

## 1 - DEFINITIONS ET HYPOTHESES DE LA RESISTANCE DES MATERIAUX

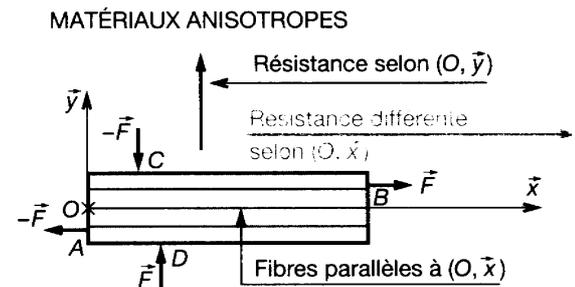
La résistance des matériaux est l'étude de la résistance et de la déformation des solides (arbres de transmission, bâtiments, fusées, . .) dans le but de déterminer ou de vérifier leurs dimensions afin qu'ils supportent les charges dans des conditions de sécurité satisfaisantes et au meilleur coût (optimisation des formes, des dimensions, des matériaux. . .)

### Homogénéité :

on admet que les matériaux ont les mêmes propriétés mécaniques en tous points.

### L'isotropie :

on admet que les matériaux ont, en un même point, les mêmes propriétés mécaniques dans toutes les directions, L'isotropie est vérifiée pour les aciers non fibrés (les aciers laminés et forgés ne sont pas isotropes), Elle n'est pas vérifiée pour les matériaux fibrés (bois, matériaux composites...).



### Contraintes (unité :MPa)

Elles caractérisent les actions mécaniques de cohésion qui existent entre les grains de matière.

### Déformations

Elles résultent et varient avec les charges appliquées sur les objets, Elles sont mises en évidence par la variation des dimensions, et peuvent être élastiques ou plastiques.

### Elasticité

Elle caractérise l'aptitude qu'a un matériau à reprendre sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé. Un ressort chargé normalement a un comportement élastique.

### Plasticité

Un matériau qui ne reprend pas sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé est dit plastique. La pâte à modeler a un comportement plastique.

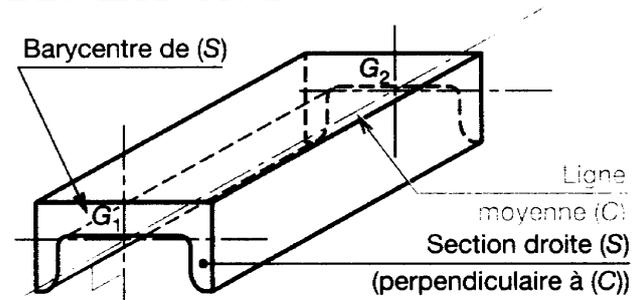
### Poutres :

Une poutre est engendrée par une section droite et plane (S) dont le barycentre G se déplace sur une ligne courbe (C), à grand rayon de courbure, appelée ligne moyenne. La section droite (S) reste perpendiculaire à (C).

Les solides idéaux sont des poutres présentant:

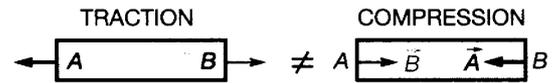
- des sections droites constantes ou variables lentement en dimensions et en forme
- des dimensions longitudinales importantes par rapport aux dimensions transversales

### EXEMPLE DE POUTRE



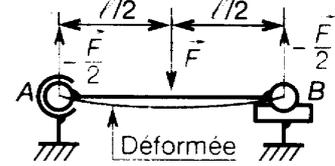
Les actions mécaniques

Les actions mécaniques, appliquées en un point, sont des vecteurs glissants. Il est impossible de les remplacer par un système d'actions mécaniques "vectoriellement" équivalent (même résultante et même moment en un point A) car les effets physiques (solllicitations) sont différents.



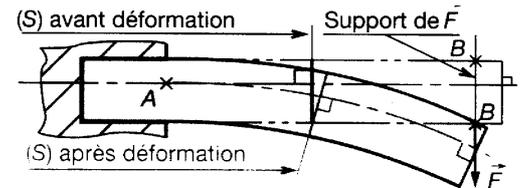
Hypothèses sur l'influence des déformations

Dans le domaine élastique, les déformations sont très faibles, elles ne modifient pas les actions mécaniques calculées par la statique (hypothèse des solides indéformables).



