

Les phénomènes de Fatigue des Pièces mécaniques

Monsieur Hubert SCHAFF.

Ancien Directeur Partenariats & Innovation d'Aubert et Duval.
Actuellement Président de **La Société Française de Métallurgie et de Matériaux,**
SF2M

Monsieur Jean SANS

Expert Judiciaire (Navire et Maritime) près la Cour d'Appel de Rennes
Vice-président de la CNEMP.

Chambre Nationale des Experts Maritimes Plaisance
Fédération des Industries Nautiques

Paris le 21 Mars 2017

Identification de la fatigue des pièces mécaniques

Jean SANS

jean.sans@wanadoo.fr

06 07 10 24 03

Lors de la conférence, les interventions des conférenciers se sont imbriquées dans les deux présentations (slides).

Phénomène de fatigue

Constat :

Ce phénomène concerne près de la moitié des avaries survenues en service sur des pièces ou structures mécaniques.

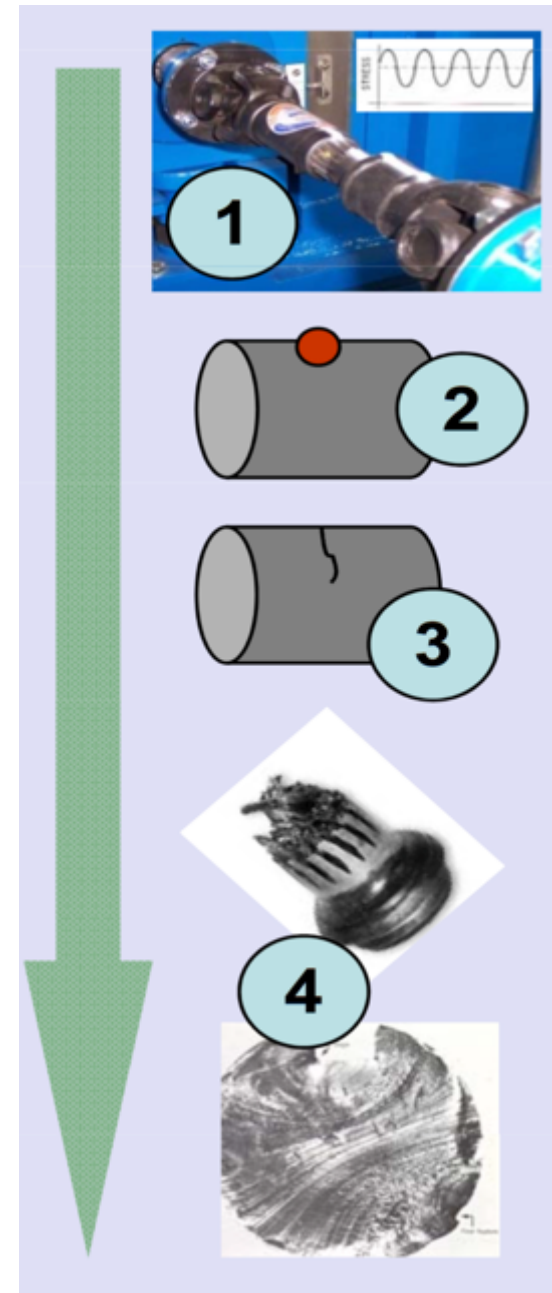
Processus d'endommagement :

1- Le chargement cyclique des zones critiques où se concentrent les contraintes est à l'origine de ce phénomène.

2- Dans ces zones, l'endommagement progressif du matériau se manifeste par l'apparition de microfissures, apparition plus ou moins rapide selon la nature du matériau et l'importance du chargement appliqué (et du nombre de cycles répétitifs)

3- Après cette période d'amorçage, l'une des fissures ou plusieurs d'entre elles vont se propager insidieusement dans toute l'épaisseur de la pièce.

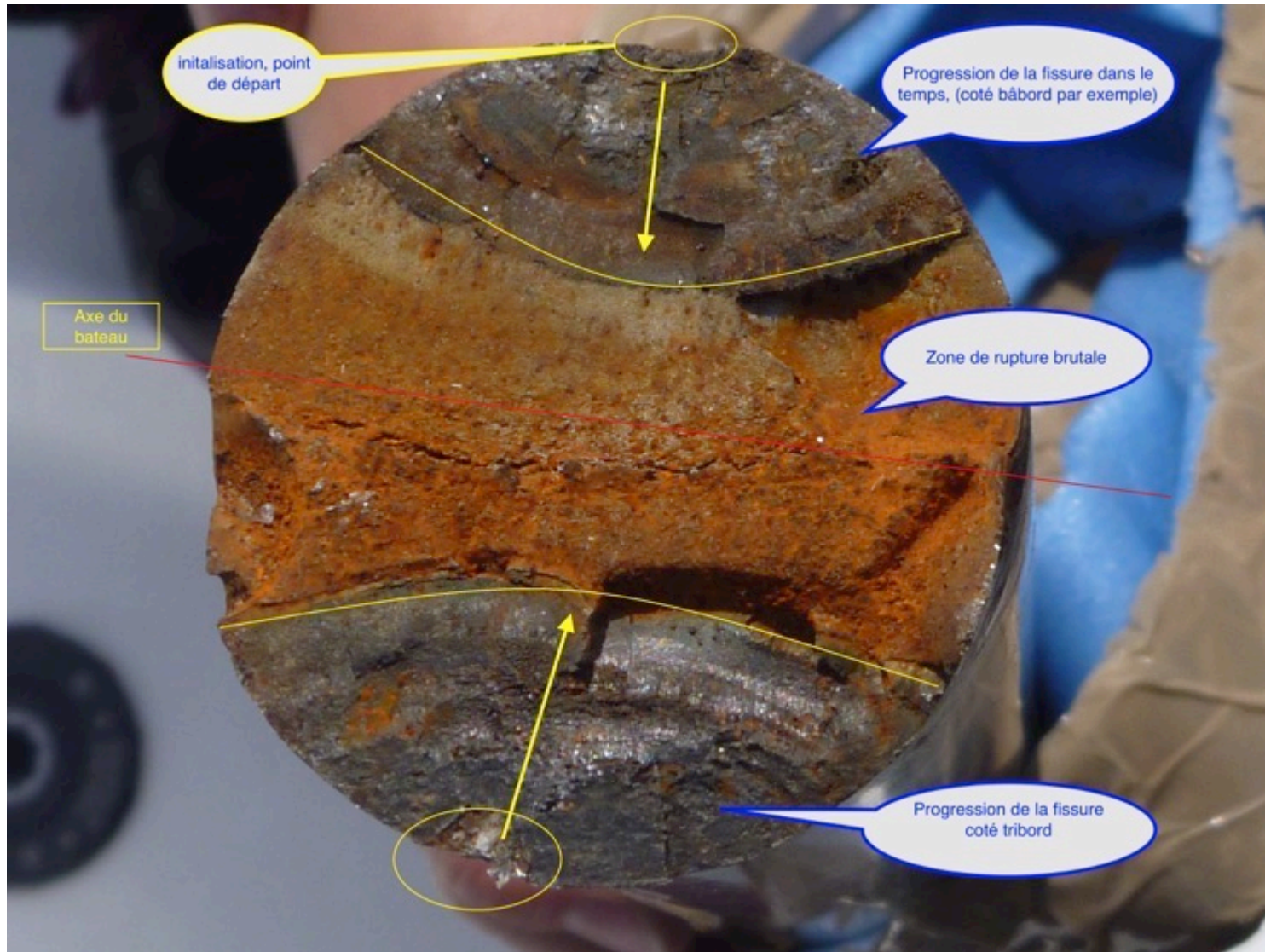
4- La section résistante diminue jusqu' à rupture plastique brutale.



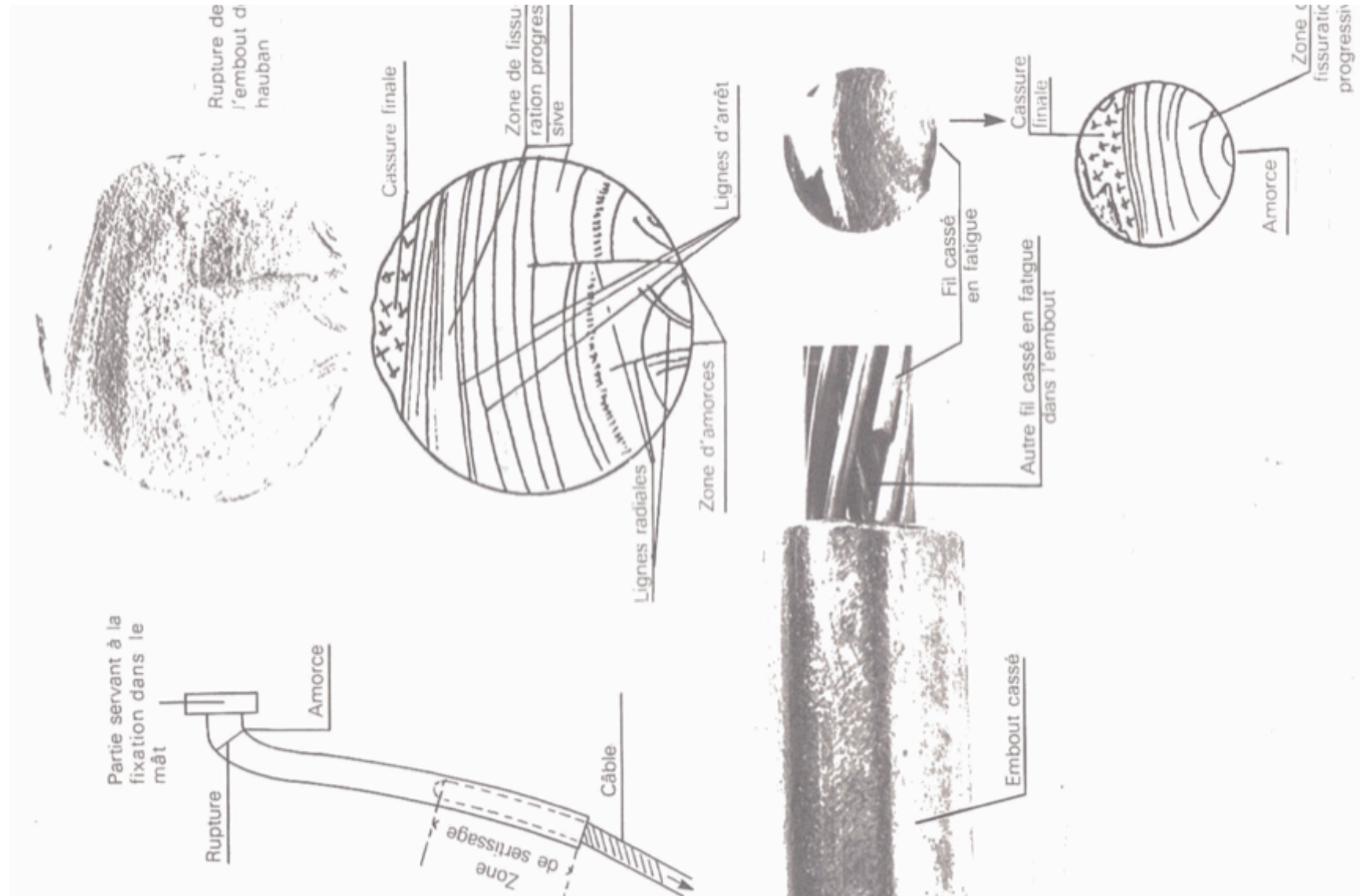
Identification du phénomène de fatigue :

Ce sont des ruptures « en service » sous des chargements cycliques (effort, couple, contraintes) dont les niveaux sont bien inférieurs aux caractéristiques mécaniques du matériau (R_e , R_m) qui constitue les pièces sollicitées.

