

# COMPORTEMENTS MÉCANIQUE DES MÉTAUX ET ALLIAGES

## **CHAPITRE 3 :**

### **COMPORTEMENT RHÉOLOGIQUE**

### 3 - 1. Introduction

- Le comportement rhéologique des métaux, essentiel pour comprendre leur déformation sous contrainte, est généralement décrit par des modèles mécaniques.
- À température ambiante, la plupart des métaux exhibent un comportement élastique, suivant la loi de Hooke, où la déformation est proportionnelle à la contrainte appliquée. Cependant, à des contraintes plus élevées, des phénomènes de plasticité peuvent apparaître, entraînant une déformation irréversible.
- Certains métaux présentent également des comportements viscoélastiques, influencés par la température et la vitesse de déformation. Comprendre ces aspects est crucial pour l'ingénierie des matériaux métalliques, notamment dans la fabrication et la mise en forme, où la rhéologie des métaux influence directement leur performance et leur durabilité.

## 3 - 2. Comportement rhéologique

En métallurgie, le comportement rhéologique fait référence à la manière dont les métaux et les alliages se déforment et répondent à des contraintes externes, à des températures spécifiques et à des taux de déformation variables. C'est une caractéristique importante qui influe sur les propriétés mécaniques des matériaux métalliques et qui est

**Le comportement rhéologique des métaux en métallurgie peut être classé en plusieurs catégories principales**

***Comportement :***

***1.Élastique***

***2.Plastique ;***

***3.Viscoélastique ;***

***4.Viscoplastique ;***

***5.Superplastique ;***

***6.Elasto-plastique ;***

cruciale pour la conception et le formage des pièces.

## **a. Définitions**

### **i. Rhéologie**

- 1.C'est la science des matériaux en écoulement, à l'interface entre physique, mécanique, chimie et biologie. Elle étudie la résistance des matériaux aux contraintes et aux déformations.
- 2.C'est la science qui étudie les déformations et l'écoulement de la matière

3. 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 véritablement décrit par ces théories.
4. l'objet de la rhéologie est l'étude du comportement mécanique, c'est-à-dire des relations entre les déformations et les contraintes de la matière. Ensuite, s'appuyant sur la connaissance de ce comportement, on calculera, grâce à la mécanique des milieux continus, la répartition non uniforme des contraintes et des déformations dans un corps sous l'effet des forces extérieures.

5. La rhéologie est une partie de la physique qui étudie la plasticité, l'élasticité, la viscosité et la fluidité des corps déformables.

## **ii. Rhéologique :**

Signifie relatif à la rhéologie, aux écoulements visqueux

## 3 - 3. Facteurs influençants le comportement rhéologique

Il est important de noter que le comportement rhéologique des métaux et des alliages peut être influencé par divers facteurs :

- i. la composition chimique,
- ii. la température,
- iii. la microstructure,
- iv. les conditions de chargement ;
- v. la vitesse de Déformation ;
- vi. la microstructure ;
- vii. les conditions Environnementales.

Par conséquent, l'étude approfondie de la rhéologie des métaux est essentielle pour concevoir et fabriquer des composants métalliques avec des propriétés mécaniques souhaitées.

## 3 - 4. Comportement viscoélastique

### a. Définition

#### i. Définition de la viscoélasticité

**La viscoélasticité** est la propriété de matériaux qui présentent des caractéristiques à la fois visqueuses et élastiques, lorsqu'ils subissent une déformation.

