



cetim

Innover
en mécanique



Séminaire GT7

Commission Fatigue - SF2M

*Effet des contraintes résiduelles
et des contraintes moyennes
sur la tenue en fatigue*

*d'analyses
Techniques des mesures
des contraintes
résiduelles et difficultés
associées*

Dr. Fabien Lefebvre

Cetim, Fatigue des composants mécaniques

Fabien.lefebvre@cetim.fr

Sommaire de la présentation

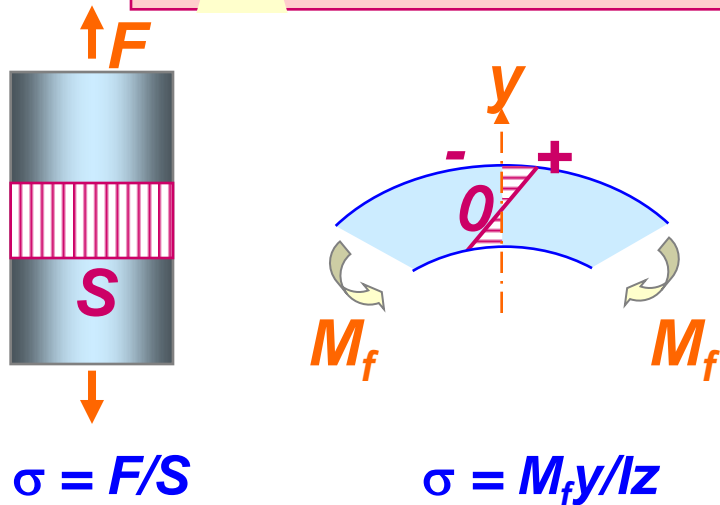
- Quelques définitions
- Pourquoi les évaluer ?
- Comment les évaluer ?

Les contraintes résiduelles : définition

1/4

Contraintes multiaxiales statiques auto-équilibrées existant dans un système isolé de température et en l'absence de tout chargement extérieur

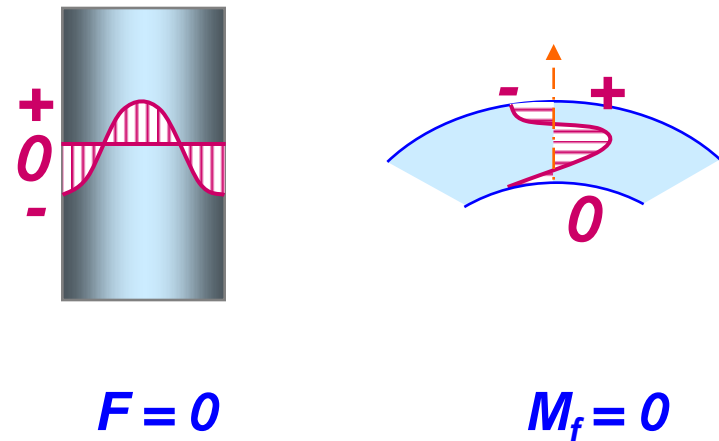
! *Contraintes de service \neq contraintes résiduelles*



$$\sigma = F/S$$

$$\sigma = M_f y / I_z$$

Contraintes de service



$$F = 0$$

$$M_f = 0$$

Contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles : définition

2/4

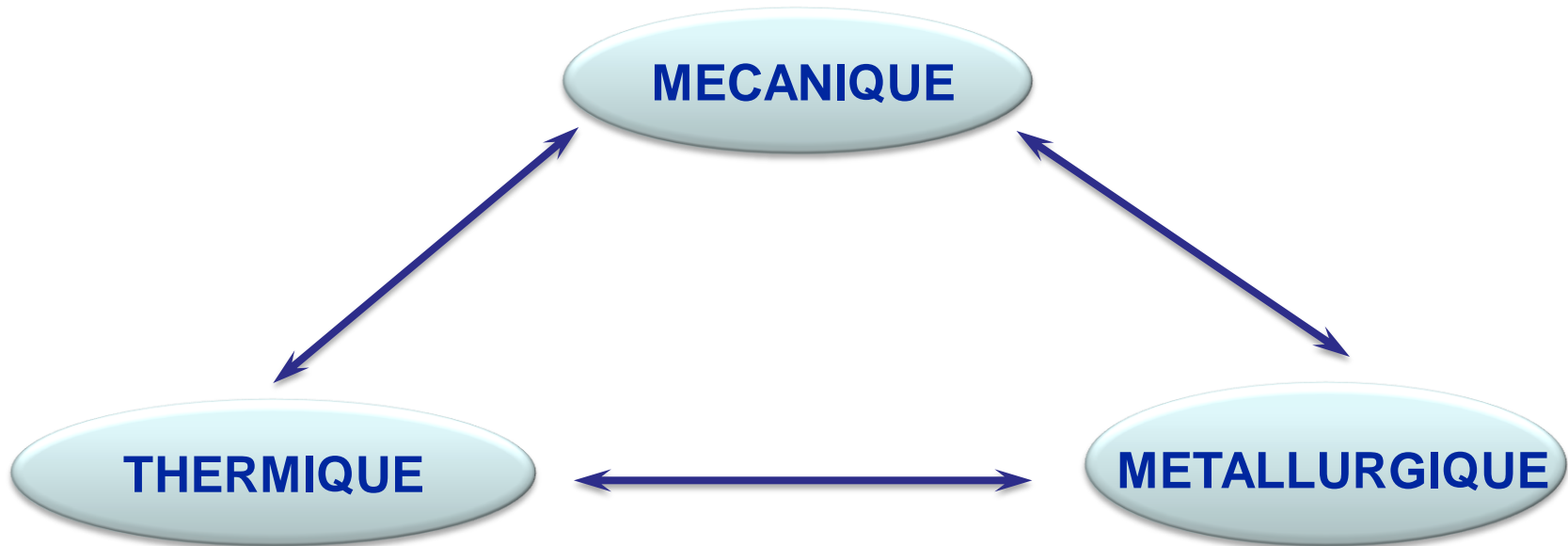
**Tous les procédés de fabrication
introduisent et/ou modifient les
contraintes résiduelles**