Phénomène de fatigue (exemple 1)



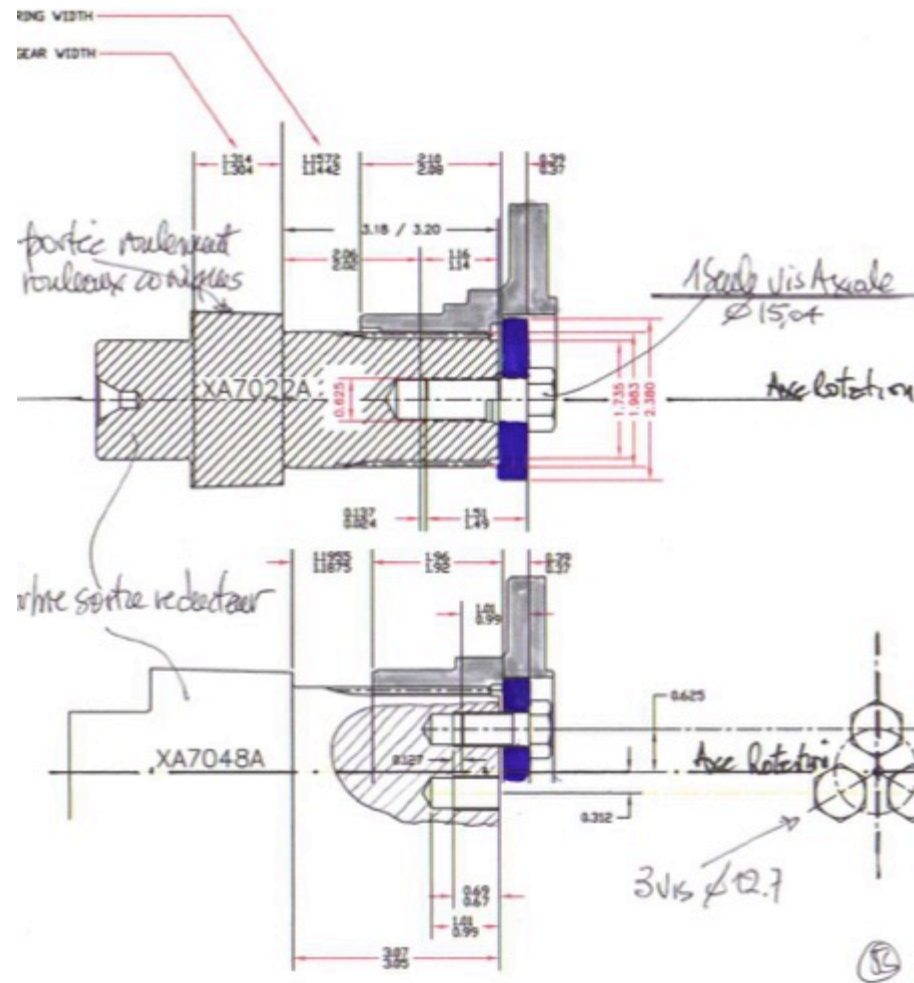
Phénomène de fatigue (exemple 2)



Phénomène de fatigue (exemple 3)



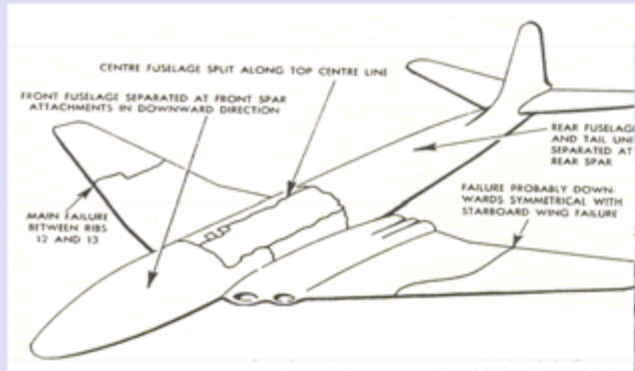
Phénomène de fatigue (exemple 4)



ECHELLE 1:1
COTES en Inches

✓ Exemples célèbres

Le Comet de Havilland



Le « De Havilland Comet » est connu pour avoir été le premier avion commercial propulsé par des turboréacteurs dans les années 50.

Il est resté tristement célèbre à la suite d'une série d'accidents en plein vol qui a mis en évidence le **phénomène de fatigue** des structures dans l'aéronautique.

En raison de son plafond de croisière élevé et de sa cabine pressurisée, le fuselage était soumis à des efforts cycliques, particulièrement propices à la **propagation des fissures**.

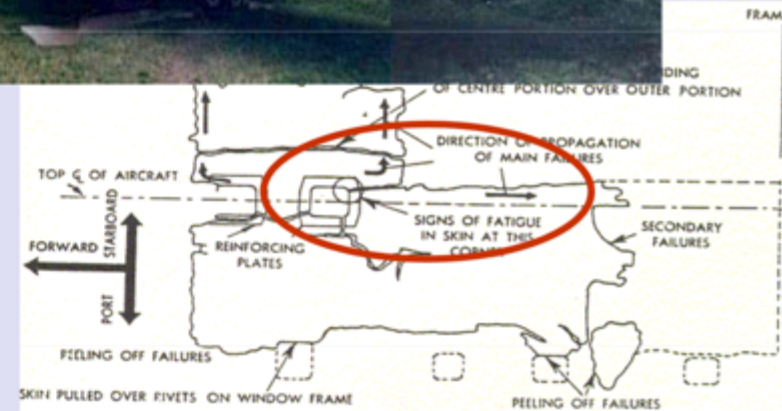
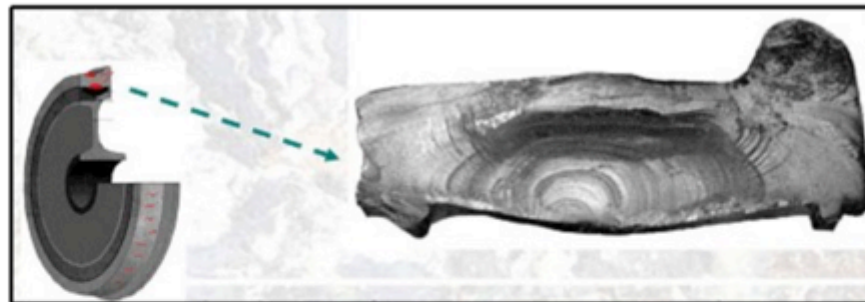




Figure 1.25 Vue de l'accident de l'ICE «Willhelm Röntgen» le 3 juin 1998 Source : Wikimedia



6. Roues des locomotives

Question

Pourquoi de nombreuses compagnies ferroviaires de part le monde emploient-elles une personne pour taper sur les roues des locomotives et des wagons de chemin de fer ?

Problématique :

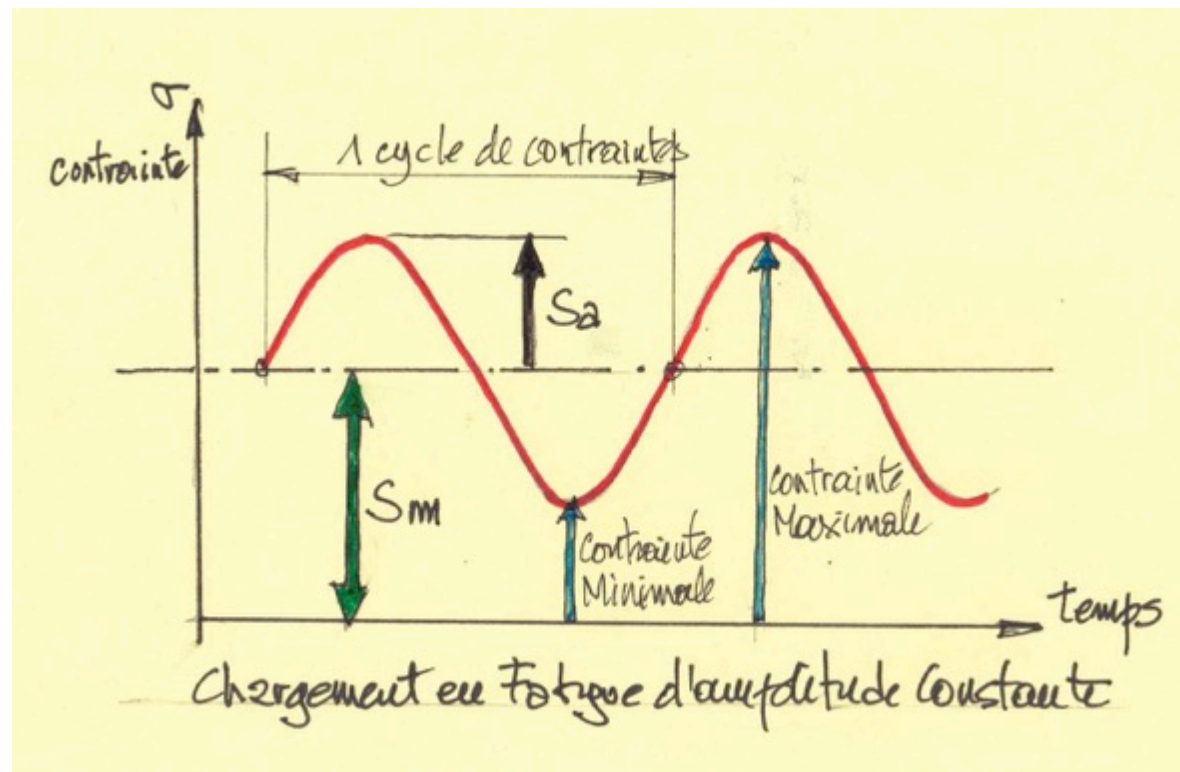
COMMENT REPRÉSENTER LA RÉSISTANCE A LA FATIGUE DES MATÉRIAUX ?

Pour la conception de pièces soumises à des sollicitations en fatigue, l'ingénieur doit disposer des caractéristiques mécaniques adéquates du matériau utilisé, de la même façon qu'il lui faut connaître la limite d'élasticité (R_e ou $R_{p0,2\%}$) ou la résistance à la rupture R_m pour un calcul de résistance à un chargement statique.