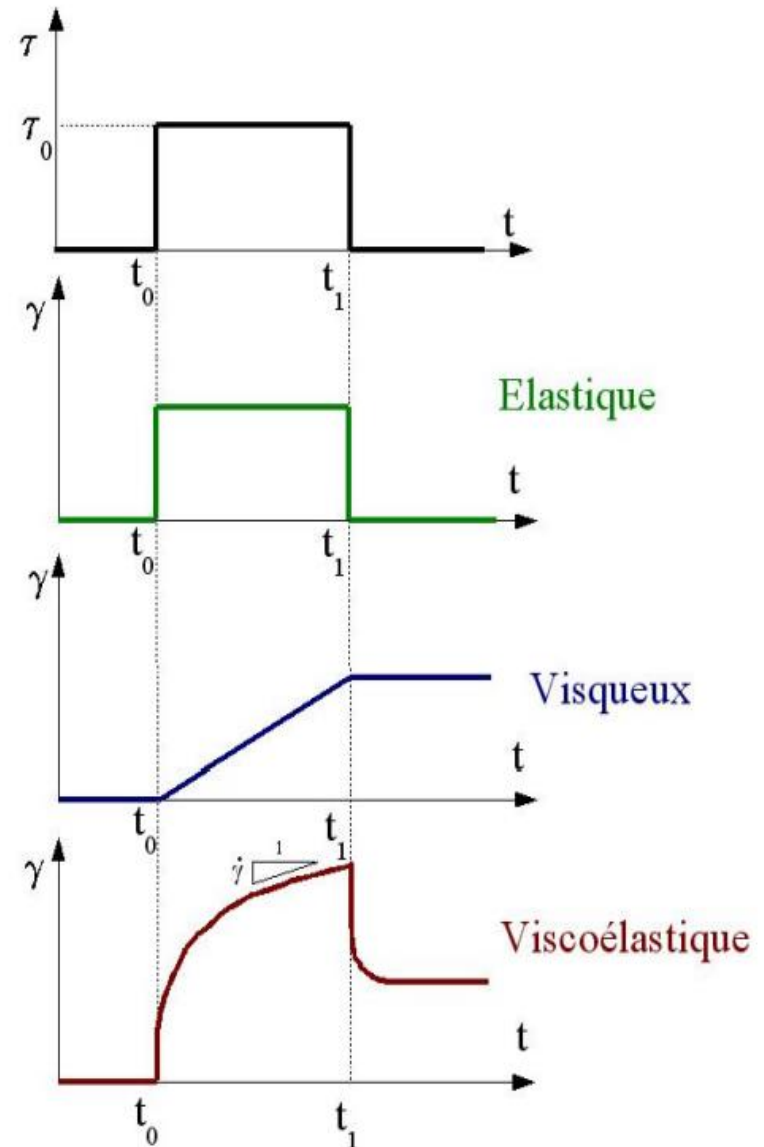


## ii. Rappels:

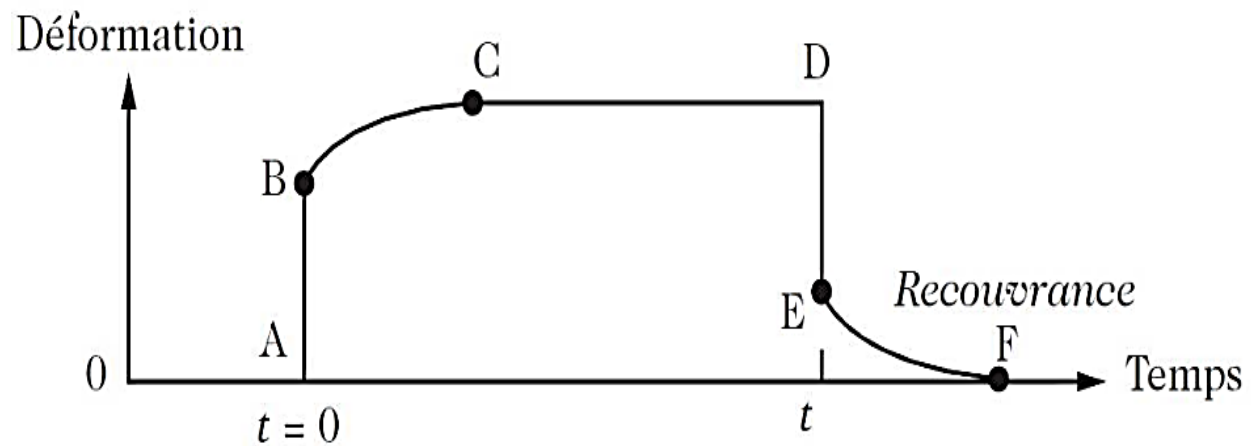
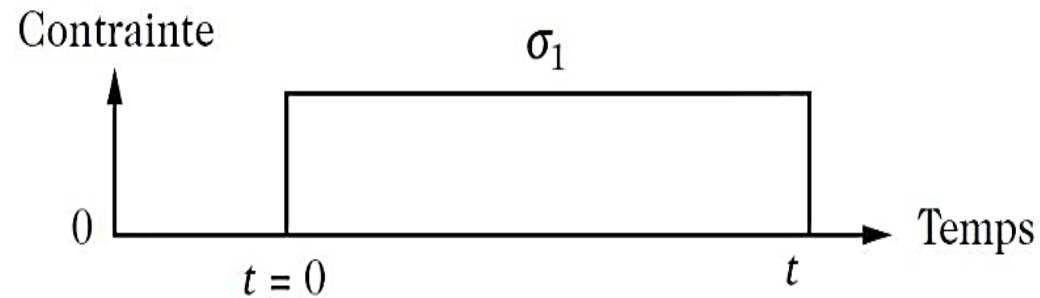
1. **Matériau élastique** : matériau qui se déforme lorsqu'il est contraint, et retourne rapidement à son état d'origine une fois la contrainte retirée
2. **Matériau visqueux** : c'est un matériau qui résiste bien à un écoulement en cisaillement et présentent une déformation qui augmente linéairement avec le temps lorsqu'une contrainte est appliquée ;
3. **La viscosité** est l'état d'un fluide qui présente une résistance au mouvement d'un fluide. Elle s'oppose à son écoulement. Elle diminue son énergie du fluide. On distingue la viscosité dynamique, la viscosité cinématique, élongationnelle, la viscosité de volume (seconde viscosité), ...
4. **En mécanique la viscosité** est « Propriété d'une substance dans laquelle les contraintes mécaniques dépendent des vitesses de déformation »

### iii. Comportement viscoélastique

- Le comportement viscoélastique est un type de comportement mécanique des matériaux qui combine des propriétés visqueuses et élastiques.
- Cela signifie que ces matériaux présentent à la fois une capacité à se déformer et à revenir à leur forme d'origine (comme un matériau élastique) et une réponse dépendante du temps à une contrainte (comme un matériau visqueux).
- Le comportement viscoélastique est souvent observé dans les polymères, les matériaux biologiques, et certains métaux à des températures élevées.

