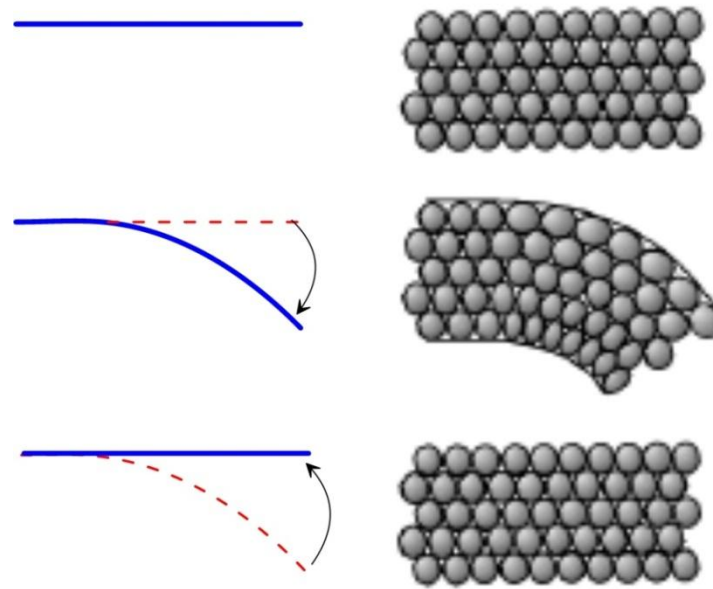
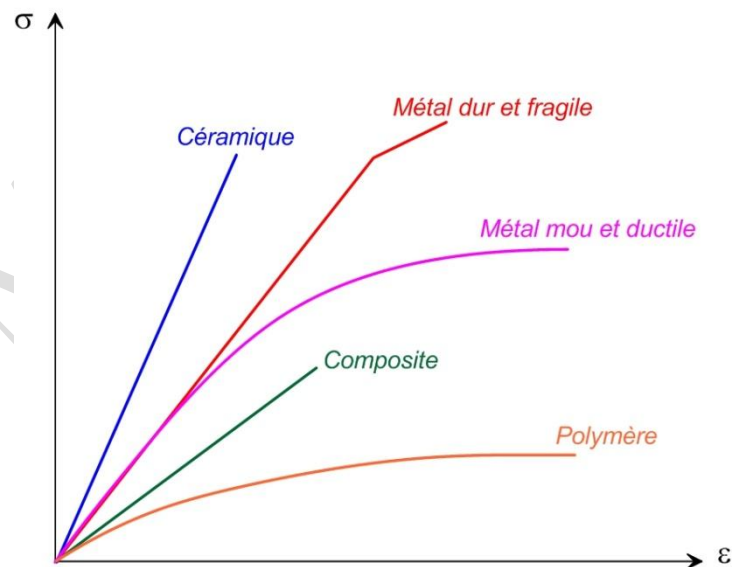


Fig. I.2 Déformation élastique à l'échelle atomique

- La déformation plastique et le fluage sont des déformations irréversibles des matériaux.
- La rupture est la formation d'un plan de fracture permanent dans le matériau.

La figure Fig. I.3 représente une comparaison entre les comportements (courbes caractéristiques) de différents matériaux.

Fig. I.3 Courbe caractéristique σ - ϵ de différents matériaux.

I.5. Le module de rigidité et de souplesse d'un matériau

La raideur (la rigidité) est la caractéristique qui indique la résistance à la déformation élastique d'un corps (par exemple un ressort). Plus une pièce est raide (rigide), plus il faut lui appliquer un effort important pour obtenir une déflexion donnée.

L'allongement élastique x d'un ressort de raideur k sous une charge statique F vaut :

$$x = \frac{F}{k}$$

F : force appliquée, $x = \Delta l$: déplacement (allongement).

En mécanique des milieux continus, on parle de tenseur (matrice) de rigidité (d'élasticité); son inverse est le tenseur (matrice) de souplesse.

$$F_i = k_{ij} \cdot x_j$$

La raideur exprime la notion d'élasticité en termes de mécanique du solide : efforts et déplacements. Le module d'élasticité exprime la même notion d'élasticité mais entre les termes continus de contraintes et de déformations.

I.6. Le fluage

I.6.1. Définitions

- Lorsqu'on applique une charge sur une poutre, celle-ci se déforme instantanément. Si on maintient cette charge, de façon constante, pendant une longue durée (plusieurs mois), on constate que la déformation se poursuit : c'est le phénomène de fluage.
- Le fluage (en anglais : creep) est le phénomène physique qui provoque la déformation irréversible différée (c'est-à-dire non-instantanée, qui dure dans le temps) d'un matériau soumis à une contrainte constante (notée σ_0), inférieure à la limite d'élasticité du matériau, pendant une durée suffisante. La vitesse de fluage augmente généralement lorsque la température du matériau augmente.
- Le fluage peut se modéliser comme un frottement fluide, du type amortisseur de suspension de voiture.