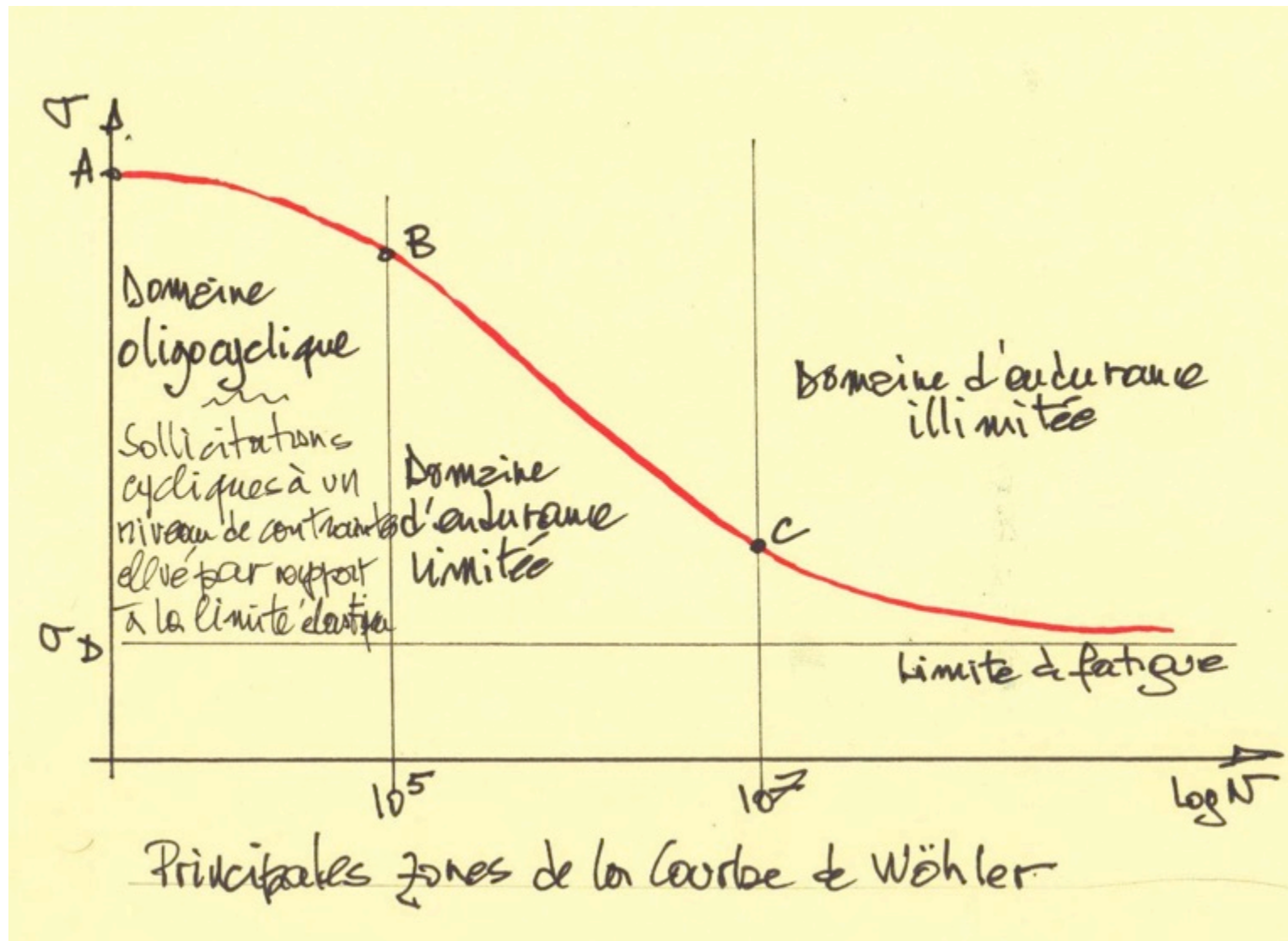
Courbe de Wöhler et limite d'endurance

Pour un chargement unique (uniaxial) en traction, flexion ou torsion, le critère de base est la courbe de Wöhler.

Pour une contrainte moyenne ou statique S_m donnée, cette courbe traduit l'évolution des nombres de cycles jusqu'à la rupture, en fonction de l'amplitude de la contrainte appliquée S_a .



Courbe de Wöhler et limite d'endurance (suite)



Facteurs influençant la résistance à la fatigue

Outre la contrainte moyenne **S_m** prise en compte par les diagrammes d'endurance, les facteurs qui influencent la résistance à la fatigue sont assez nombreux :

- Concentration de contraintes,
- Etat de surface,
- Effet d' échelle,
- Contraintes résiduelles,
- Corrosion,
- Température,
- Fréquence,
- ...

Les plus importants sont la concentration de contraintes, l'état de surface, l'effet d' échelle, les contraintes résiduelles.

Facteurs influençant la résistance à la fatigue

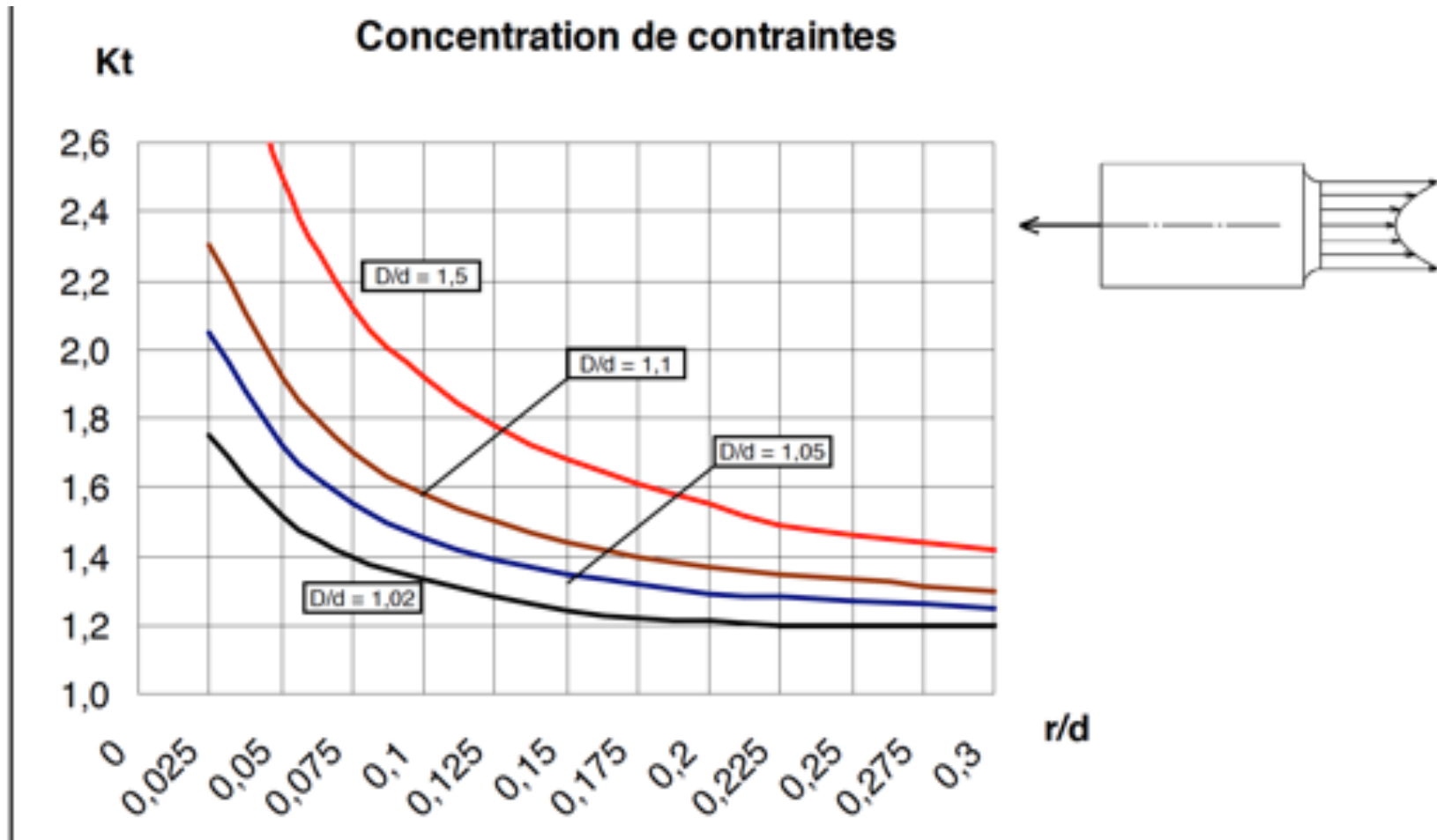
➤ Concentration de contrainte

C' est le facteur d'influence le plus important pour la résistance à la fatigue d'une pièce.

A l'emplacement d'un « accident » de géométrie (gorge, rainure, défaut etc.), la contrainte locale augmente par rapport à la contrainte nominale : *on est en présence d'une concentration de contrainte.*

L'importance de cette augmentation locale de contrainte est quantifiée par le facteur $K_t = S_{\max} / S_{\text{nominale}}$. Ce facteur peut être calculé par des abaques (valeurs entre 1.2 et 2.6).

En fatigue, l'influence de la concentration de contraintes dépend de ce facteur K_t mais aussi de la nature du matériau : par exemple, plus le matériau est ductile, plus il s'adaptera par des microplastiques cycliques à la sollicitation.



Les formes locales des surfaces introduisent de phénomènes de concentration de contraintes (par exemple un filetage).

La contrainte effective sera supérieure à la contrainte nominale calculée.

$$K_f = \frac{\text{limite d'endurance d'une éprouvette non entaillée}}{\text{limite d'endurance d'une éprouvette entaillée}}$$

$$K_t = \frac{\text{Contrainte Max}}{\text{Contrainte nominale}}$$

Pour la plupart des matériaux utilisés en mécanique $K_f < K_t$,

Pour les matériaux durs et résistants
($R_m > 1\,800\text{ MPa}$), on considère que $K_f = K_t$.

➤ Etat de surface

- L' état de surface d'une pièce mécanique conditionne sa résistance à la fatigue.
Plus cet état de surface sera grossier, plus la limite d'endurance sera abaissée d'un facteur K_s du fait de la présence des défauts superficiels.
- Sur une pièce soumise à un chargement de fatigue, on devra soigner d'autant plus l' état de surface final que le matériau qui la constitue présente de hautes caractéristiques mécaniques.

➤ Effet d'échelle

- L'effet d'échelle se traduit en fatigue par le fait qu'à contrainte superficielle égale, une pièce de plus grande dimension présentera une plus faible durée de vie. Cela tient à deux facteurs : effet de gradient et effet statistique.
- Pour les pièces travaillant en flexion, en torsion ou en traction avec présence d'entaille(s), l'évolution de la contrainte sous la surface, influence la résistance à la fatigue : plus une pièce est de faible dimension, **plus le gradient est élevé et plus la résistance à la fatigue sera grande.**
- Par ailleurs, plus une pièce est de grande dimension, plus on a statistiquement de chance de trouver un défaut qui conduira à l'amorçage d'une fissure de fatigue.

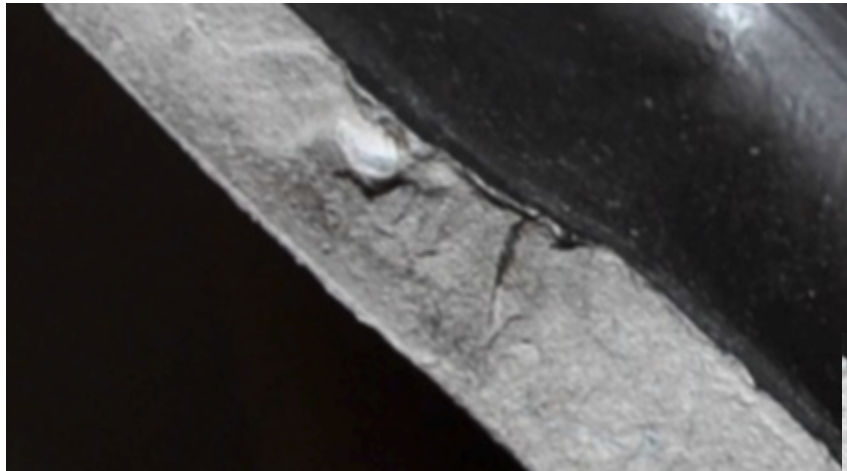
➤ Contraintes résiduelles

- Les contraintes résiduelles qui résultent de la fabrication (moulage, soudage, estampage) restent présentes dans la pièce mécanique en l'absence de tout effort extérieur.
- Elles vont se superposer au chargement de fatigue et donc modifier les contraintes moyennes.