**S'il n'existe pas d'hétérogénéités, il n'y
a pas de contraintes résiduelles**

Les contraintes résiduelles : définition

3/4

Origine des contraintes résiduelles :
Les origines des contraintes résiduelles
peuvent être séparées en 3 grandes catégories



Les contraintes résiduelles : définition 4/4

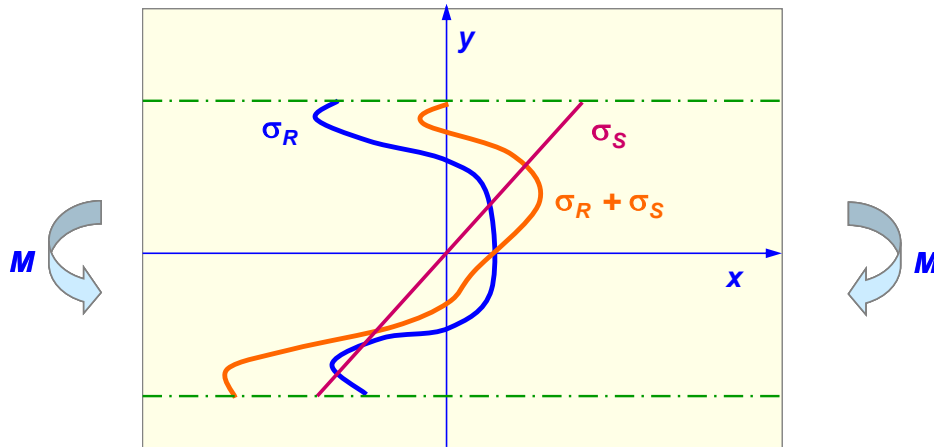
Procédés de fabrication et contraintes résiduelles

- **Opérations d'usinage**
- **Opérations de soudage**
- **Traitements de détensionnement**
Thermique, vibrations
- **Traitements mécaniques de surface :**
Grenaillage, galetage, martelage
- **Dépôts et revêtements :**
Nickelage, chromage, stellitage ...
- **Traitements thermochimiques :**
Nitruration, carbonitruration, cémentation
- **Nettoyage par grenaillage (« sablage »)**

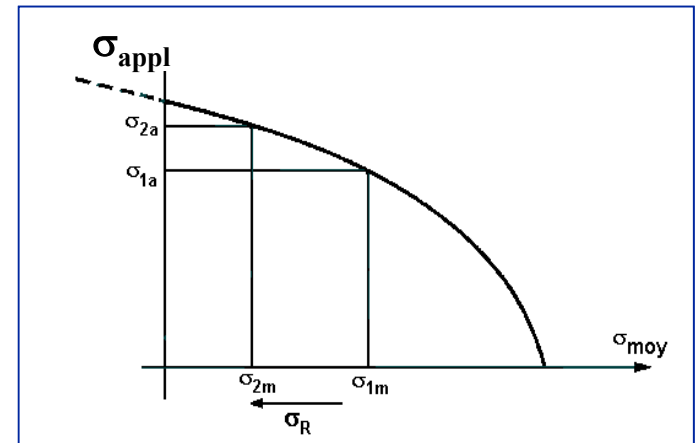
Les contraintes résiduelles

Pourquoi les évaluer ? 1/2

- Elles s'additionnent aux contraintes de service
- Peuvent entraîner des comportements inattendus ou des ruptures
- Ne sont pas immédiatement apparentes, difficiles à quantifier et à modéliser



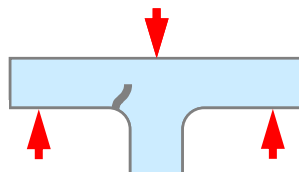
Principe de superposition



Dans le cas de sollicitations simples, la contrainte résiduelle agit comme une contrainte moyenne supplémentaire.



Aspect progressif de la fissuration par fatigue



La contrainte maximale à laquelle est soumis le matériau est alors :

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{moy}} + \sigma_R + \sigma_{\text{appl}}$$