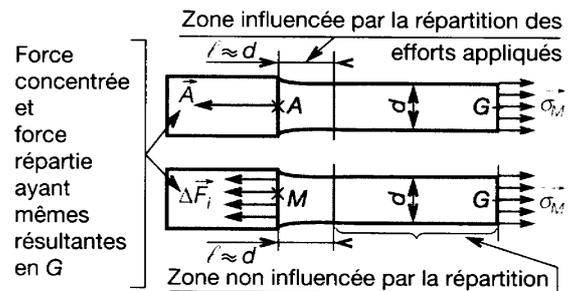
Hypothèse de Navier-Bernoulli

Les sections planes et droites (normales à la ligne moyenne) avant déformation, restent planes et droites après déformation (normales à ligne moyenne déformée).



Hypothèse de Barré de Saint-Venant

Dans une section droite (S) éloignée de la zone où les charges sont appliquées ( $l > d$ ), la répartition des déformations et des contraintes ne dépend que des éléments de réduction du torseur des actions mécaniques appliquées.



Dans une section droite (S) proche de la zone où les charges sont appliquées ( $l < d$ ), la répartition des déformations et des contraintes dépend de la répartition des charges appliquées.

**2 - LES ESSAIS**

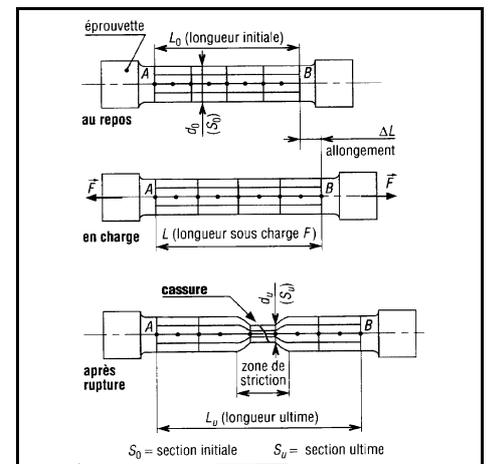
Effectués en laboratoire ou sur le terrain, ils apportent des renseignements précis et fiables sur les performances d'un matériau. Il en existe un grand nombre qui sont réglementés par des normes internationales pour la plupart.

Principaux essais :

- Essais mécaniques (traction, dureté, résilience, fatigue, fluage. . .).
- Essais pour la productivité (emboutissage, pliage, usinabilité...).
- Essais sur les surfaces (abrasion, rayures, rugosité, adhérence. . .).
- Essais sur les fluides (viscosité, écoulements. , ,).

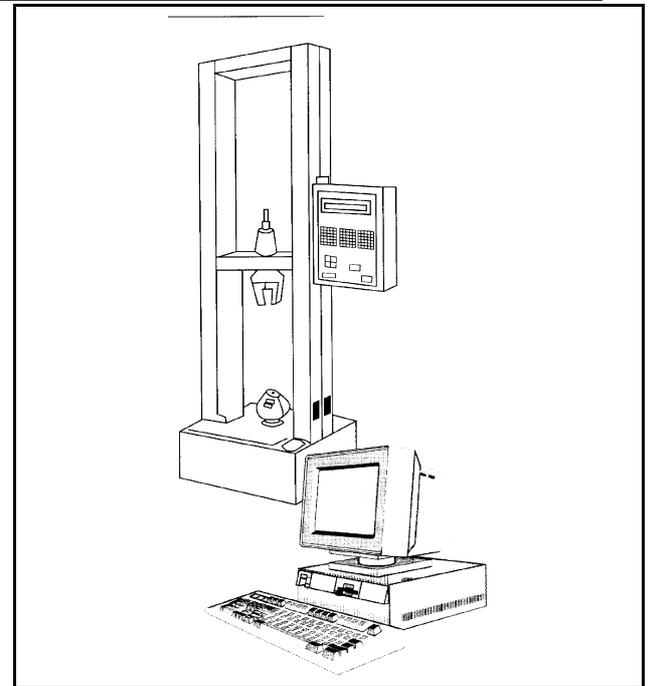
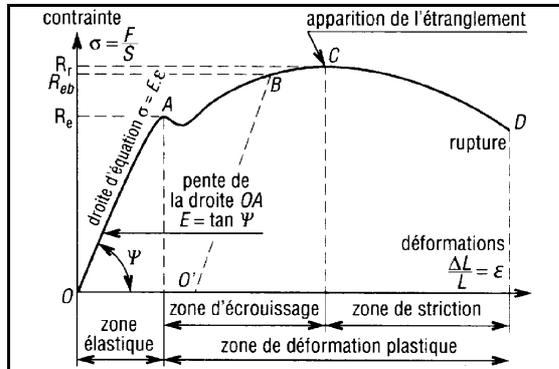
2-1 - ESSAI DE TRACTION

Essai le plus classique, il consiste à exercer sur une éprouvette normalisée (pièce de dimensions normalisées fabriquée dans le matériau à tester), cylindrique ou parallélépipédique (plate), deux actions mécaniques et opposées qui vont la déformer progressivement puis la rompre.