Au final, une pièce neuve (dans sa boîte) est livrée avec des contraintes résiduelles.

Quelques précisions

- ***Taille des grains*** : Les structures à grains fins présentent une meilleure tenue en fatigue que les structures à gros grains.
- ***Orientation du fibrage par rapport à la direction des efforts*** : Les caractéristiques statiques et la tenue en fatigue seront meilleures dans le sens long du fibrage que dans les autres sens.
- ***Taux d'écrouissage*** : L'écrouissage résultant des opérations de formage a pour effet de consolider le matériau (augmentation de la limite d'élasticité), et par suite, améliore la tenue en fatigue.
- ***Traitement thermique*** : Suivant que le traitement thermique provoque un adoucissement ou un durcissement du matériau, la tenue en fatigue sera diminuée ou augmentée. De plus, le traitement thermique peut modifier la taille des grains.
- ***Les défauts métallurgiques*** : Par exemple les inclusions, peuvent être à l'origine de l'endommagement par fatigue, mais il y a d'autres types de défauts métallurgiques qui existent.



Pales d'hélice HB en AS13 (ou équivalent (fonderie sous pression))

Problèmes liés à la fonderie, au métal, au refroidissement ???



➤ Corrosion, température, fréquence

- Les facteurs liés à l'environnement comme la corrosion ou la température influencent négativement la résistance à la fatigue.
- La limite d'endurance a également tendance à s'élever lorsque la fréquence des contraintes de chargement augmente, mais cet effet reste très limité.

➤ Synthèse, démarche de conception

- La conception d'une pièce mécanique soumise à la fatigue dépend en premier lieu du choix du matériau et doit surtout tenir compte des modes successifs de mise en œuvre de ce matériau pour aboutir à la pièce.

Par ailleurs, d'autres paramètres extérieurs au matériau conditionnent fortement la résistance à la fatigue.

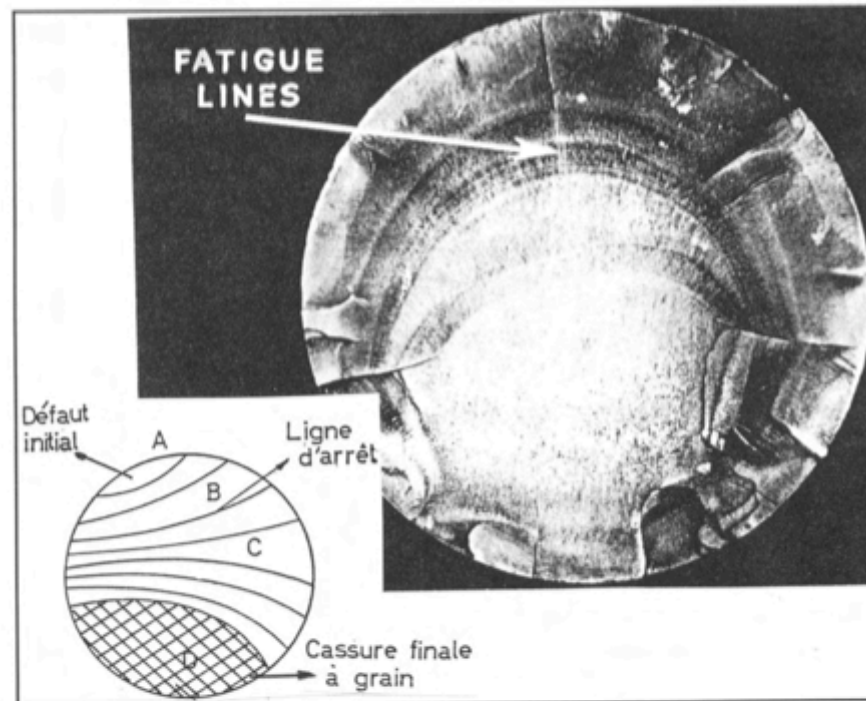
- Il faut cependant retenir que le facteur primordial à prendre en compte lors de la conception est le phénomène de concentration de contrainte.
- Avant tout choix de matériau, le concepteur devra faire en sorte **d' éviter les changements de géométrie brutaux conduisant à des concentrations de contrainte trop élevées. Toujours penser à faire fluer les efforts.**

On retiendra qu'un calcul de résistance à la fatigue précis devient donc vite complexe et délicat.

Il faudra souvent doubler ces calculs par des essais destructifs en grandeur réelle afin de valider les solutions techniques mises en œuvre.

LA RUPTURE : Toujours un phénomène de surface !

- microfissures
- entaille
- concentration de contraintes (K_t)
- corrosion
- etc ...



Faciès de rupture en fatigue.

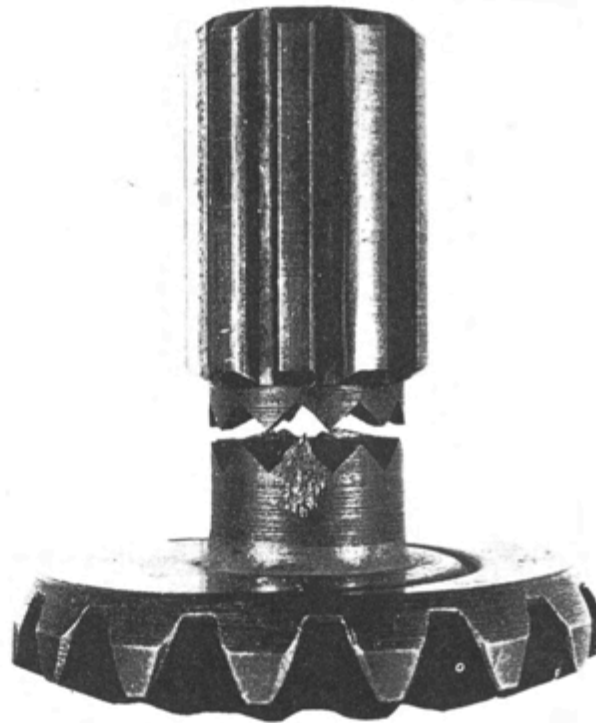
2 ZONES :

- 1] *Surface mate et soyeuse*
⇒ Zone de fissuration progressive
- 2] *Surface à grain cristallin*
⇒ Zone de rupture fragile