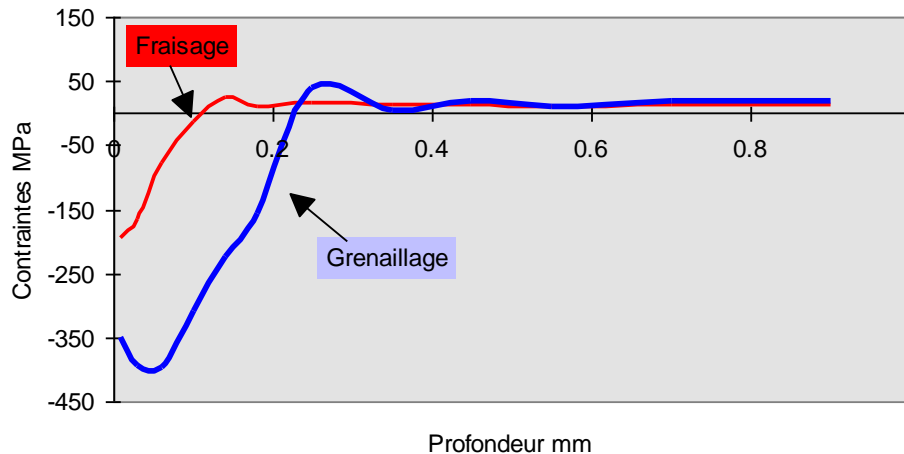
Les contraintes résiduelles

Pourquoi les évaluer ? 2/2

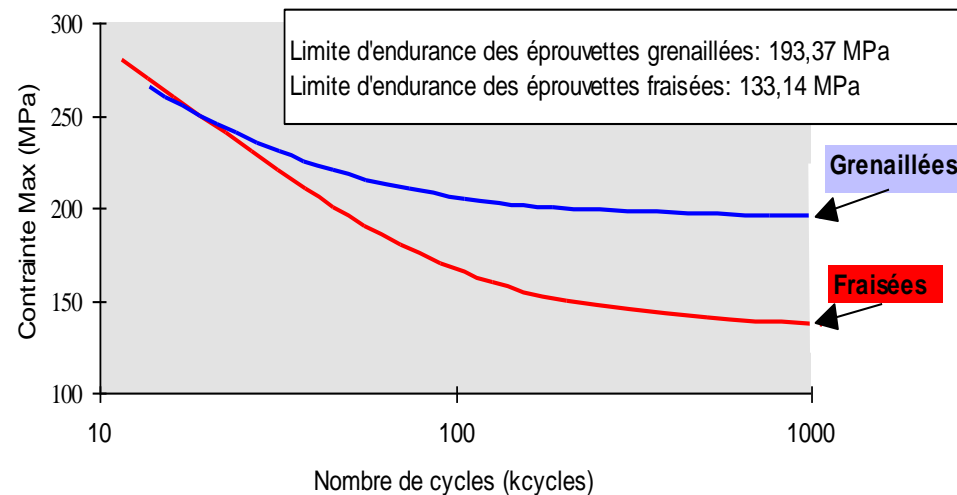
Elles existent dans toutes les pièces mécaniques...

Elles influent sur la tenue en service des pièces...

Evolution des contraintes résiduelles pour deux configurations de traitement de surface



Amélioration de la durée de vie en fatigue par l'introduction de fortes contraintes de compression



Les contraintes résiduelles

Comment les évaluer ?

Les méthodes non destructives

***Diffraction de rayonnement
(RX, synchrotron, neutrons)***

***Propagation d'ondes
ultrasonores***

***Propagation d'ondes
magnétiques***

Les méthodes destructives ou mécaniques

Méthode du perçage

Méthode du trépan

Méthode de la flèche

Découpage

Tranchage

Méthode du contour

Les contraintes résiduelles

Comment les évaluer ?

Les méthodes non destructives

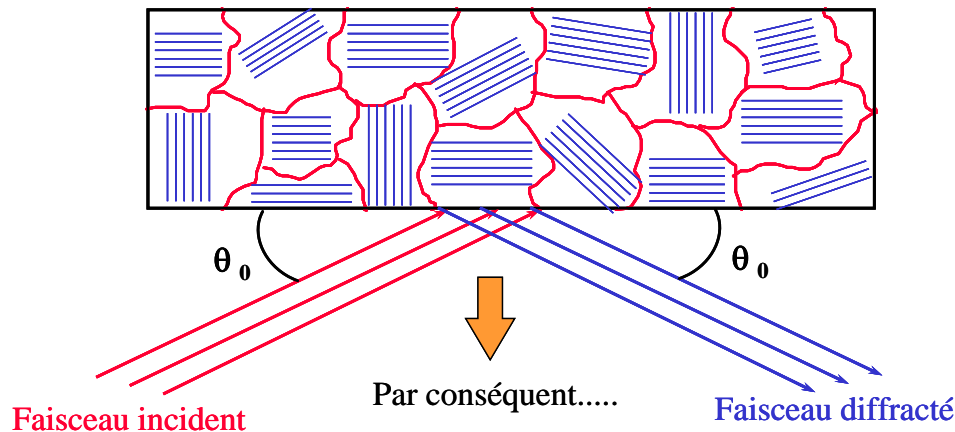
***Diffraction de rayonnement
(RX, synchrotron, neutrons)***