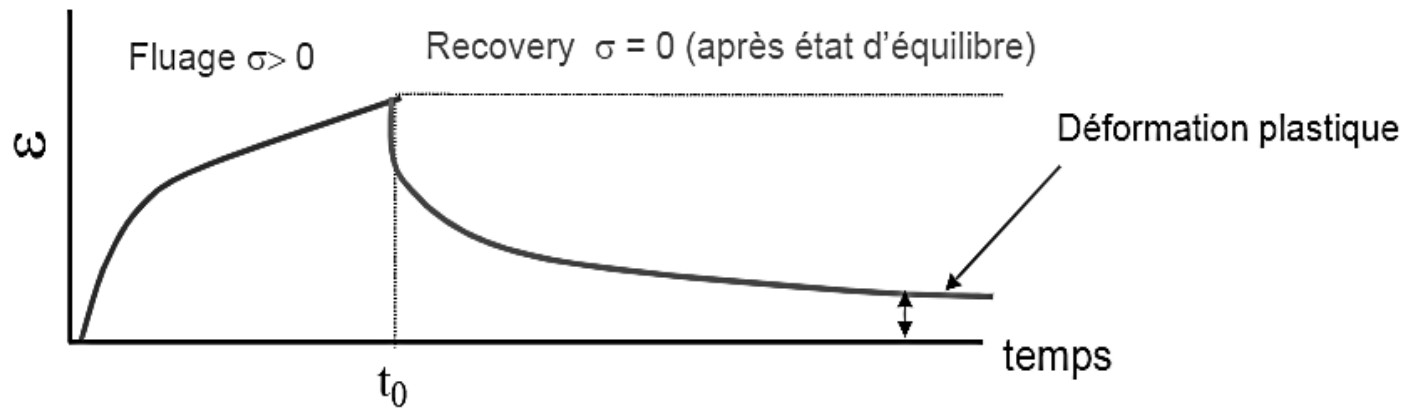


- Réponse typique d'un solide viscoélastique à l'application rapide d'une contrainte et à son relâchement après un temps  $t$



## ✕ Réponse du matériau viscoélastique réel

- ✕ Déformation croissante sous charge (fluage)
- ✕ Déformation décroissante à la décharge (recouvrance)



*la vitesse de déformation décroît dans les premiers temps puis atteint un stade stationnaire*

*le fluide viscoélastique se "détend" et atteint éventuellement un équilibre fonction de la déformation max atteinte*

- Exemple 01 : Pâte à modeler

Un exemple courant de comportement viscoélastique est la pâte à modeler.

- Lorsque vous appliquez une force pour la déformer :
  - a. la pâte à modeler va s'étirer et prendre une nouvelle forme.
  - b. Cependant, elle ne reviendra pas exactement à sa forme d'origine comme le ferait un matériau purement élastique.
- Au fil du temps, la pâte à modeler peut également s'écouler et adopter une forme différente, montrant ainsi des caractéristiques visqueuses.

- Exemple 01 : caoutchouc

Un autre exemple peut être trouvé dans certains polymères, tels que le caoutchouc, qui peut présenter un comportement viscoélastique en fonction de la température et du temps. Ces matériaux peuvent être déformés de manière élastique jusqu'à un certain point, après quoi ils peuvent commencer à montrer des caractéristiques visqueuses, se déformant de manière permanente.

## **b. Caractéristiques clés du comportement viscoélastique**

Les caractéristiques clés du comportement viscoélastique comprennent des propriétés élastiques et visqueuses combinées, une déformation dépendante du temps, une dépendance à la fréquence, et la présence de modules de stockage et de perte.

- a. Élasticité : Les matériaux viscoélastiques présentent une composante élastique, ce qui signifie qu'ils peuvent subir une déformation réversible sous l'application d'une contrainte. Lorsque la contrainte est supprimée, le matériau revient à sa forme d'origine.
- b. Viscosité : En plus de l'élasticité, les matériaux viscoélastiques montrent une composante visqueuse, ce qui signifie qu'ils ont la capacité de s'écouler et de présenter une déformation permanente sous l'effet d'une contrainte prolongée.



c. Réponse Dépendante du Temps : La déformation d'un matériau viscoélastique dépend du temps pendant lequel la contrainte est appliquée. Cela se manifeste par des phénomènes de relaxation et de fluage. La relaxation viscoélastique implique une décroissance de contrainte avec le temps sous une déformation constante.

d. Dépendance à la Fréquence : Les matériaux viscoélastiques montrent une dépendance à la fréquence, ce qui signifie que leur comportement peut varier en fonction de la fréquence à laquelle la contrainte est appliquée. Cette propriété est souvent étudiée à l'aide d'essais de rhéologie dynamique.