FACIES DE RUPTURES DE PIECES EN TORSION



a) Arbre de transmission

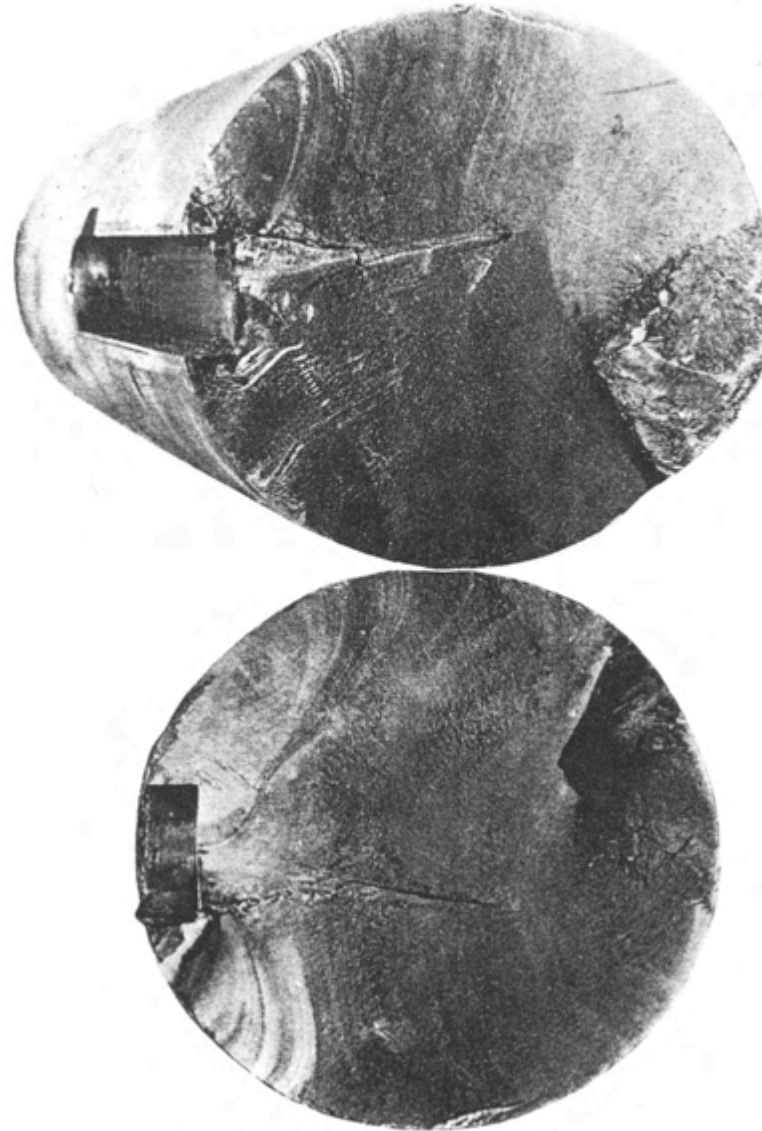


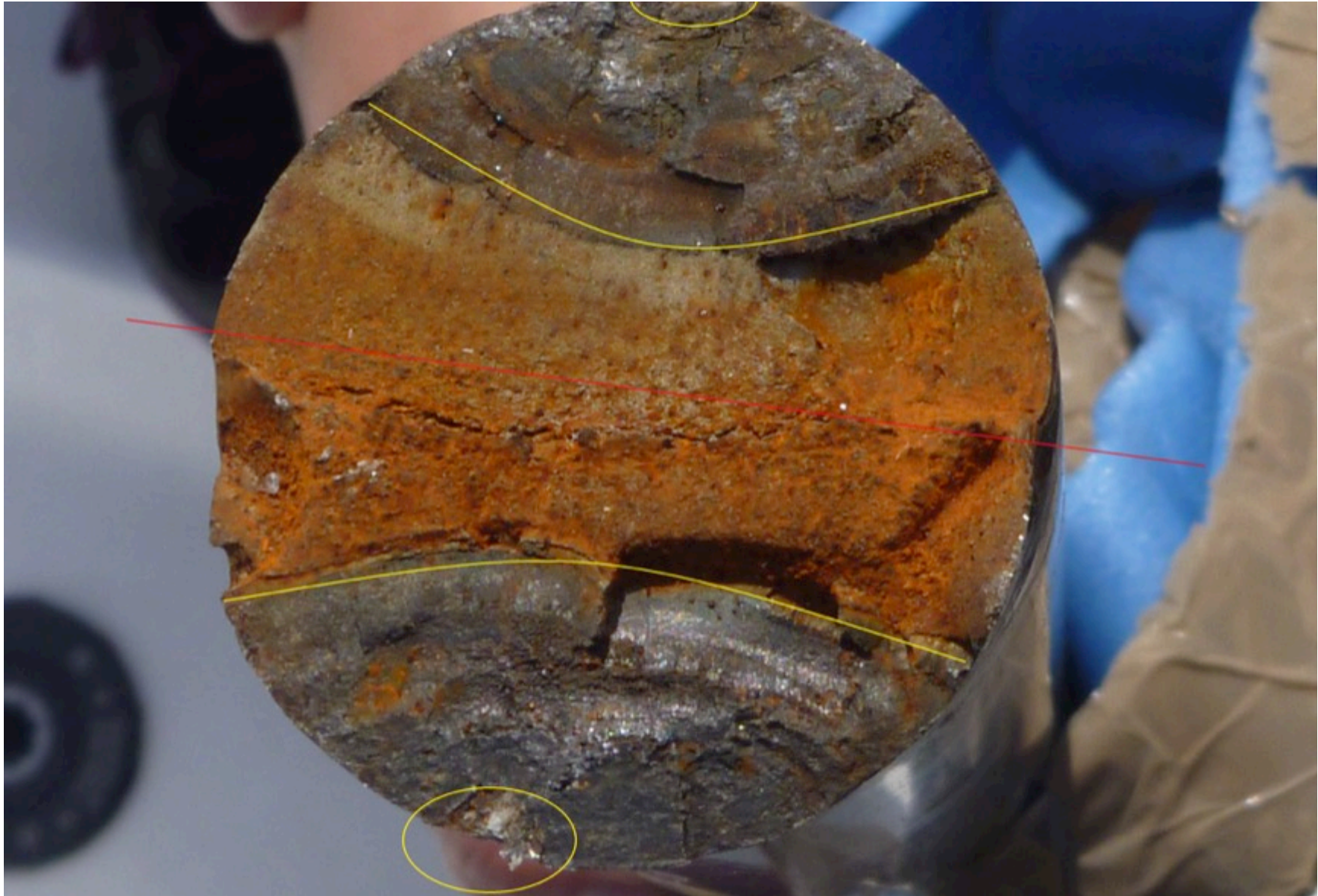
b) Arbre cannelé

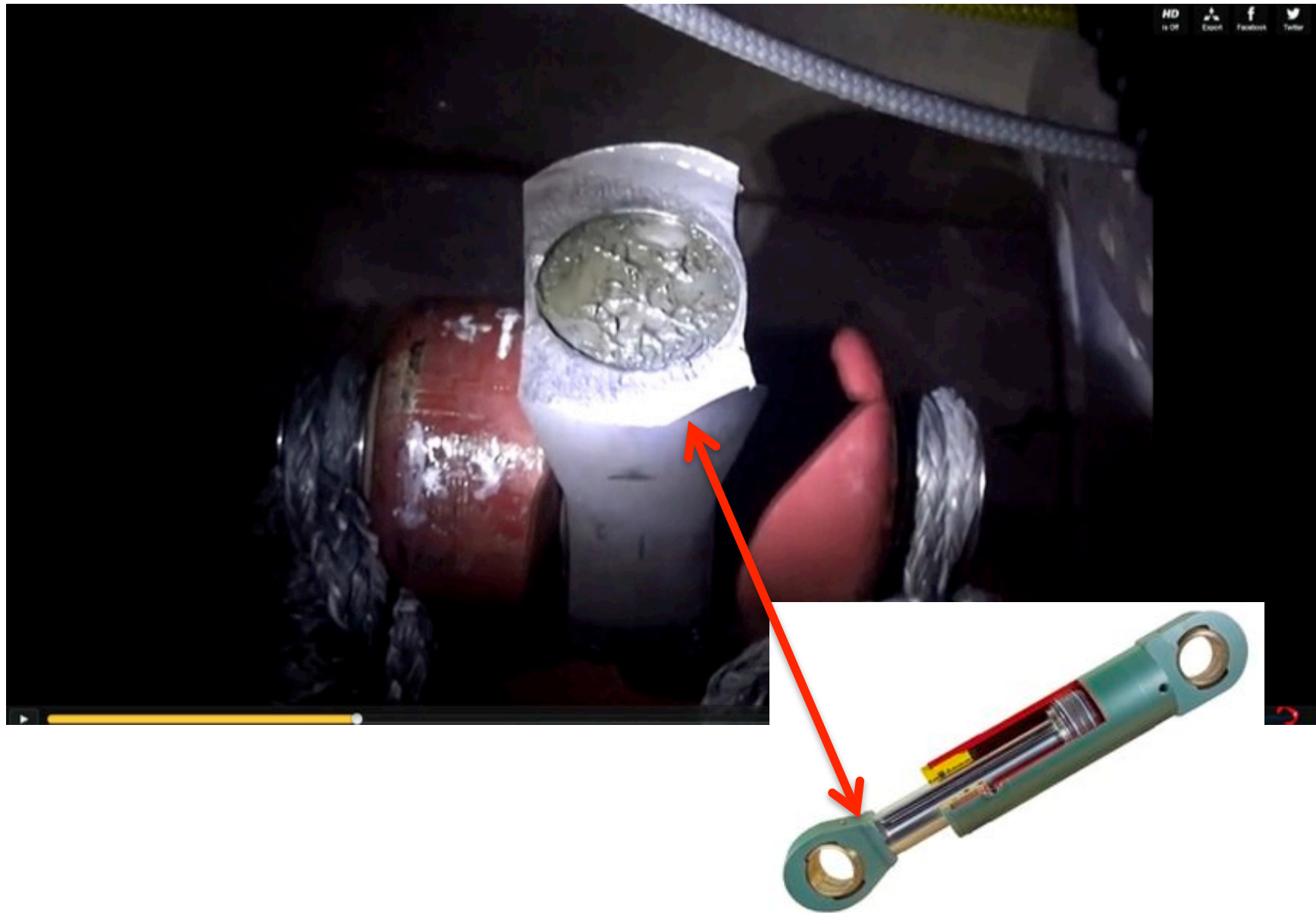
a) *Arbre de transmission* : rupture caractéristique dite "*en bois pourri*" due à des lignes d'inclusions très nombreuses dirigées dans le sens du laminage.

b) *Arbre cannelé* : Rupture caractéristique d'une sollicitation en alternée de torsion (propagation de la fissure sur une hélice à 45°).

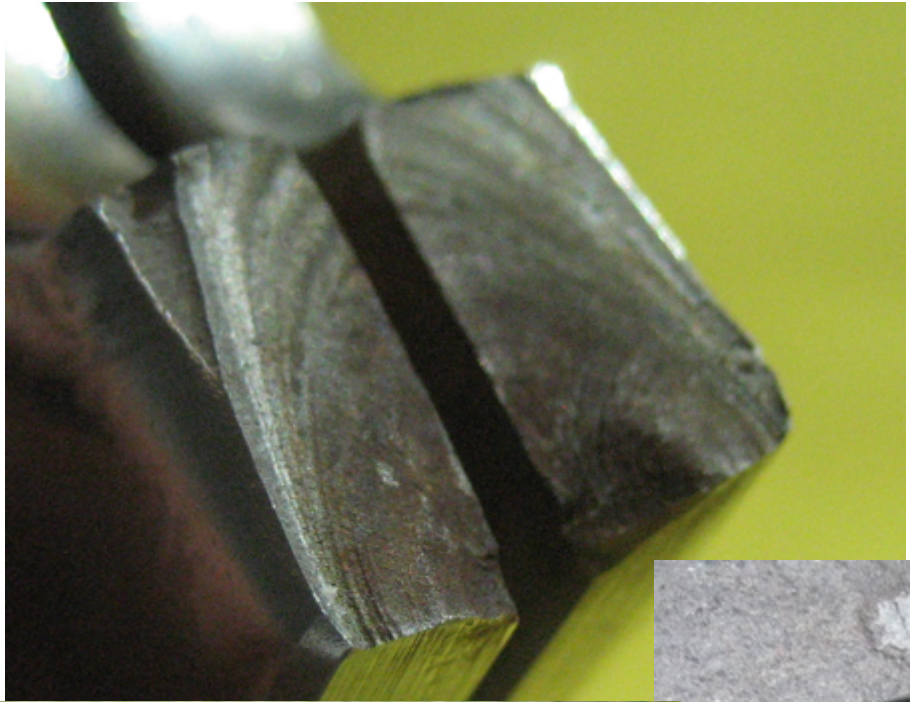
RUPTURE DUE A UNE CONCENTRATION DE CONTRAINTE (Clavette)





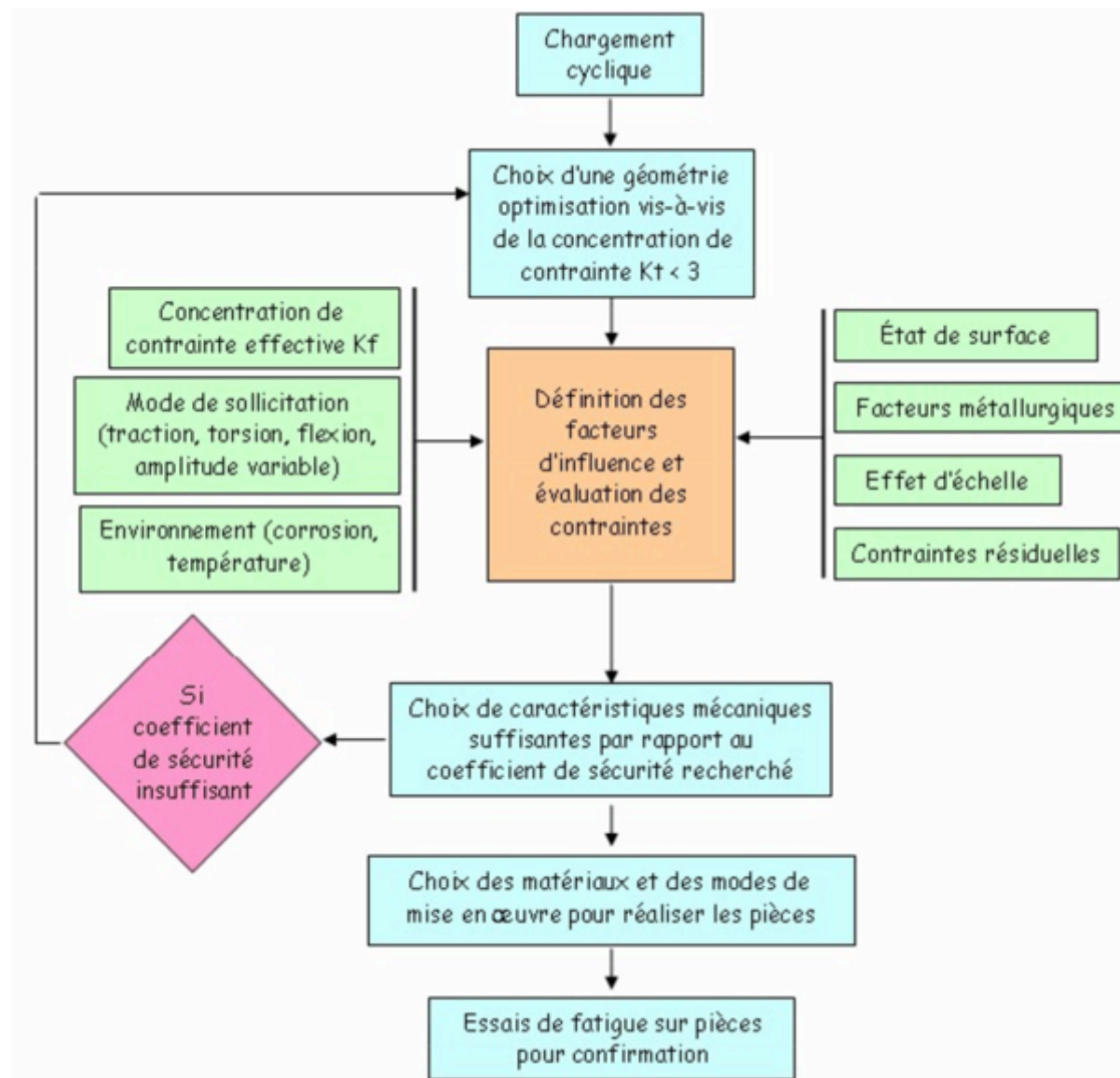








Démarche de conception et d'analyse d'une ruine (chemin inverse)



➤ Fatigue et Soudure

L'assemblage par soudure se caractérise par:

- ✧ Une méthodologie que nécessite une température très élevée dans une zone très localisée.
- ✧ Un fluage des efforts concentré dans la zone soudée.
- ✧ Des contraintes résiduelles après soudure.
- ✧ Une augmentation du grain, donc une augmentation de la fragilité de l'assemblage.