2-1-1- Courbes de contraintes et déformation

Pour un grand nombre de matériaux, comme les alliages, les courbes obtenues présentent une zone, appelée domaine élastique où le graphe est une droite (segment OA). Pour tous les points de cette droite, la déformation (ou l'allongement) est proportionnelle à la contrainte et le matériau est élastique.



Module d'élasticité longitudinale E (N / mm<sup>2</sup>)

Il caractérise la pente de la droite de proportionnalité précédente et l'élasticité du matériau testé. Plus E est grand, plus le matériau est rigide et inversement.

Exemples : acier = 200000 N / mm<sup>2</sup> . élastomères = 1 N / mm<sup>2</sup> .

Loi de Hooke (δ = E )

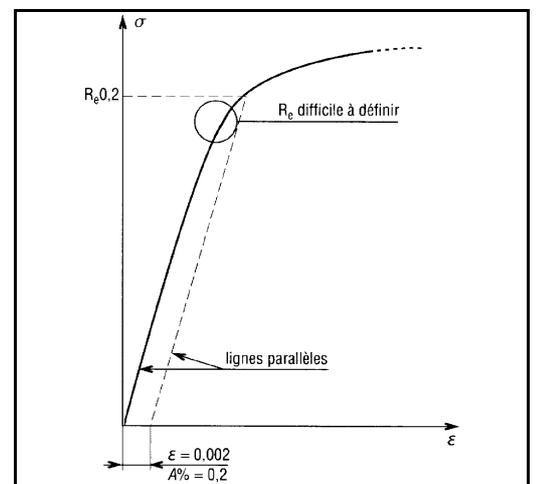
Cette loi, ou équation de la droite OA, traduit la proportionnalité précédente (δ en N / mm<sup>2</sup>, E en N / mm<sup>2</sup> et \_ sans unité).

Limite élastique Re (N / mm<sup>2</sup>)

Elle marque la fin du domaine élastique (au point A). Pour les valeurs supérieures le matériau ne se déforme plus élastiquement mais plastiquement (l'éprouvette ne retrouve plus ses dimensions initiales après "déchargement", il subsiste un allongement permanent).

2-1-2 Limite conventionnelle d'élasticité Re 0,2 (N / mm<sup>2</sup>)

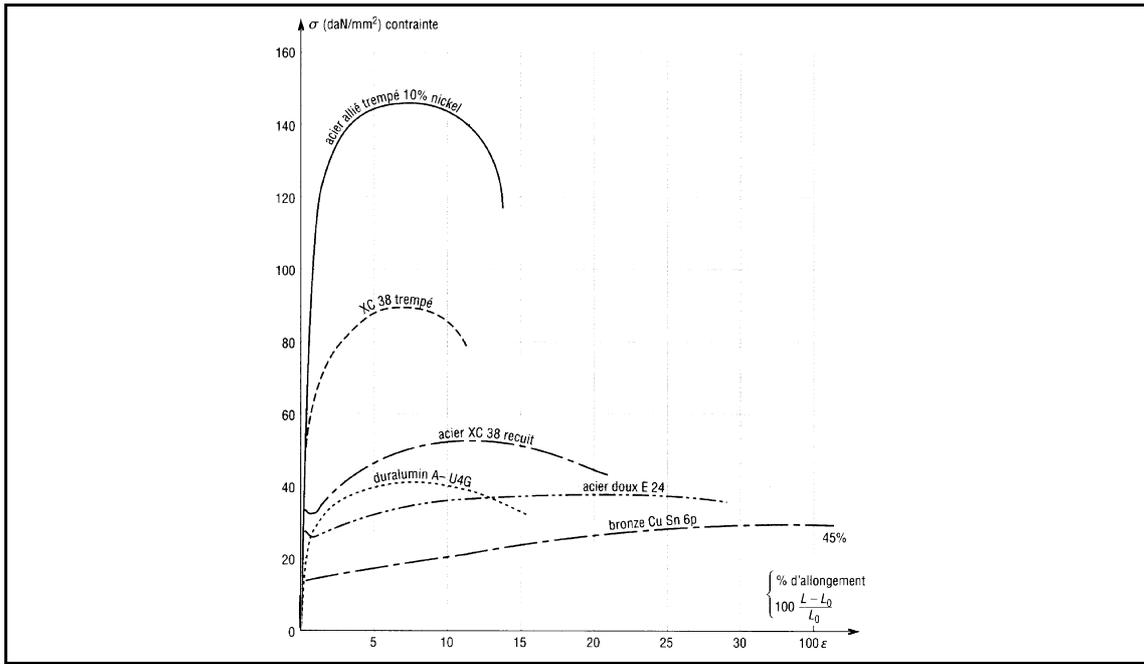
Variante de la précédente (Re), elle tient compte des imprécisions de la mesure, c'est à-dire des imperfections de la droite OA et des appareils de mesure. Pour la mesure de Re on tolère une légère déformation permanente de 0,2% (A% = 0,2).