- a. Modules de Stockage et de Perte : Les propriétés viscoélastiques sont souvent caractérisées par deux modules : le module de stockage ( $G'$ ), qui représente l'énergie élastiquement stockée dans le matériau, et le module de perte ( $G''$ ), qui représente l'énergie dissipée sous forme de chaleur pendant la déformation visqueuse.
- b. Hystérésis : L'hystérésis est observée dans le comportement viscoélastique, ce qui signifie qu'il peut y avoir une différence entre la déformation subie pendant l'application d'une charge et la déformation récupérée après la suppression de la charge.

a. Fluage (Creep) (contrainte imposée): Le fluage est la déformation continue qui se produit sous une contrainte constante. Les matériaux viscoélastiques peuvent présenter un comportement de fluage, entraînant une déformation permanente au fil du temps.

b. Relaxation : La relaxation viscoélastique est la diminution progressive de la contrainte sous une déformation constante. Cela se produit à des taux différents pour différentes classes de matériaux viscoélastiques.

## c. Essais de rhéologie dynamique des métaux

Les essais de rhéologie dynamique des métaux à des températures élevées sont souvent effectués pour comprendre :

- le comportement viscoélastique,
- viscoplastique,
- et la relaxation des contraintes à des conditions proches de celles rencontrées dans divers processus industriels,

tels que :

- la forge,
- le laminage à chaud,
- la trempe, etc.

*Ces essais  
permettent de  
caractériser la  
réponse mécanique  
des métaux dans des  
plages de  
température élevées*

Voici quelques méthodes couramment utilisées pour les essais de rhéologie dynamique des métaux à des températures élevées :

### 1. Essais de Compression Dynamique à Température Élevée :

- . Objectif : Étudier la réponse mécanique des métaux sous une charge périodique à des températures élevées.
- . Procédure : Application d'une force périodique à l'échantillon, mesure de la déformation résultante et de la phase en fonction du temps à des températures élevées.

## 2.Essais de Relaxation à Température Élevée :

- Objectif : Étudier la relaxation des contraintes dans les métaux à des températures élevées.
- Procédure : Application d'une contrainte constante à l'échantillon, mesure de la décroissance de la contrainte au fil du temps à des températures élevées.

### 3.Essais de Fluage à Température Élevée :

- Objectif : Étudier la déformation continue des métaux sous une contrainte constante à des températures élevées.
- Procédure : Application d'une contrainte constante à l'échantillon, mesure de la déformation progressive au fil du temps à des températures élevées.

#### 4. Essais de Traction Dynamique à Température Élevée :

- Objectif : Étudier la réponse mécanique des métaux à des températures élevées sous une charge périodique en traction.
- Procédure : Application d'une force périodique à l'échantillon en traction, mesure de la déformation résultante et de la phase en fonction du temps à des températures élevées.



## 5. Tests de Relaxation en Compression à Température Élevée :

- Objectif : Étudier la relaxation des contraintes dans les métaux sous compression à des températures élevées.
- Procédure : Application d'une contrainte constante à l'échantillon en compression, mesure de la décroissance de la contrainte au fil du temps à des températures élevées.

## 6. Tests de Torsion Dynamique à Température Élevée :

- Objectif : Étudier la réponse mécanique des métaux à des températures élevées sous une torsion périodique.
- Procédure : Application d'un couple périodique à l'échantillon, mesure de la déformation résultante et de la phase en fonction du temps à des températures élevées.

Ces essais fournissent des informations cruciales sur la manière dont les métaux réagissent mécaniquement à des conditions de température élevée, ce qui est essentiel pour :

- la compréhension des processus de transformation métallurgique,
- la conception des procédés de fabrication,
- et l'optimisation des propriétés mécaniques des produits finis.

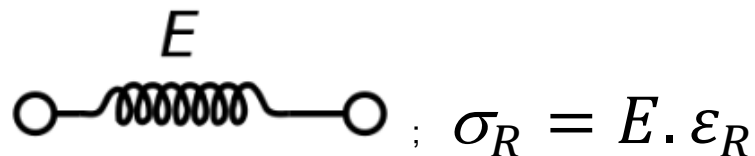
## **d. Modèles rhéologiques de la viscoélasticité des métaux et alliages**

- La viscoélasticité est un comportement mécanique des matériaux qui combine des propriétés visqueuses (écoulement sous contrainte) et élastiques (récupération après déformation).
- Pour étudier la viscoélasticité des métaux et alliages, on utilise des modèles rhéologiques qui décrivent mathématiquement le comportement viscoélastique de ces matériaux sous différentes conditions.
- Le modèle rhéologique est considéré comme un moyen de simulation du comportement d'un matériau en réponse à une sollicitation mécanique.

## i. Modèles élémentaires

- Ressort

Le comportement mécanique purement élastique est modélisé par un ressort. Ce modèle représente le solide hookéen donnée par la loi de Hooke.