***Propagation d'ondes
ultrasonores***

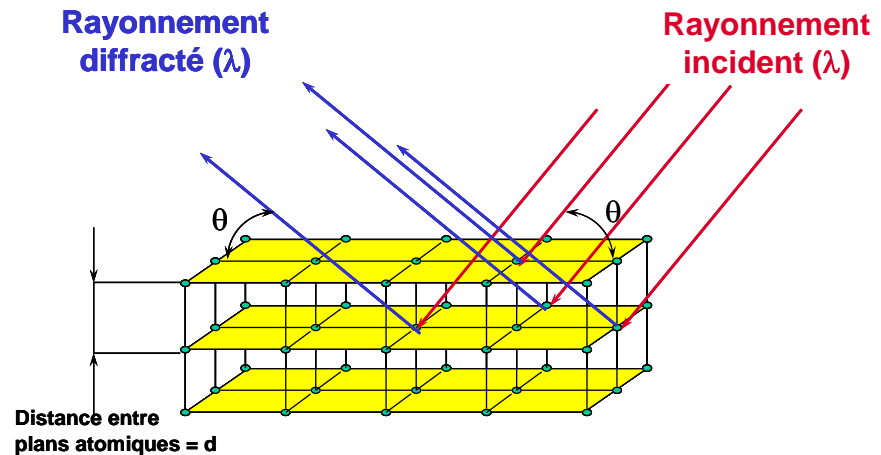
***Propagation d'ondes
magnétiques***

Evaluation par diffraction des rayons X

- Analyse des déformations du matériau par la mesure des variations de distance entre plans atomiques.
- Calcul des contraintes par des relations déduites de la mécanique des milieux continus, reliant les contraintes aux déformations.



$$\text{Loi de Bragg: } 2d \cdot \sin\theta = \lambda$$



Evaluation par diffraction des rayons X

Définition approchée :

$$\epsilon = \frac{d - d_0}{d_0} \cong -\frac{\theta - \theta_0}{\tan \theta_0}$$

Sans σ_R



$$d = d_0$$

Avec σ_R




$$\frac{d - d_0}{d_0} = \epsilon_{\varphi, \psi} = \frac{1 + \nu}{E} \cdot \sigma(\psi) \cdot \sin^2(\psi) - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2)$$

Evaluation par diffraction des rayons X

Les outils : Quatre diffractomètres au Cetim



Cofrac depuis août 2012

Centre technique des industries mécaniques 

Selon la norme européenne : EN 15305

Evaluation par diffraction des rayons X

En laboratoire...

Limitations de la méthode

Profils de contraintes en profondeur



- Analyse destructive
- Corrections d'enlèvements

Matériau homogène et isotrope



- Orientations référentielles
- Gradients de contraintes
- Tailles des cristallites

Matériaux multiphasés



- Contrainte macroscopique ?