I.6.2. Essai de fluage

Le fluage est un essai de caractérisation des matériaux visqueux (cas du béton) qui sert à tester et prédire les déformations et dégradations des constructions (ponts, bâtiments réacteurs de centrales nucléaires en béton,...) qui influenceront sur leurs performances et qualité au cours de leur vieillissement ou en cas d'aléa sismique.

Lors d'un essai mécanique de fluage, réalisé avec une éprouvette soumise à une contrainte et une température constantes, l'allongement (déformation) est mesuré en fonction du temps. La courbe ainsi obtenue présente trois différentes zones, de comportements différents : il s'agit des trois modes de fluage :

- fluage primaire, endommagement rapide ;
- fluage secondaire, le mieux connu, permettant le dimensionnement de pièces mécaniques;
- fluage tertiaire, endommagement final de l'éprouvette, rupture.

La déformation engendrée par l'échelon de contrainte est enregistrée durant un temps $2 \times t$

Un échelon de contrainte est appliqué à trois matériaux différents pendant un temps t

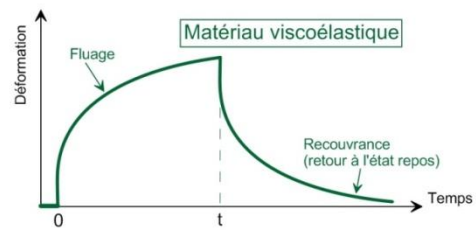
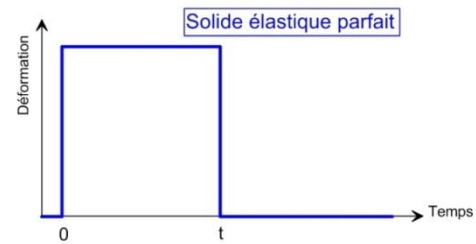
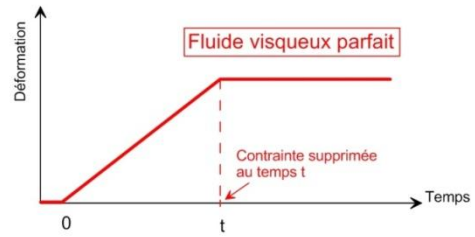
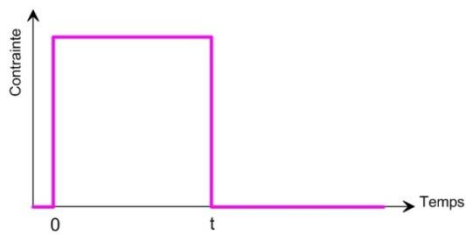