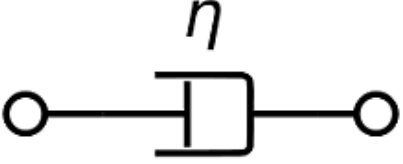


The diagram shows a horizontal spring with a coiled center and straight ends, connected to two small circles representing attachment points. Above the spring is the letter  $E$ . To the right of the spring is a semicolon followed by the equation  $\sigma_R = E \cdot \varepsilon_R$ .

$$E ; \sigma_R = E \cdot \varepsilon_R$$

Ressort : Modèle analogique d'un solide hookéen (élastique).  $E$  module d'élasticité

Amortisseur : le comportement mécanique d'un fluide purement visqueux newtonien est modélisé par un amortisseur. Ce modèle représente les fluides visqueux qui répondent à la loi de Newton.


$$\sigma_A = \eta \cdot \frac{d\varepsilon_A}{dt} = \eta \cdot \dot{\varepsilon}_A$$

**Amortisseur** : Modèle analogique d'un fluide newtonien (visqueux).  $\eta$  : coefficient de viscosité

Voici quelques modèles rhéologiques couramment utilisés pour décrire la viscoélasticité des métaux et alliages :

1. Modèle de Maxwell :

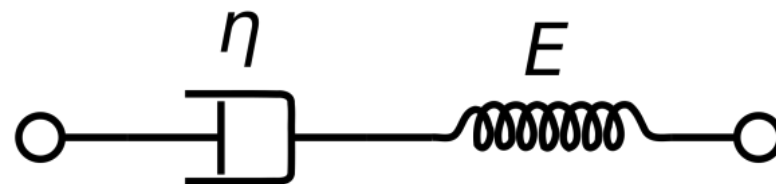
- Ce modèle suppose que le matériau est constitué d'un ressort (élément élastique) en parallèle avec un amortisseur (élément visqueux).
- L'équation qui décrit ce modèle est généralement exprimée comme une combinaison linéaire des déformations élastiques et visqueuses.

Dans ce modèle la contrainte appliquée et la déformation obtenue son donnée par :

$\sigma_{Total} = \sigma_A = \sigma_R = \sigma$  (la contrainte aux borne des deux éléments est identique)

$\varepsilon_{Total} = \varepsilon_A + \varepsilon_R \dots (*)$  (Répartition de la déformation)

Ce modèle est alors représenté schématiquement par un ressort en série avec un amortisseur :



Modèle de Maxwell.



Par dérivation :

$$\frac{d\varepsilon_{Total}}{dt} = \frac{d\varepsilon_A}{dt} + \frac{d\varepsilon_R}{dt}$$

Alors :

$$\frac{d\varepsilon_{Total}}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt}$$

Donc :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta}$$

on aura :

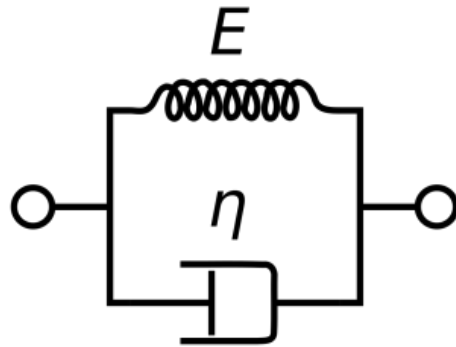
$$\eta \cdot \dot{\varepsilon} = \frac{\eta}{E} \cdot \dot{\sigma} + \sigma = \tau \cdot \dot{\sigma} + \sigma ;$$

c'est l'équation de maxwell

$\tau$  : temps de relaxation

## 2. Modèle de Kelvin-Voigt (ou modèle de Kelvin ou modèle de Voigt) :

- Il est souvent utilisé pour décrire le comportement viscoélastique à des échelles de temps plus longues que le modèle de Maxwell.
- C'est modèle proposé (imaginé) par Woldemar Voigt et William Thomson (Lord Kelvin)
- Le modèle est représenté par un amortisseur purement visqueux en parallèle avec un ressort hookéen. Ils supposent que la déformation du ressort égale la déformation de l'amortisseur.



$$\begin{aligned}\varepsilon_{Total} &= \varepsilon_A = \varepsilon_R \\ \sigma_{Total} &= \sigma_A + \sigma_R\end{aligned}$$

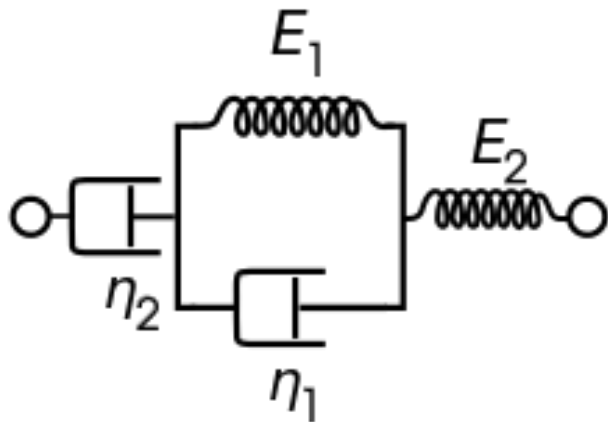
Alors :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon(t) + \eta \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