➤ *L'endommagement en fatigue des assemblages soudés est liés à de nombreux facteurs.*

La connaissance de ces facteurs permet l'expertise préalable ou celle consécutive à une ruine localisée.

☐ Géométrie / Fabrication

☐ Sollicitations

☐ Milieu

☐ Matériau / Fabrication

➤ *Géométrie / Fabrication*

- ✧ Forme des éléments au niveau de la liaison soudée (**effet géométrique**)
- ✧ Forme des cordons de soudure (**effet local**)
- ✧ Imperfection d'accostage et déformation de soudage
- ✧ **Défauts de surface** (stries de meulage etc)
- ✧ Effet d'épaisseur

➤ *Sollicitations*

Lors d'une expertise préalable, ce domaine n'est pas évident à appréhender.

Toutefois l'expérience, la notion des efforts en présence peut alerter l'Expert.

Après sinistre, il est nécessaire de quantifier le niveau de sollicitations mécaniques et les rapports de charge.

➤ *Milieu (liquide, gaz etc)*

✧ Corrosion

✧ Température et environnement liés au milieu

Ce sont deux facteurs prépondérants dans la résistance à la fatigue des assemblages soudés.

➤ *Matériau / Fabrication*

L'augmentation de la grosseur du grain est un facteur de fragilisation prépondérant, tout comme les contraintes résiduelles générées par l'action de soudage. Il faut donc s'intéresser aux traitements post-soudure.

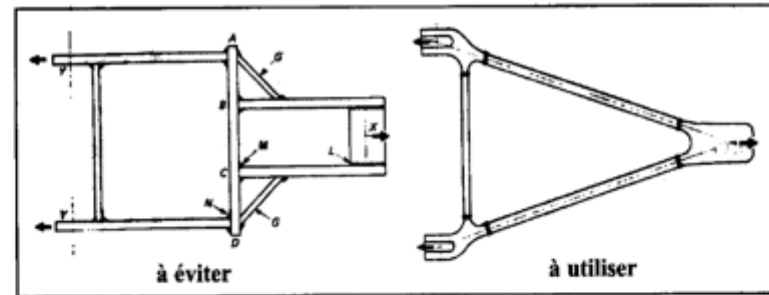
Plus les caractéristiques mécaniques d'un matériaux sont élevées plus sa résistance à la fatigue diminue.

➤ Repérer les désordres

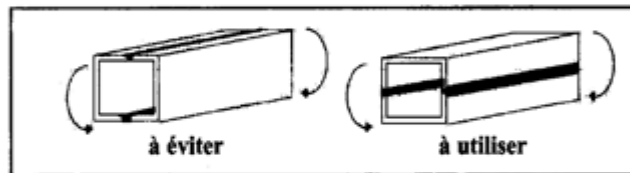
EXEMPLES



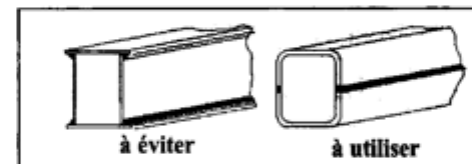
Gradient de contrainte



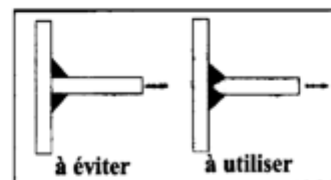
Remorque d'un tracteur.



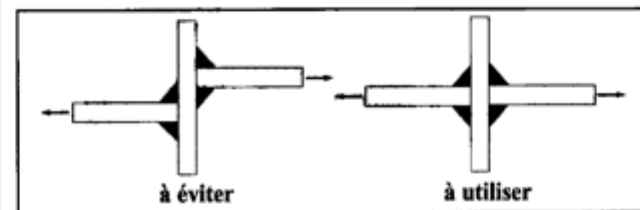
Exemple - mettre la soudure sur la fibre neutre dans le cas d'une poutre travaillant en flexion



Exemple de cas où les soudures d'angle peuvent être évitées



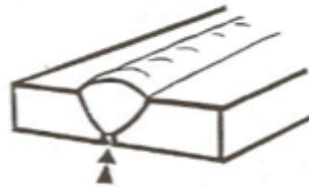
Soudure transmettant les efforts



Désalignement à éviter

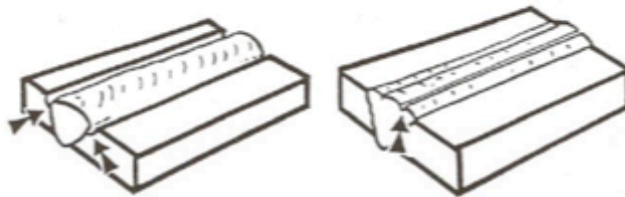
3.6 Manque de pénétration

Laisse subsister un interstice entre les bords à souder

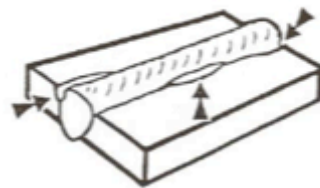


3.7. Caniveau et morsure

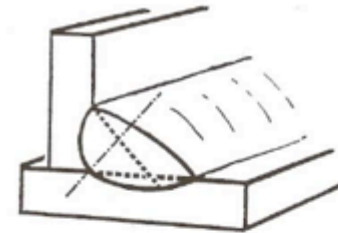
Caniveau : manque de métal en forme de sillon s'étendant sur une certaine longueur au bord du cordon.



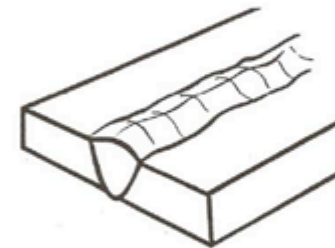
Morsure : manque local de métal soit en bord de cordon, soit au bord d'une passe dans le cas d'une soudure multipasse.



2.3.11. Défaut de symétrie

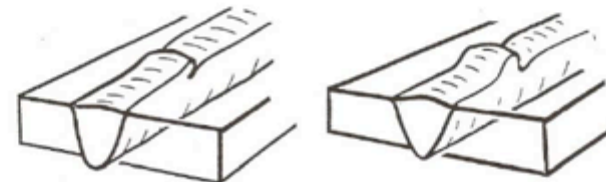


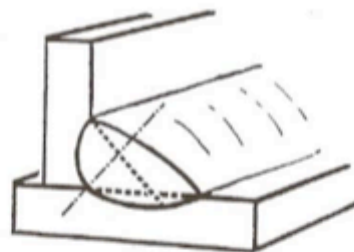
2.3.12. Surface irrégulière



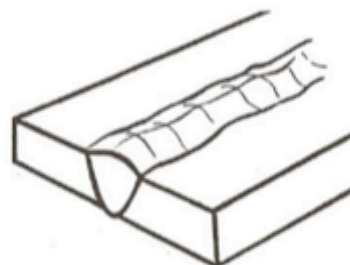
2.3.13. Mauvaise reprise

Irrégularité de la surface à l'endroit de la reprise.



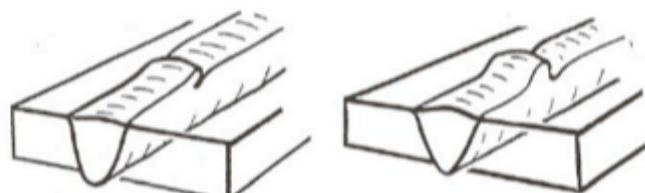


2.3.12. Surface irrégulière

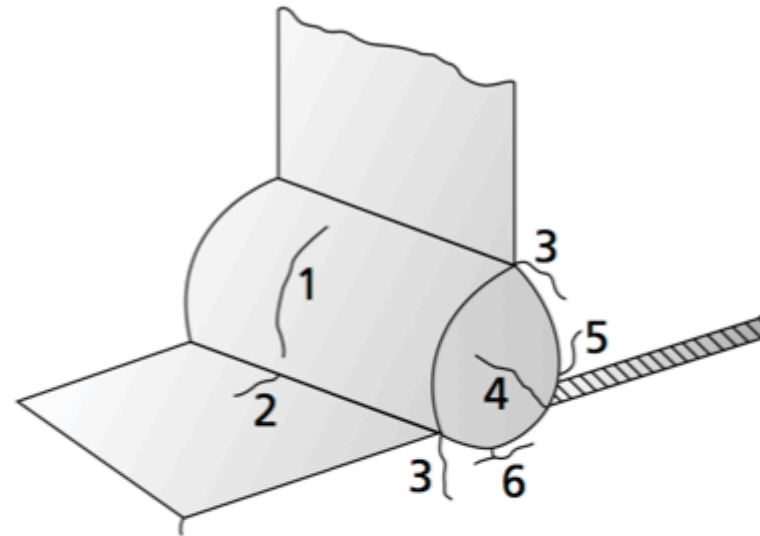
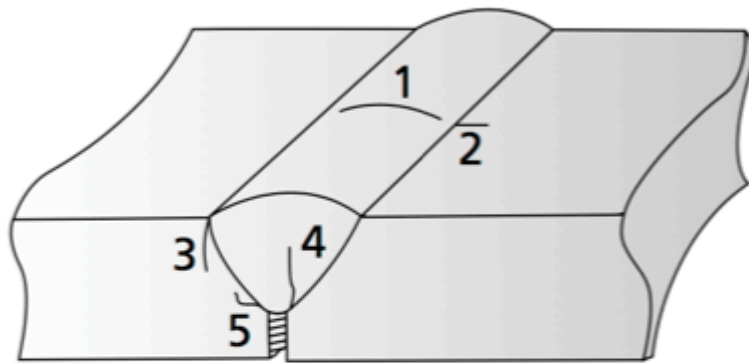


2.3.13. Mauvaise reprise

Irrégularité de la surface à l'endroit de la reprise.



➤ *Ou chercher les fissures éventuelles*



- 1) Fissures transversales dans la zone fondue
- 2) Fissures transversales dans la ZTA
- 3) Fissures dans la zone de liaison
- 4) Fissures dans la zone fondue
- 5) Fissures à la racine
- 6) Fissure sous le cordon

➤ *Les fissures*

Un fissure est l'élément physique déclencheur du début d'une ruine en fatigue.

Une fissure est par nature insidieuse, elle se loge souvent dans des zones peu accessible, et elle est très souvent pas visible à l'œil nu.

Il y a beaucoup de méthodes plus ou moins sophistiquées pour les repérer, la plus simple et la moins onéreuse est le test de ressuage.