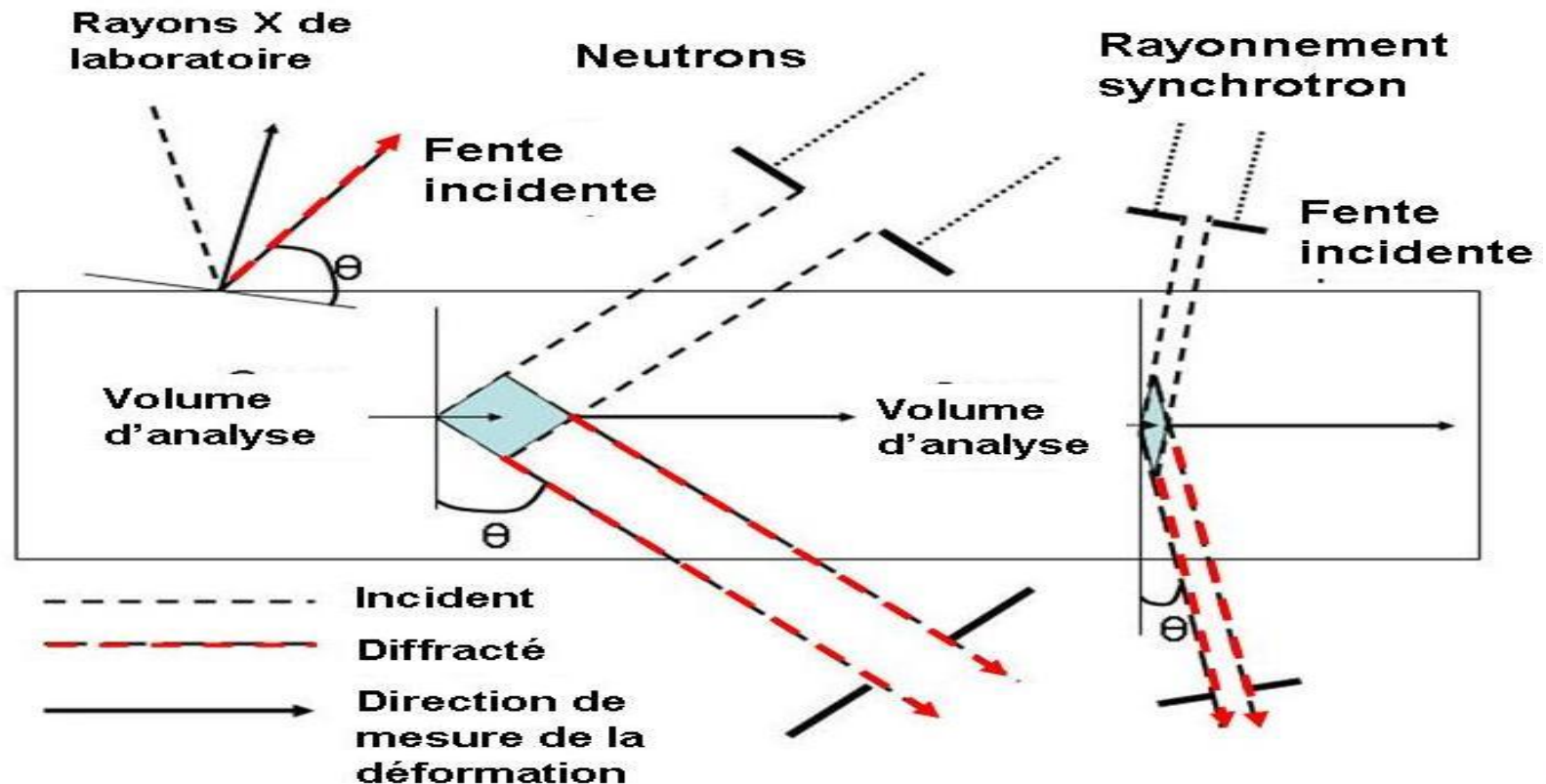
Géométrie des pièces



- Quelconque
- Mais accessibilité de la zone de mesure

Evaluation par diffraction des rayons X

Comparaison entre laboratoire et grands Instruments



Evaluation par diffraction des rayons X

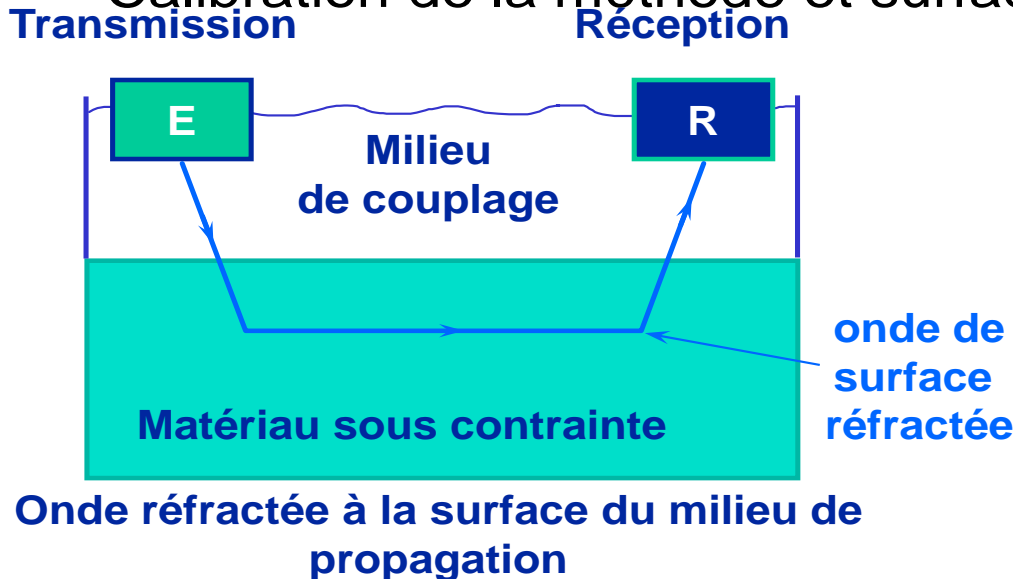
Comparaison entre laboratoire et grands Instruments

| | Lab X-ray | Synchrotron X-ray | Neutrons |
|-----------------------------|---|--|-------------------------|
| Taille du faisceau | 2mm | Micromètres au mm | 5mm au 0.3mm |
| Temps d'acquisition | Minutes to hours | Seconds to minutes | Minutes to hours |
| Angle de diffraction | 5° to 20° | 5° to 20° | ~45° |
| Profondeur max... | 6μm (Fe), 10μm (Al) Enlèvement de matière | Par dispersion d'énergie: ~40mm (Fe) ~100mm (Al) | 50mm (Fe) 300mm (Al) |

Evaluation par ondes ultrasonores

Effet acoustoélastique → contraintes de volume
→ contraintes de surface
(analyse CETIM ~ 3mm)

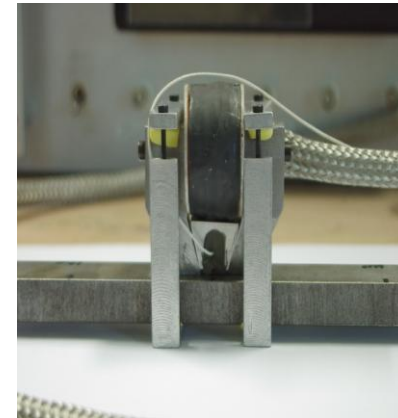
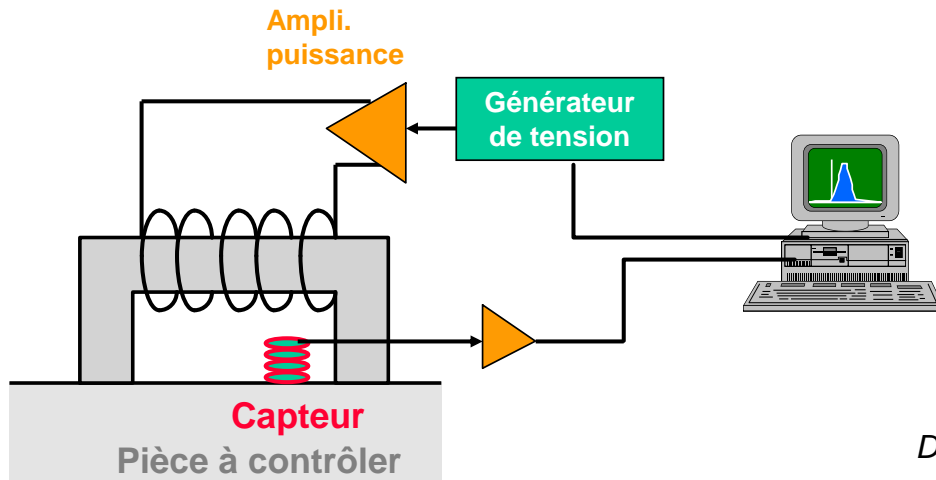
- Exploitation des variations de la vitesse ultrasonore
- Calibration de la méthode et surface plane