### 3. Modèle de la loi puissance (ou modèle de Burgers) :

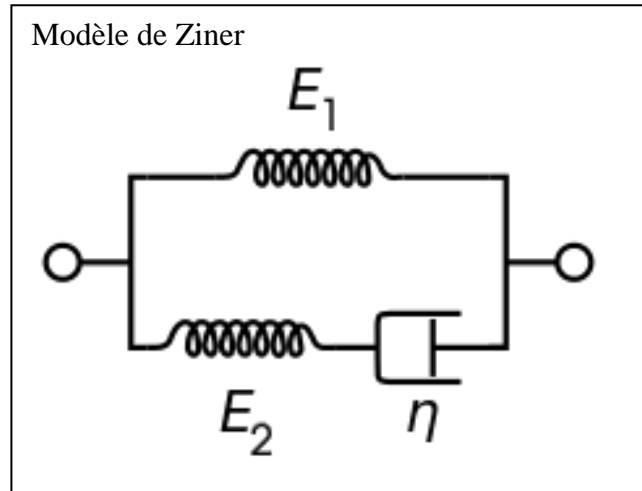
- Ce modèle étend le modèle de Kelvin-Voigt en ajoutant plusieurs éléments élastiques et visqueux en série.
- Il est capable de représenter des comportements viscoélastiques plus complexes.

Modèle de Burgers



#### 4. Modèle de Zener (ou modèle de Zener-Wiechert) :

- Il combine plusieurs éléments ressort-amortisseur en parallèle.
- Ce modèle est souvent utilisé pour décrire les comportements viscoélastiques à différentes échelles de temps.



## 3 - 5. Comportement viscoplastique

### a. Définition

**La viscoplasticité** est la propriété de matériaux qui présentent des caractéristiques à la fois visqueuses et plastiques, lorsqu'ils subissent une déformation.

La viscoplasticité prend en compte le fait que la déformation d'un matériau peut dépendre non seulement de la contrainte appliquée, mais aussi du temps pendant lequel cette contrainte est maintenue.

Certains matériaux, tels que les métaux à haute température ou les polymères viscoélastiques, présentent des comportements viscoplastiques.

## **b. Modèles rhéologiques de la viscoplasticité des métaux et alliages**

En ingénierie et en sciences des matériaux, la modélisation de la viscoplasticité est souvent réalisée à l'aide de lois constitutives qui décrivent mathématiquement le comportement du matériau sous différentes conditions de contrainte, de température et de temps.

Ces modèles sont utilisés pour prédire le comportement à long terme des matériaux dans des applications spécifiques, telles que la conception de structures soumises à des charges variables au fil du temps.

Remarque :

Il est important de noter que ces modèles sont des simplifications et des approximations du comportement réel des matériaux. Le choix du modèle dépend souvent des caractéristiques spécifiques du matériau étudié et des conditions auxquelles il est soumis. Les chercheurs et les ingénieurs ajustent souvent les paramètres de ces modèles pour mieux correspondre aux résultats expérimentaux.



Nous donnons quelques modèles :

## 1. Modèle de Johnson-Cook :

- Définition

Ce modèle est une équation constitutive spécifiquement utilisé pour modéliser le comportement visco-plastique des métaux à haute température et sous des contraintes élevées.

Cette équation est appelée aussi la loi thermo-élasto-viscoplastique

- Conditions d'utilisation

Le modèle de Johnson-Cook utilisé pour modéliser le comportement des métaux à

- des taux de déformation élevés
- et à des températures élevées,

- Objectifs

Prédiction de la déformation plastique, la fragmentation, et d'autres réponses mécaniques sous des charges dynamiques.

- Le modèle tient compte:

- du durcissement isotrope,
- de la dépendance de la température
- et de la vitesse de déformation.

- L'équation constitutive de Johnson-Cook est:

$$\sigma = [A + B\epsilon^n][1 + C \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)][1 - (T - T_0)/(\Theta_m - T_0)]$$

où :