*Toutefois, la main de Dieu
existe !!! Libre à chacun de
croire.*



Les essais de fatigue en laboratoire

« Courbes de Fatigue »

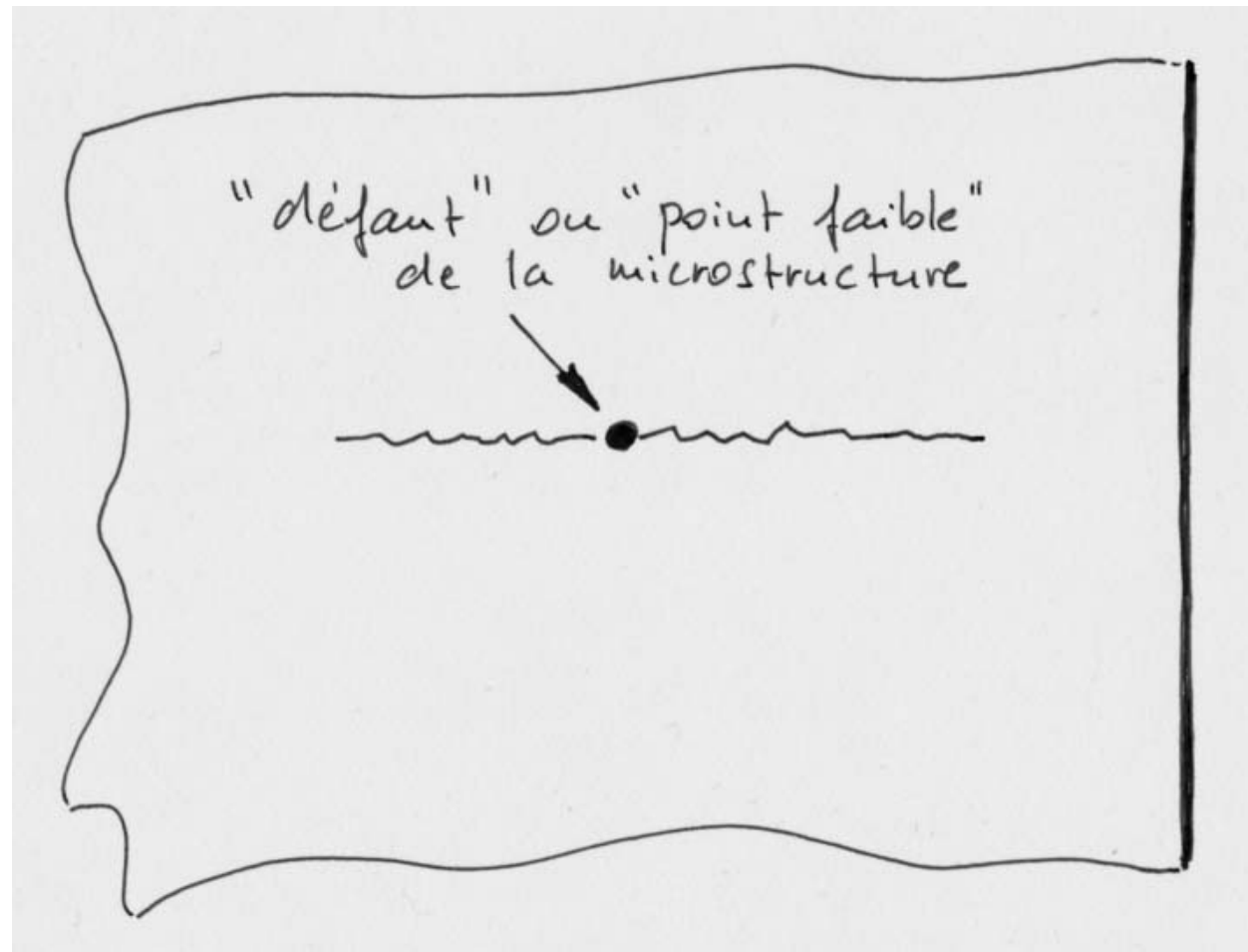
(S-N curves)

Hubert Schaff

hubert.schaff.conseil@orange.fr

06 80 93 81 39

Fatigue et Rupture finale



"Amorçage" d'une
fissure macroscopique

Propagation de la
fissure

Rupture brutale du
ligament restant

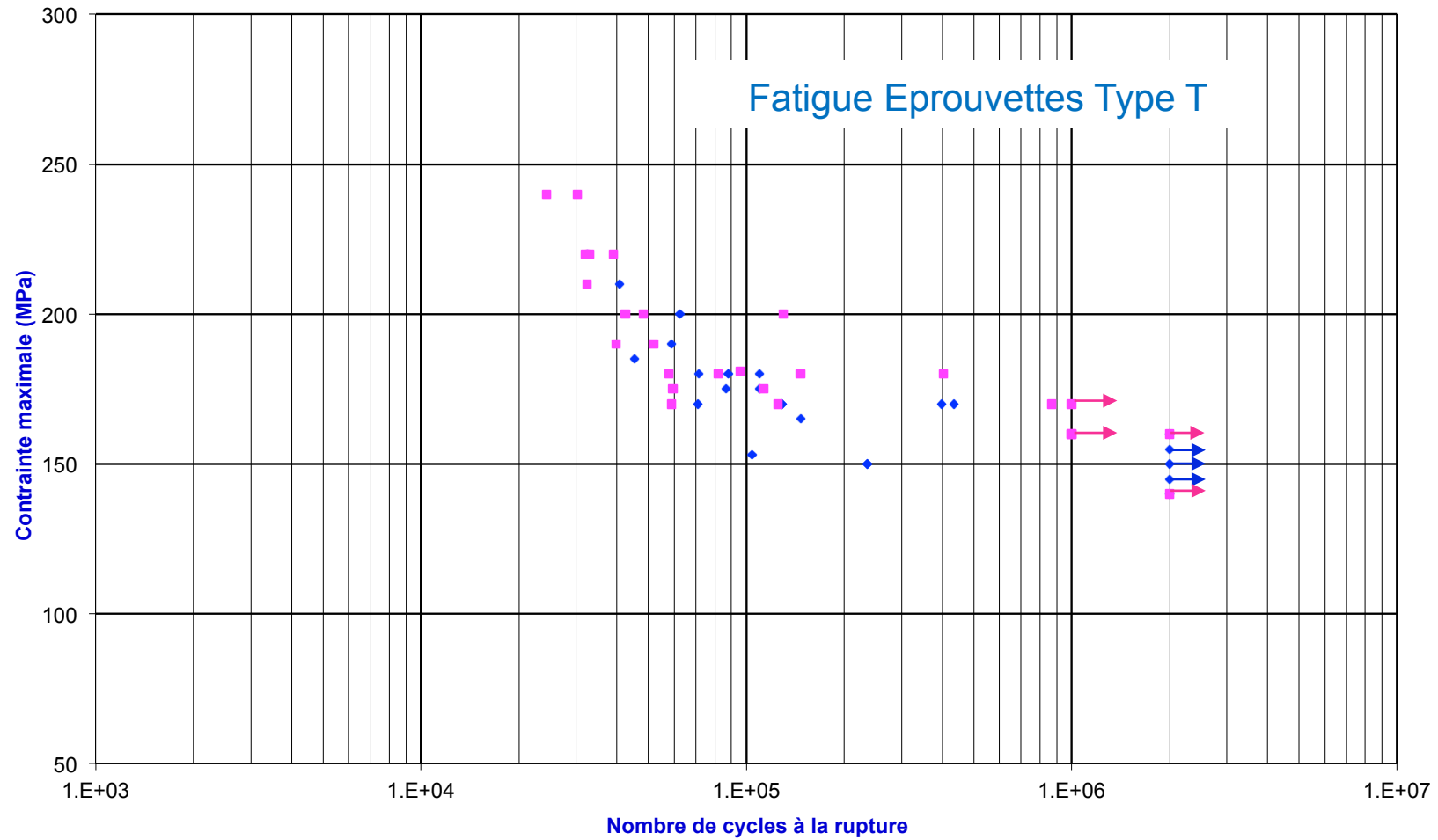
Calcul de fatigue : endurance

- Dans les Bureaux d'Etudes, il n'y a pas aujourd'hui d'outil simple pour faire des calculs de prévision de l'amorçage
- La prévision de la "résistance à la fatigue des structures" se fait à partir d'essais à rupture de petites éprouvettes (durée de vie totale) : les essais d'endurance.

Essais d'endurance

- Essai d'endurance : essai de fatigue jusqu'à rupture totale (petites éprouvettes) ou apparition d'une fissure évidente (grandes éprouvettes)
- L'essai d'endurance est une approximation de l'amorçage d'une fissure de fatigue. Cette approximation est admise parce que :
 - ✓ Dans le cas des petites éprouvettes de laboratoire, le nombre de cycles correspondant à la propagation de la fissure macroscopique en fin d'essai est faible comparé au nombre de cycle total
 - ✓ On applique un facteur de sécurité dans ce type de calcul

Courbe de Fatigue



Quel essai ?

Types de machine d'essai

Flexion Rotative



Machine PRODIDAC

Machine de Fatigue Axiale:

traction-compression, traction ondulée ...etc



Machine INSTRON

Paramètres de l'essai d'endurance

- S , N
 - ✓ Quelle géométrie d'éprouvette ? (lisses ou entaillées)
 - ✓ Quel cyclage en fatigue ? (Traction-Compression, Traction Ondulée ...etc)
 - ✓ Quel mode de sollicitation ? (Axial, flexion rotative ...etc)

Eprouvettes lisses ou entaillées

4 éprouvettes usuelles en aéronautique

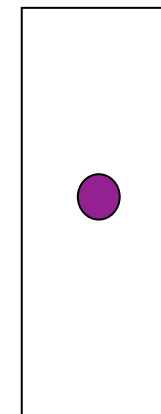
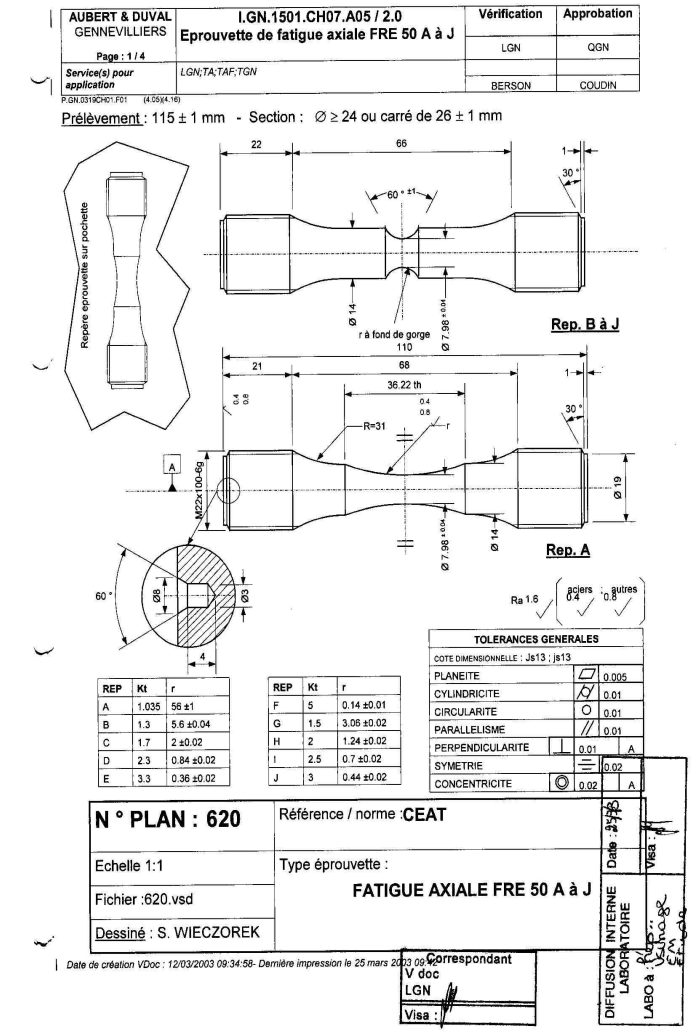
- Cylindriques

$$K_t = 1,035$$

$$K_t = 1,7$$

$$K_t = 3,3$$

- Plates : "à trou" ou "type T"



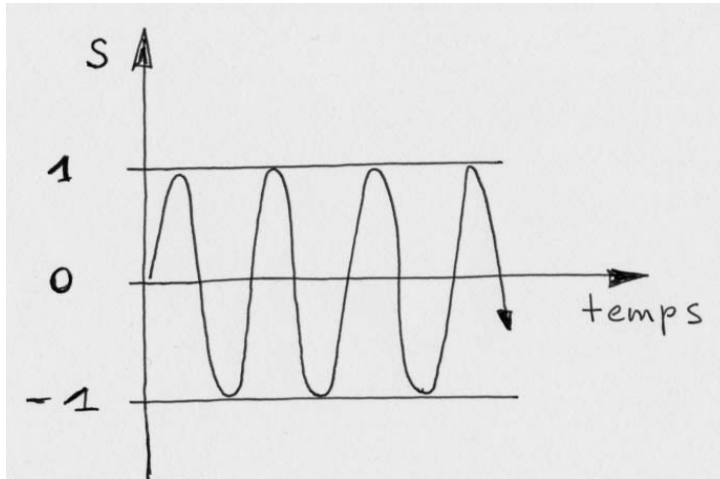
Quel cycle de contrainte ?