2-1-3 Phénomène d'écroutissage

Surtout employé en compression, il permet d'augmenter la limite élastique Re sans modifier la résistance à la rupture Rr.

Dans un premier temps le matériau est déformé plastiquement (avant point de striction, chemin OA). Au relâchement le "déchargement" se fait suivant la droite BO' parallèle à OA . Après remise en charge, la nouvelle courbe caractéristique du matériau est devenu O'BC avec Reb comme nouvelle limite élastique.



Courbes de traction de divers matériaux

**2-2- ESSAI DE RESILIENCE**

La résilience, de symbole général K, caractérise la capacité d'un matériau à absorber les chocs sans se rompre ; ce risque est amplifié aux basses températures. Elle est mesurée sur des machines du type Charpy (éprouvette sur deux appuis) ou Izod (éprouvette encastrée).

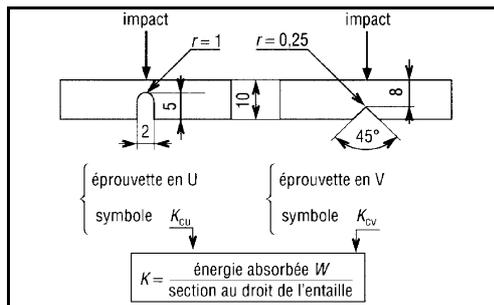
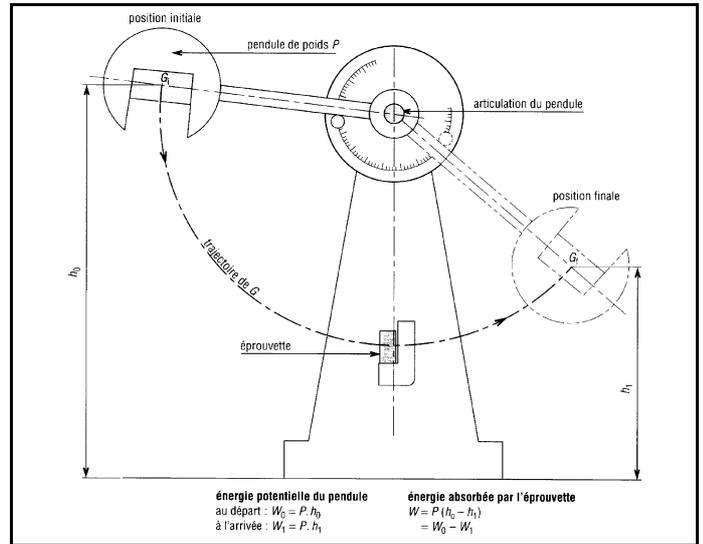
L'essai, qui est un essai comparatif entre matériaux, mesure l'énergie qu'il faut fournir à un pendule pesant pour briser une éprouvette entaillée du matériau à tester.

L'énergie absorbée par l'éprouvette (W) est égale à la différence des énergies potentielles du pendule entre le début ( $W_0 = P \cdot h_0$ ) et l'arrivée ( $W_1 = P \cdot h_1$ ) :

$$W = P \cdot h_0 - P \cdot h_1 = P (h_0 - h_1)$$

La résilience est égale au rapport de W sur l'aire de la section au droit de l'entaille.