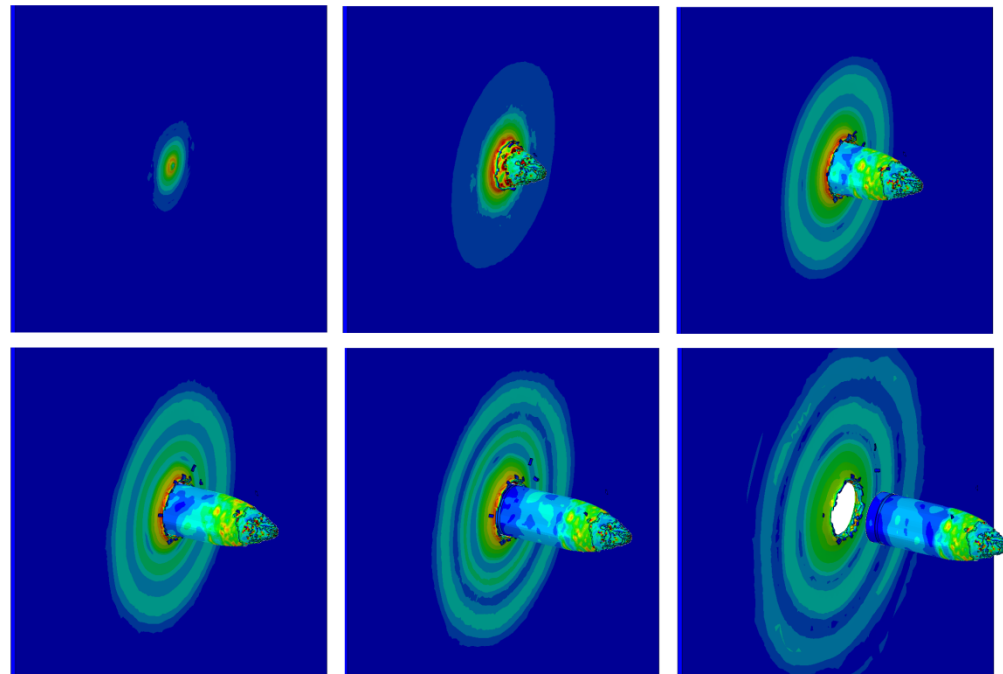
- $\sigma$  est la contrainte équivalente,
- $\epsilon$  est la déformation équivalente,
- $\dot{\epsilon}$  est la vitesse de déformation,
- $T$  est la température,
- $A, B, C, n, \dot{\epsilon}_0, T_0$ , et  $\Theta_m$  sont des paramètres matériaux dépendants.

Les termes dans cette équation comprennent des corrections pour la déformation plastique ( $A + B\epsilon^n$ ), la dépendance de la vitesse de déformation ( $1 + C \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)$ ), et la sensibilité à la température ( $1 - (T - T_0)/(\Theta_m - T_0)$ ). Les paramètres du modèle doivent être déterminés expérimentalement pour chaque matériau spécifique.

- $A$ ,  $B$ , et  $n$  sont des paramètres liés au durcissement plastique,
- $C$  est un paramètre lié à la viscosité,
- $\dot{\epsilon}_0$  est la vitesse de déformation de référence,
- $T_0$  est la température de référence,
- $\Theta_m$  est la température de fusion.

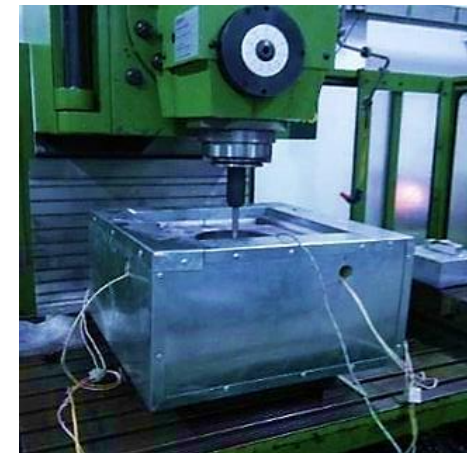
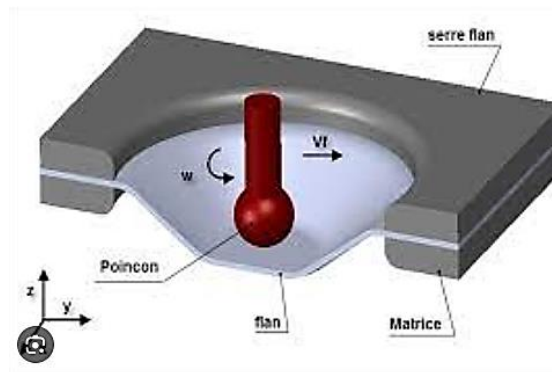
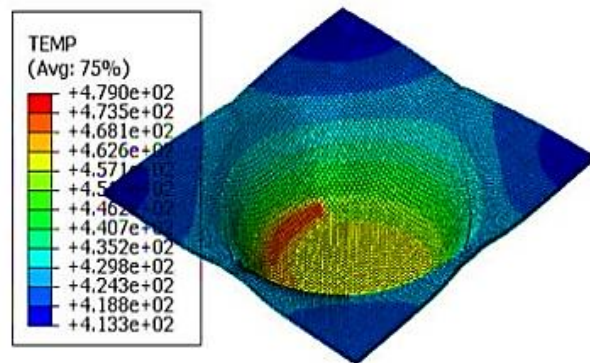
- Exemples d'utilisation

- Simulation d'impact balistique : Le modèle de Johnson-Cook est fréquemment utilisé pour simuler le comportement des matériaux métalliques soumis à des impacts balistiques. Il peut prédire la déformation plastique et la fragmentation.