Prototype de capteur ultrasonore utilisé pour les mesures de contrainte

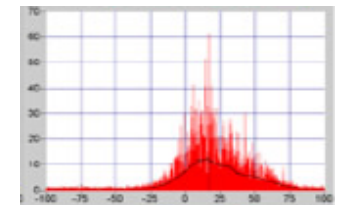
Evaluation par bruit Barkhausen

Matériaux ferromagnétiques



Dispositif de mesure expérimental de mesure du bruit Barkhausen (inducteur + bobine de réception), monté sur éprouvette de traction

- La forme et l'intensité du pic varient en fonction de :
 - La microstructure (proportion, composition)
 - Les contraintes résiduelles (traction, compression)
- Méthode qualitative nécessitant une calibration



Les contraintes résiduelles

Comment les évaluer ?

Les méthodes non destructives

Les méthodes destructives ou mécaniques

Méthode du perçage

Méthode du trépan

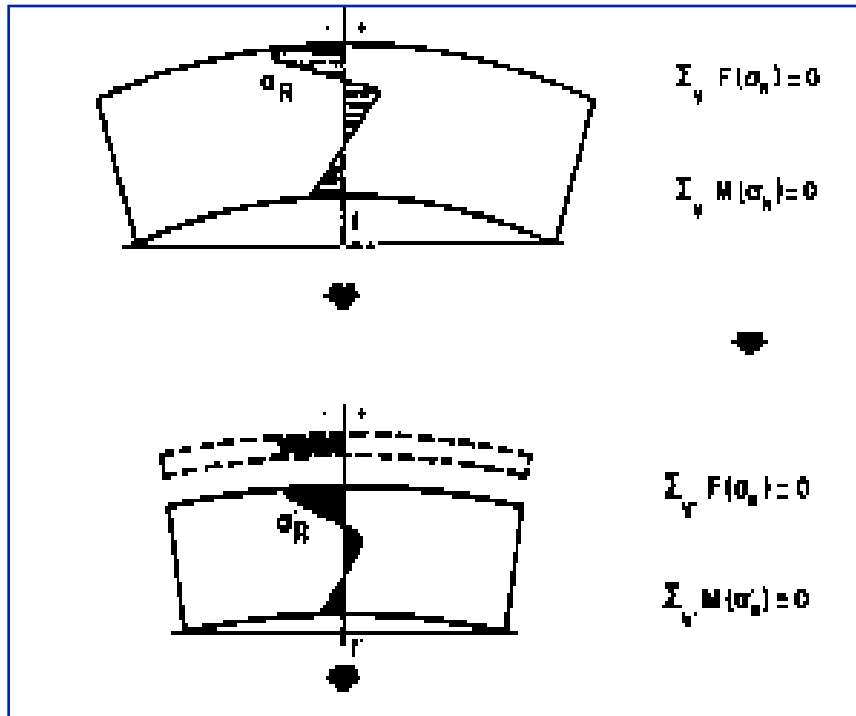
Méthode de la flèche

Découpage

Tranchage

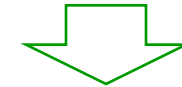
Méthode du contour

Evaluation par méthodes mécaniques

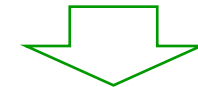


Toutes les méthodes mécaniques sont basées sur le principe d'équilibre des σ_R

Enlèvement de matière



Modification de l'état de contraintes



Déformation de la pièce

Si l'on sait mesurer les déformations, on peut calculer les σ_R relâchées

Evaluation par perçage incrémental

Principe de la méthode



- *Perçage pas à pas (trou à fond plat)*
- *Mesure des déformations à chaque pas de perçage*
- *Calcul de la distribution des contraintes résiduelles dans l'épaisseur à partir :*
 - . *des déformations mesurées en surface*
 - . *du calcul des coefficients de calibration par un modèle EF*
- *Tracé du profil de contraintes en fonction de la profondeur*

Evaluation par perçage incrémental

Norme ASTM E837

Hypothèses

Le matériau est isotrope élastique

Les contraintes mesurées sont inférieures à la limite d'élasticité du matériau

La composante perpendiculaire à la surface est négligeable

Dans chaque couche enlevée, les contraintes sont constantes

Entre deux couches les cisaillements sont nuls

Le fond du trou est plat

Paramètres...