Deux cas : Kcu et Kcv.



## 2-3- ESSAI DE DURETE

La dureté, de symbole général H, caractérise la capacité d'un matériau à résister au marquage (empreintes, rayures. . .), à l'usure et à l'érosion.

Elle peut être évaluée en mesurant une empreinte laissée en surface par un poinçon agissant sous l'action d'une force connue (essais Brinell, Vickers et Rockwell) mais aussi par une hauteur de rebondissement d'un objet très dur sur la surface à tester (essai Shore pour élastomères et plastiques).

### 2-3-1 Dureté Brinell (symbole HB)

Elle est obtenue par calcul. Après essai, on mesure l'empreinte laissée par une bille polie (diamètre : 1-2,5-5-10 mm) et la valeur de la charge F appliquée pour obtenir cette empreinte (essai usuel :  $F = 3\,000$  daN,  $d = 10$  mm, pendant 15 à 60 secondes). Utilisation : tous métaux 2-3-2 Dureté Vickers (symbole HV)

Elle est obtenue par calcul ; le principe est identique au précédent mais avec une pyramide droite en diamant à base carrée dont l'angle au sommet est de  $136^\circ$ . Utilisation : tous métaux.

Variante : essai Knoop (microdureté, empreinte en forme de losange, matériaux durs pour petites pièces et fines sections).

### 2-3-3 Dureté Rockell (symbole HR)

C'est l'essai de dureté le plus connu mondialement. Dans ce cas, la dureté, contrairement à Brinell et Vickers, est obtenue par lecture directe d'une longueur d'enfoncement d'un pénétrateur bille acier ou cône diamant.

Une précharge ( $F_0$ ) permet de faire une empreinte initiale et, par là, d'éliminer les incertitudes propres aux défauts de la surface.

## 3- ESSAI DE FLUAGE

La déformation continue des objets, avec le temps, sous l'action d'efforts appliqués constants est appelé fluage.

L'essai de fluage est un essai de traction, à chaud ou non, souvent de très longue durée (milliers d'heures).

La rupture par fluage se produit, après un temps long, sous des charges constantes bien inférieures à limites usuelles du matériau ( $R_r$  ou  $R_e$ ).

Ce phénomène est observé dans les systèmes travaillant pendant de longues durées (10, 20 ans...) ou dans les machines travaillant à températures élevées, comme les chaudières, les moteurs d'avion ou les aubes de turbine.

La chaleur accentue fortement le phénomène. Certains matériaux (matières plastiques. . .) sont sensibles au fluage à température ambiante.

## 4- ESSAI DE FATIGUE OU D'ENDURANCE

### 4-1- Phénomène de fatigue

Il est de première importance sur les structures d'avions et dans de nombreux autres domaines (roulements, engrenages, arbres de transmission. . .). Une roue de voiture mal équilibrée est un exemple de système soumis à un phénomène de fatigue ; un effet de résonance peut l'amplifier.