Fig.I.4 Comportement en Fluage et en recouvrance des matériaux

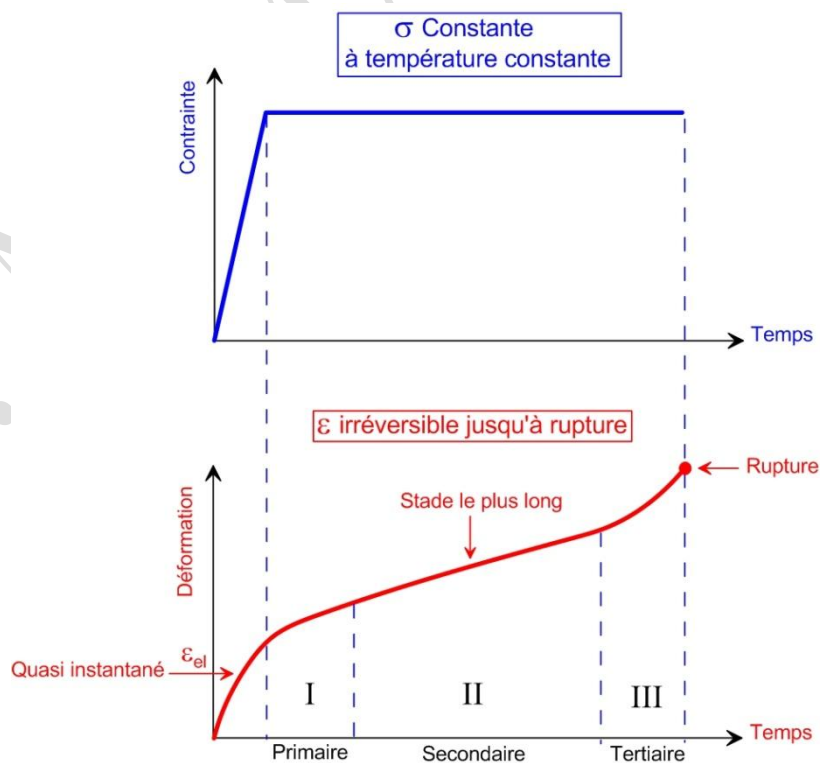


Fig.I.5 Essai de fluage

Les essais de fluage sont réalisés en appliquant une contrainte constante au matériau, en général en traction. La courbe représente la déformation de l'éprouvette en fonction du temps, pour une contrainte constante donnée. Une première déformation apparaît instantanément à la mise en charge. Ensuite, une déformation lente apparaît au cours du temps. Dans un premier temps (domaine de fluage primaire), elle décroît, pour atteindre une valeur constante dans le domaine de fluage secondaire (ou fluage stationnaire). Enfin, cette vitesse de déformation augmente (domaine de fluage tertiaire) jusqu'à la rupture.

Exemples

- Une étagère fléchit après quelques années sous un poids constant.
- Les glaciers s'écoulent sous leur propre poids car la glace flue (coule).
- A très haute température, les métaux se comportent comme des fluides viscoélastiques (pâtes).
- Fluage des plaques tectoniques des continents : déformation et déplacement jusqu'à 10 cm par année.
- Une aube de réacteur d'avion est soumise à la force centrifuge ainsi qu'à une température élevée lors du fonctionnement. Le fluage d'aubes de turbine limite leur durée de vie.

- **Remarque :** la recouvrance (ou recouvrement) est le retour à l'état initial, en cas de la suppression de la contrainte, dans l'essai de fluage sur les matériaux viscoélastiques. (voir figure essai de fluage en haut).

I.7. Relaxation de contrainte

I.7.1. Définitions

La relaxation de contrainte est une méthode expérimentale d'analyse de la viscoélasticité linéaire. La relaxation est une propriété non instantanée : lorsqu'on impose un échelon de déformation, du fait du caractère viscoélastique du matériau, la contrainte met un certain temps à atteindre sa valeur finale. Le matériau retourne progressivement à un état plus stable. La relaxation, comme la viscoélasticité, fait intervenir les notions de résistance à l'écoulement, de viscosité, d'amortissement.

I.7.2. Essai de relaxation

Dans l'essai de relaxation, on impose une déformation instantanée à une éprouvette et on la maintient constante au cours du temps. Puis on observe la contrainte qui en résulte. Il a été constaté que celle-ci diminue progressivement au cours du temps.

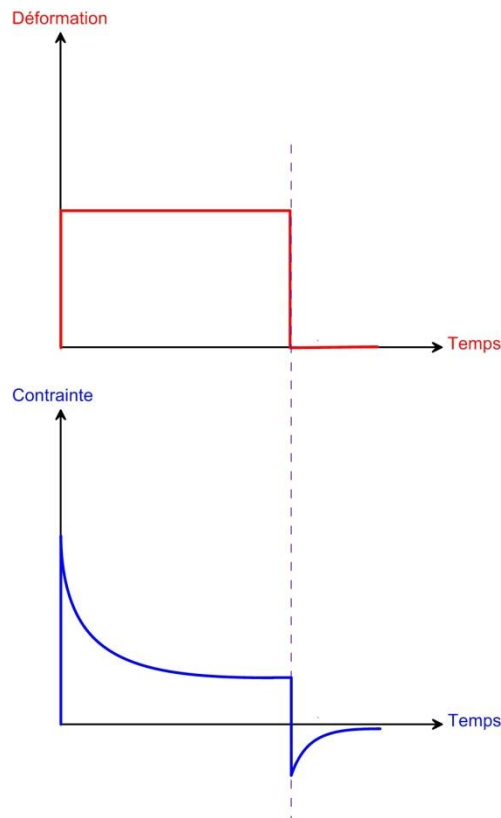


Illustration du principe d'une expérience de relaxation de contrainte.

- Les caractéristiques de relaxation d'un matériau peuvent être utilisées directement pour connaître, après serrage d'un boulon, la contrainte rémanente de fixation après un temps donné à une température de service.
- Pour maintenir et garantir un niveau de résistance minimale de pièces assemblées par boulonnage fonctionnant à chaud, il est nécessaire d'effectuer périodiquement un resserrage car la contrainte initiale de serrage relaxe avec le temps.
- Les essais de relaxation permettent de connaître le temps conduisant à un niveau de contrainte à partir duquel un resserrage est à réaliser ou encore de connaître la périodicité du resserrage.