Ø de perçage : à partir de 1 mm

Profondeur caractérisée : $P = \text{Ø} / 2$

Valeurs des incréments de perçage : quelconques $> 40 \mu\text{m}$

Nombre d'incrément de perçage : quelconques < 100

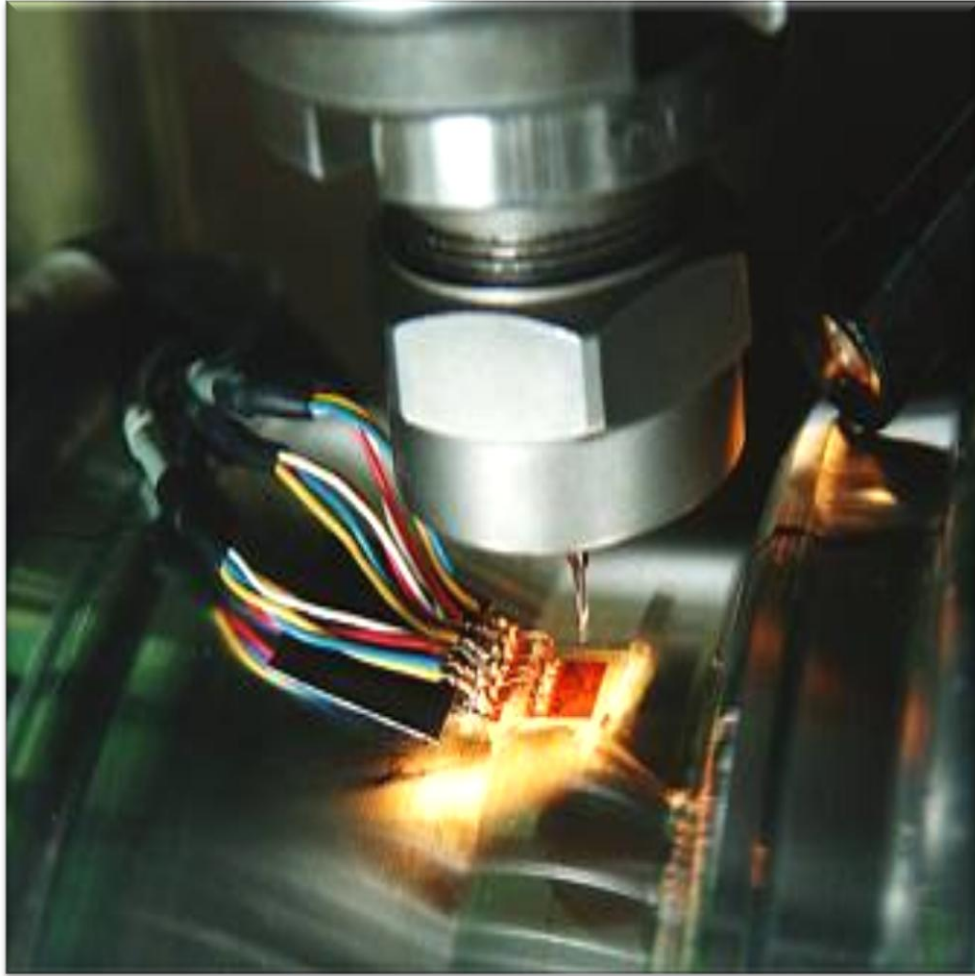
Mesures des déformations : à l'aide de jauges d'extensométrie

Evaluation par perçage incrémental

Limitations de la méthode

- **La méthode est destructive ou semi-destructive (pièces très massives)**
- **Elle ne donne pas d'informations en surface**
- **Elle est sensible aux effets de bords :**
*la distance minimale à respecter entre deux perçages,
ou entre un perçage et un bord est :*
$$d = 5 \times \varnothing$$
- **Elle est sensible aux rayons de courbure des pièces:**
pour s'affranchir de cet effet, il faut respecter les conditions :
$$R_c / R_p > 8$$
- **Elle est sensible à la dureté du matériau :**
*la mesure est possible pour des duretés jusqu'à environ **50 HRC***

Evaluation par perçage incrémental



Evaluation par méthode de la flèche

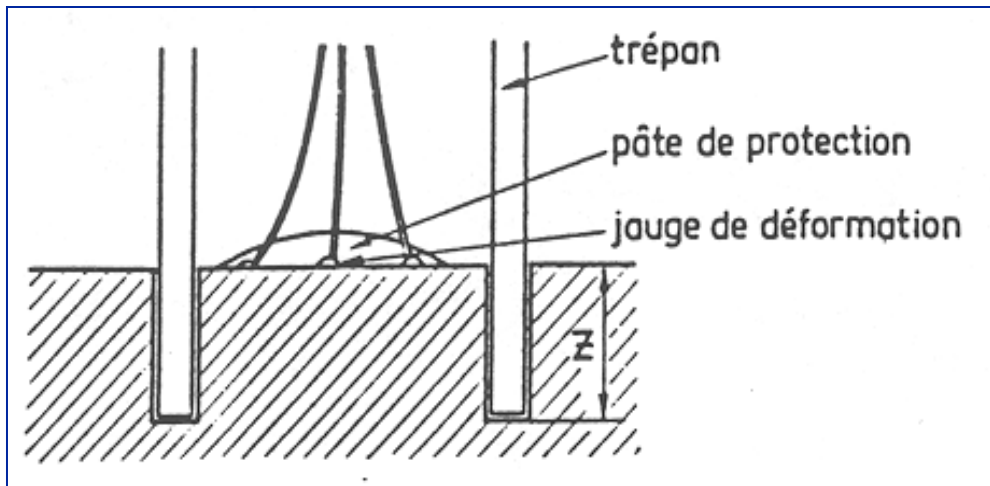
Mise en œuvre expérimentale

- ✓ ***Enlèvement de couches par dissolution chimique sur une seule face (l'autre étant protégée)***
- ✓ ***Mesure de la variation de flèche et de l'épaisseur enlevée à l'aide d'un comparateur au 1/100***
(Dans les cas où les contraintes sont très superficielles (usinage par exemple), on peut utiliser des appareils plus précis (1 μm))
- ✓ ***Tracé de la courbe $f = g(e)$ à partir des valeurs mesurées de e et de f ,***
- ✓ ***Calcul des contraintes à partir de formules analytiques en fonction de la flèche, de l'enlèvement de matière et d'épaisseur,***