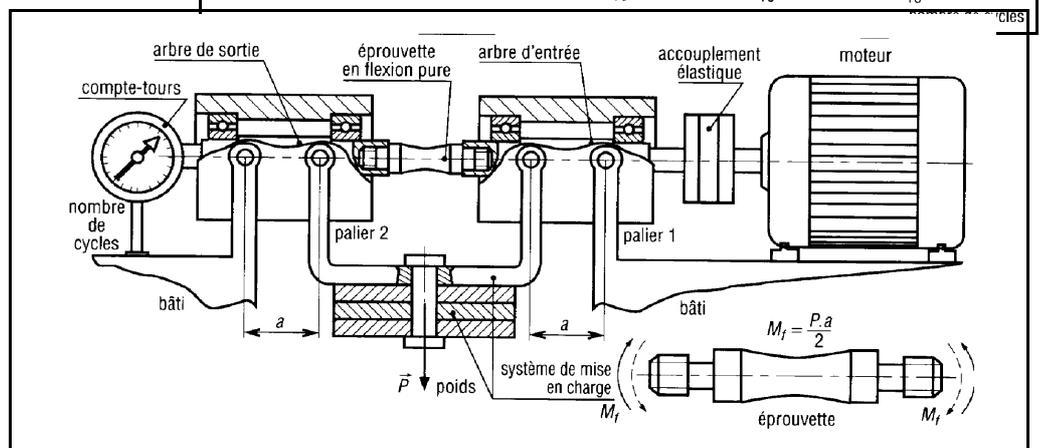
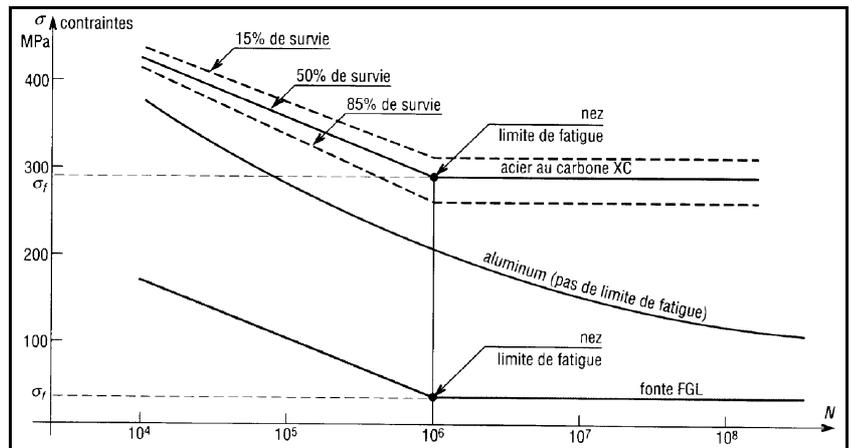
La rupture peut se produire, après un certain nombre de cycles ou allers et retours, sous des efforts bien inférieurs aux limites usuelles du matériau ( $R_r$  et  $R_e$ ).

### 4-2- Essai de fatigue

C'est un essai statistique dans la mesure où des éprouvettes identiques, sous les mêmes conditions d'essai, donnent des résultats différents. Il y a une répartition statistique des résultats autour d'une valeur moyenne ou médiane. Cette valeur moyenne, une fois déterminée est choisie comme représentative de la capacité du matériau (analogie avec la durée de vie des roulements).

Il y a trois types d'essais de fatigue : traction compression, torsion alternée et flexion alternée (le plus classique), l'éprouvette est soumise à un couple de flexion pure alternée  $M_f$ .

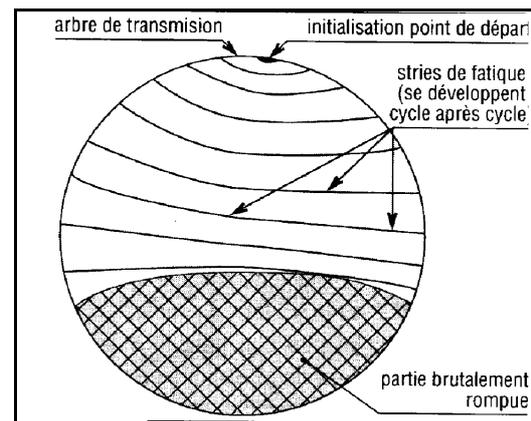
d'endurance Courbes



4-3- Mode de rupture

Les fissures de fatigue démarrent à partir des imperfections en surface : rayures, empreintes, stries d'usinage, arête de filetage, hétérogénéité due au traitement thermique, défauts du réseau cristallin. . . Après amorce, la fissure s'agrandit sous l'action des efforts alternés qui écartent et rapprochent continuellement les parties fissurées ; il y a un phénomène de concentration de contraintes en ces points.

La rupture définitive se produit brutalement lorsque les dimensions de la partie non encore fissurée ne sont plus suffisantes pour supporter les charges exercées.



5- LES VERNIS CRAQUELANTS

Projetés sur la surface à étudier comme un aérosol, ils sont utilisés pour localiser visuellement les zones les plus chargées et indiquer les directions principales des déformations.

Ils permettent de choisir les emplacements de collage des jauges de contraintes et leur orientation ; l'orientation des craquelures est toujours perpendiculaire à la direction de la déformation en traction la plus importante.

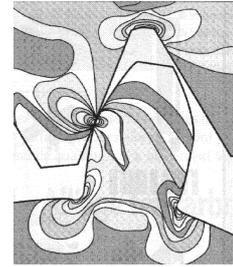
## 6- METHODES PHOTOELASTIQUES

Plus précises que les vernis craquelants, ces méthodes permettent des études plus détaillées sur les zones les plus chargées, les directions principales des déformations par exemple. Les résultats sont particulièrement intéressants près des formes amenant des concentrations de contraintes (trous, encoches, épaulements...).