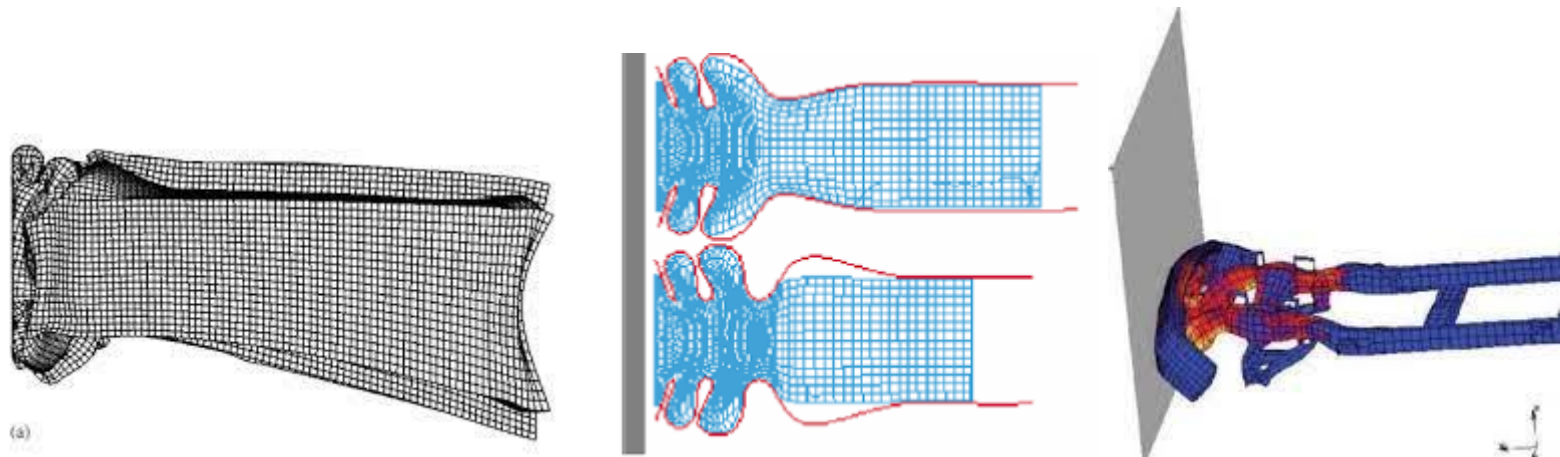
- Formage à chaud : ce modèle est utilisé pour représenter le comportement plastique des métaux dans les conditions de formage à chaud.

Lors de processus de formage à chaud, les métaux subissent des déformations importantes et sont souvent exposés à des températures élevées.



Modélisation de la loi thermo-élasto-viscoplastique  
par le modèle de Johnson-Cook.

- Étude de la déformation à grande vitesse : Pour les applications nécessitant une analyse de la déformation à grande vitesse, comme les accidents de véhicules ou les explosions, le modèle de Johnson-Cook peut être appliqué pour tenir compte du comportement non linéaire et dépendant du temps des matériaux.



<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQiEFuXBqgBPnH1pD43Wy3h3LuSZLopUnLDDSLpFXeTeShsrKKWFaabzFXiEwSrt0gk&usqp=CAU>  
[https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ2mxFnZAHF\\_vBKM9yUdKIgD9uQEBQEI2d5I3KAItvivolxftslE2Xls5YcHOlz4epb-bF&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ2mxFnZAHF_vBKM9yUdKIgD9uQEBQEI2d5I3KAItvivolxftslE2Xls5YcHOlz4epb-bF&usqp=CAU)  
<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSXXzVF5b444Uzn8ig1AqLN0kLPHOSnICyINMrYX1uztSlyUHLT8hYxy-Zdq7favYj8S0&usqp=CAU>

- Formage à chaud : Lors de processus de formage à chaud, les métaux subissent des déformations importantes et sont souvent exposés à des températures élevées. Le modèle de Johnson-Cook est utilisé pour représenter le comportement plastique des métaux dans ces conditions.





- Métallurgie des poudres : Lors de la modélisation des procédés de métallurgie des poudres, où la consolidation des poudres métalliques est effectuée à des températures élevées et sous des charges importantes, le modèle de Johnson-Cook peut être appliqué pour représenter le comportement des matériaux.

## 2.Modèle de Voce :

- Il est utilisé pour décrire le comportement visco-plastique des métaux à différentes températures et vitesses de déformation.
- Il est souvent appliqué à des métaux qui présentent un comportement anisotrope, c'est-à-dire des propriétés mécaniques qui varient en fonction de la direction dans le matériau.
- Ce modèle est particulièrement utile pour représenter le comportement des matériaux lorsqu'ils subissent une déformation plastique importante.

- L'équation constitutive de Voce est :

$$\sigma = \sigma_0 + A \exp \left( -B \left( 1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) \right)$$

où :

- $\sigma$  est la contrainte équivalente,
- $\sigma_0$  est la contrainte de base,
- $A$  et  $B$  sont des paramètres matériels,
- $\epsilon$  est la déformation équivalente, et
- $\epsilon_0$  est une déformation de référence.

Les paramètres du modèle ( $A$ ,  $B$ ,  $\sigma_0$ , et  $\epsilon_0$ ) sont généralement déterminés à partir de données expérimentales, telles que des essais de traction uniaxiale à différentes conditions de déformation.