Evaluation par méthode du trépan

Mise en œuvre expérimentale

- 1) Collage d'une jauge tridirectionnelle à l'endroit où on désire connaître les contraintes
- 2) Réalisation d'une saignée circulaire autour de la jauge
- 3) Trépanage par pas successifs de 0,5 à 1 mm afin d'éviter un échauffement excessif et de permettre l'enlèvement des copeaux



Evaluation par perçage incrémental profond

deep hole drilling

Mise en œuvre expérimentale

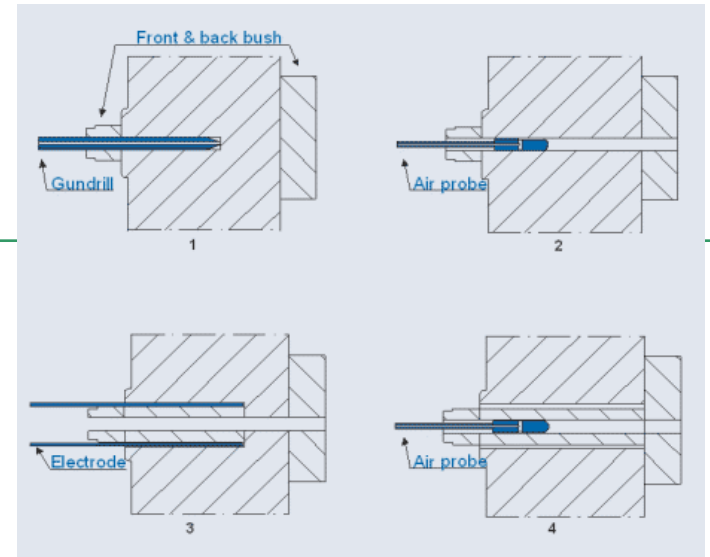
La méthode comporte 4 étapes :

1) Un trou de faible diamètre est percé au travers du composant ainsi que sur les échantillons de référence

2) Le diamètre du perçage est mesuré sur toute l'épaisseur de la pièce ainsi que sur les références

3) Un usinage (trépan) est réalisé par électroérosion autour du premier perçage

4) Le diamètre du premier perçage est ensuite remesuré



Evaluation par perçage incrémental profond deep hole drilling

Quelques précisions

Les contraintes résiduelles sont déterminées sur des profondeurs jusqu'à 750 mm

Possibilité de mesure en laboratoire ou sur site

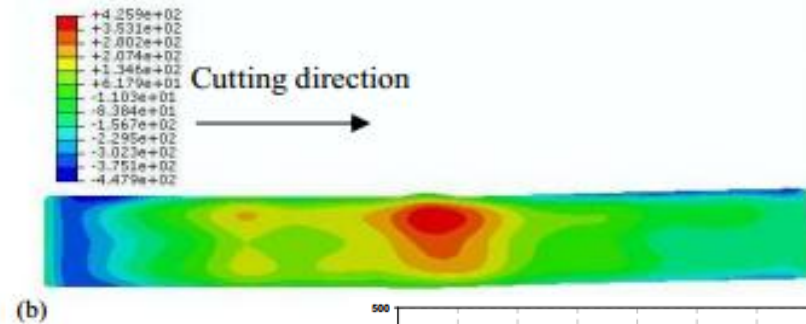
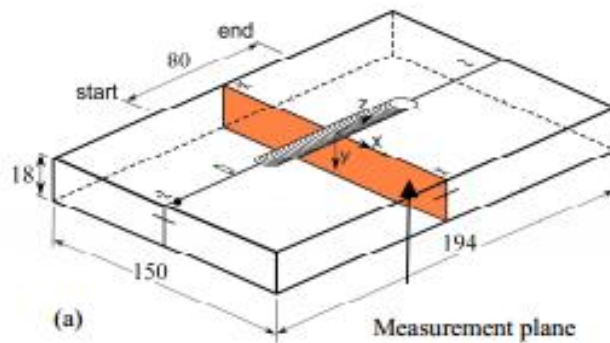
Applicable aux matériaux aussi bien métalliques que non métalliques

Précision : 10 MPa sur l'aluminium, 30 MPa sur l'acier, 15 MPa sur le Ti

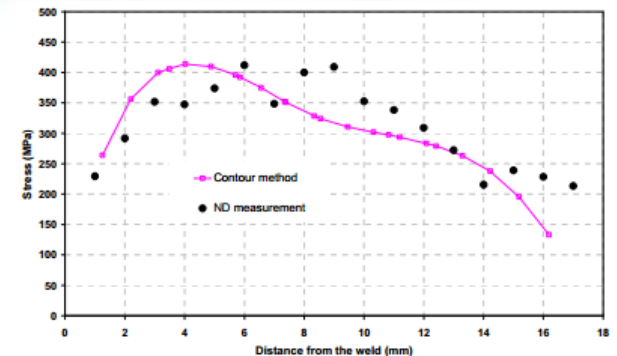
Evaluation par méthode du contour

Exemple

Inventé par Dr Mike Prime de Los Alamos Laboratories
Présenté en Europe pour la première fois en 2000



Développé en Europe par
Open University



13/03/2014

Séminaire GT7

Commission Fatigue - SF2M

Merci de votre attention

Fabien Lefebvre

Cetim, Fatigue des composants mécaniques

Fabien.lefebvre@cetim.fr

Centre technique des industries mécaniques 