Une matière plastique transparente est utilisée pour modéliser l'objet réel. Un système optique spécial (polariscope), permet d'observer des motifs colorés, interpréter et visualiser les zones contraintes. Il est ainsi possible, par dessins et essais successifs, d'améliorer la définition des objets.

Les pièces soumises à des vibrations ou des charges dynamiques peuvent être étudiées avec un système stroboscopique.

L'étude dans les trois dimensions est envisageable par tranches modèles 3D "figés".



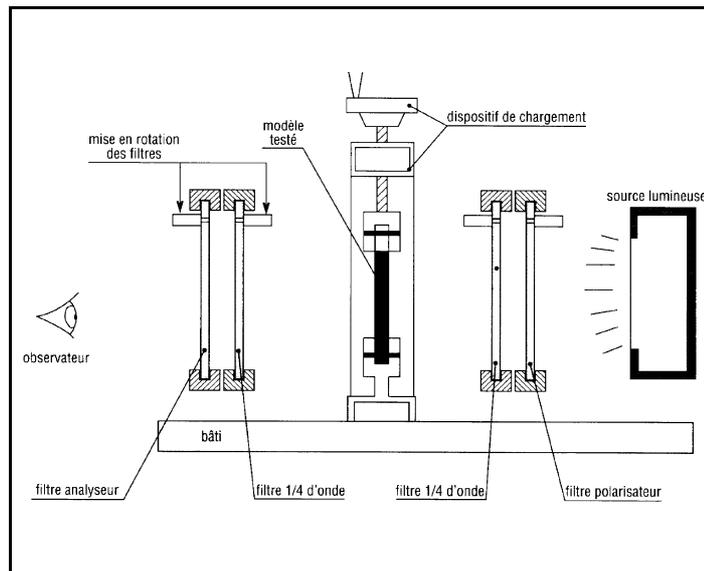
## 7- EXTENSOMETRIE

Elle est basée sur l'emploi de jauges de contraintes. C'est la méthode expérimentale la plus précise pour vérifier les résultats théoriques de contraintes, de déformations.

Les jauges sont collées sur la surface à étudier et mesurent les déformations. La déformation subie est transformée en variation de résistance par un pont de Wheatstone.

c'est le principe du pont de

contraintes sont ensuite obtenues par calcul à partir des lois de la résistance des matériaux ou élasticité.



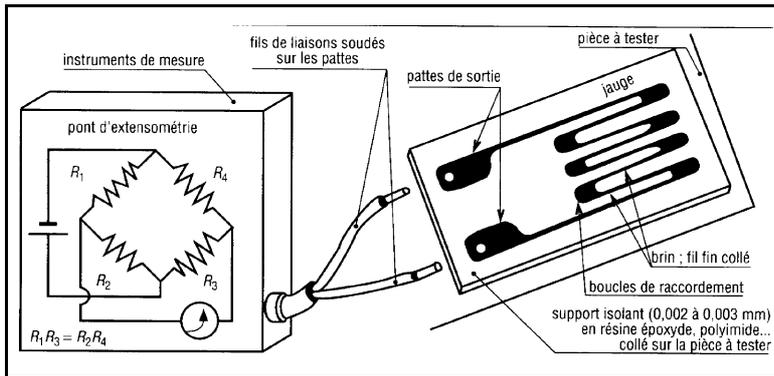
dimensions est découpées dans des

## ELECTRIQUE

des jauges de méthode usuelle pour vérifier (calculs de déformations. . .). la surface à étudier et en un point donné. transformée en électrique mesurée d'extensométrie : Wheatstone. Les

Jauges de contraintes :

sous l'effet d'un allongement la section du brin (fil) de la jauge diminue, il en résulte une variation de la résistance électrique du fil. En mesure, R1, est une jauge active collée sur la structure et R2, une jauge identique collée sur une pièce de même matière. R2, ne subit aucune contrainte et est à la même température que R1. Dans certains capteurs (forces, pressions, couples, déplacements...) on utilise généralement quatre jauges judicieusement disposées. Une jauge peut servir très longtemps, cependant il n'est pas possible de la décoller sans la détruire. Elles sont souvent fabriquées de la même manière que les circuits imprimés et sont disponibles dans plusieurs formes et dans de



nombreuses dimensions (0,1 mm à 10 cm et plus).