Rapport R :

$$R = S_{\min} / S_{\max}$$

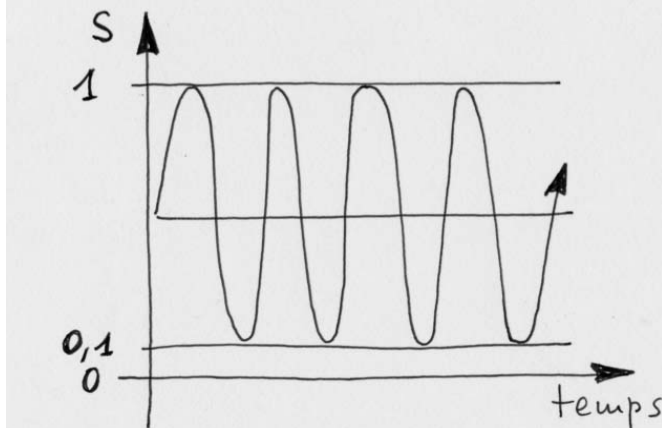
Traction-Compression (symétrique)

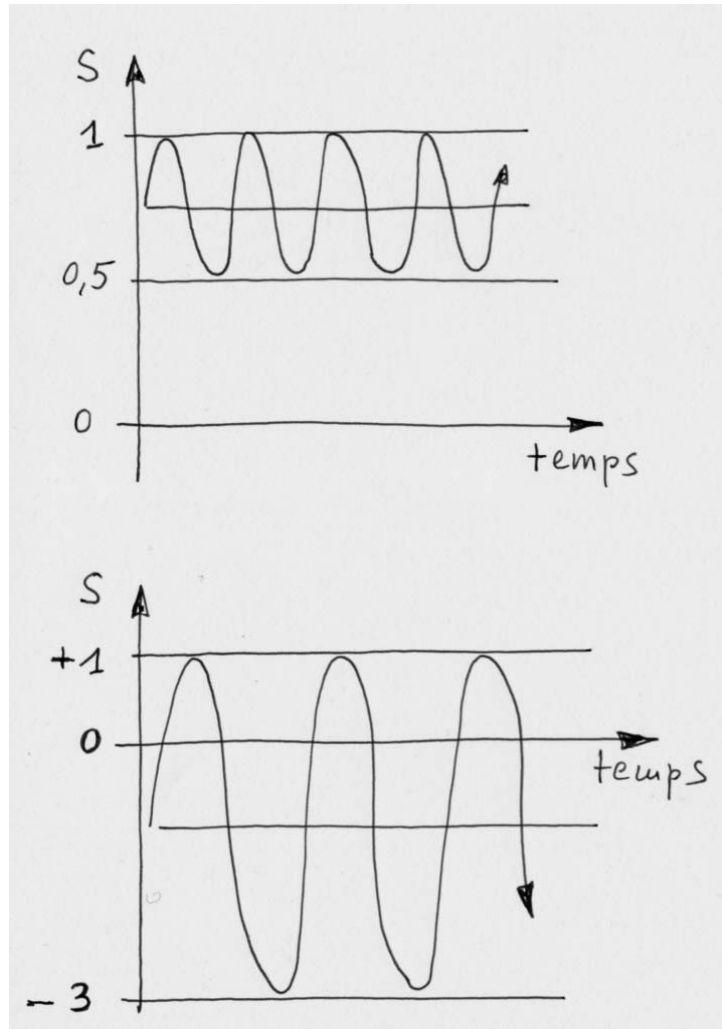
$$R = -1$$



Traction Ondulée

$$R = 0,1$$





$$R = 0,5$$

Traction Ondulée à forte
contrainte moyenne

$$R = -3$$

Traction-Compression à
contrainte moyenne négative

Données de fatigue complètes pour 1 matériau :

un ensemble de courbes de fatigue

- "Lois" de fatigue complète pour un matériau

20 éprouvettes par courbe

4 Kt

4 Rapports R

16 courbes

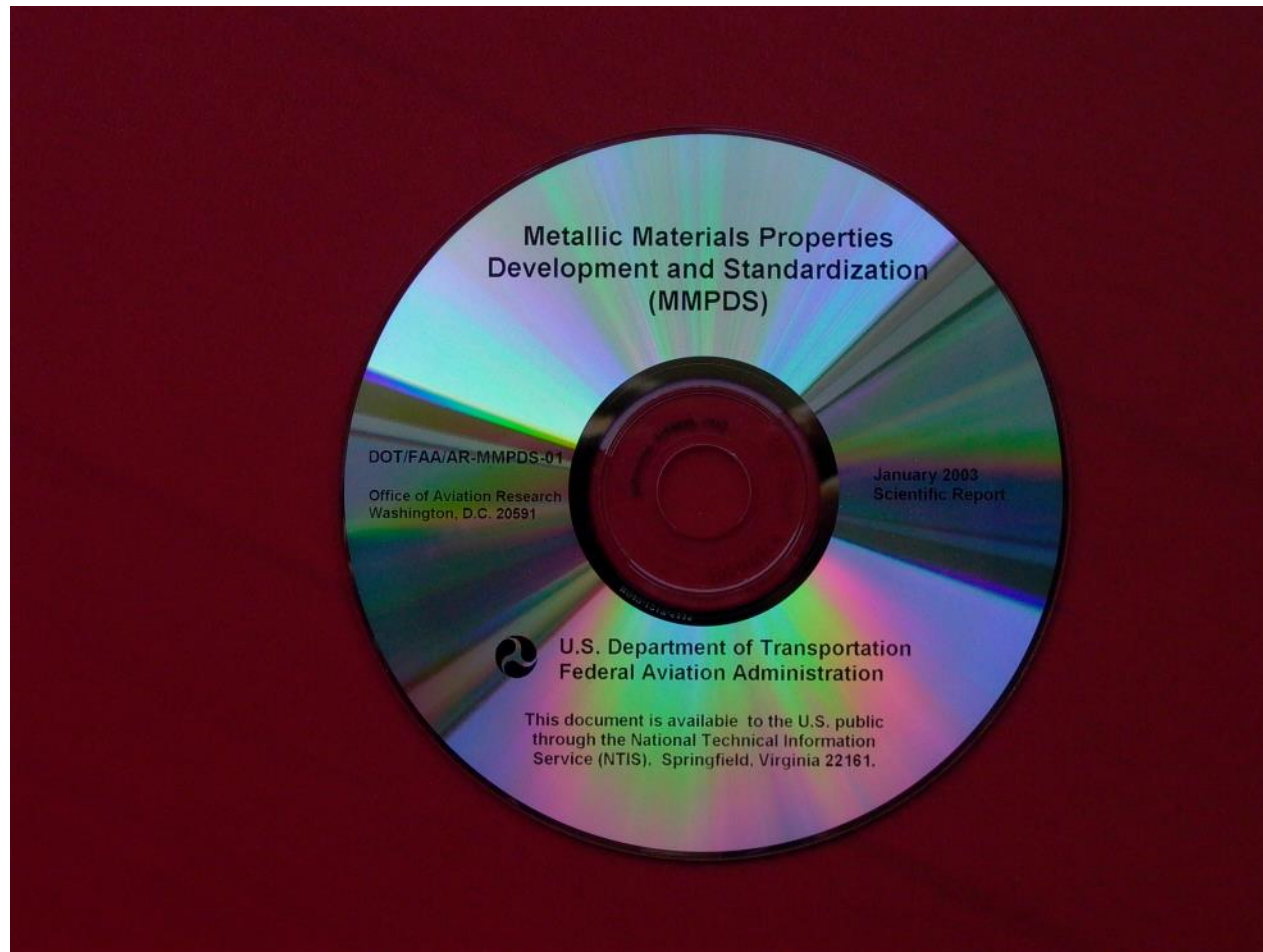
320 éprouvettes !!!

- On fait un calcul de cumul de dommage avec la « *règle de MINER* » : endommagement proportionnel au nombre de cycle lu sur la courbe de fatigue correspondant au cas étudié.

« *lois de fatigue* » complètes

Il y a plusieurs façons de présenter graphiquement les faisceaux de courbes de fatigue. Aujourd'hui, ces *lois* sont mises dans des bases de données numériques qui permettent les interpolations en rapport R et en Kt.

Handbooks : exemple du MMPDS



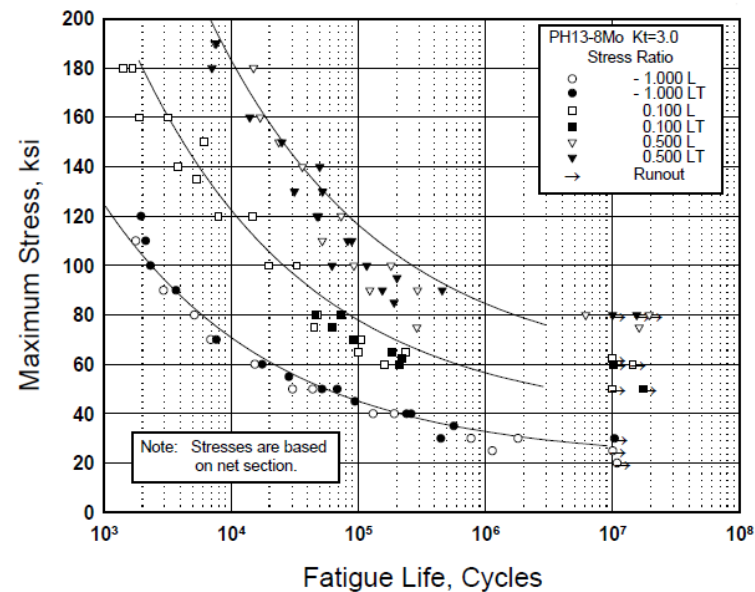


Figure 2.6.6.1.8(b). Best-fit S/N curves for notched, $K_t = 3.0$, PH13-8Mo (H1000) forged bar, longitudinal and long transverse directions.

Correlative Information for Figure 2.6.6.1.8(b)

Product Form: Forged bar, 4 x 5 and 2 x 6 inches

Properties: TUS, ksi 205 TYS, ksi 197 Temp., °F RT

Specimen Details: Notched, $K_t = 3.0$

Gross Diameter	Net Diameter	Notch Root Radius
0.750	0.252	0.013
0.500	0.250	0.013

60° flank angle

Surface Condition: Notch was polished with abrasively charged wire and rotating wire with oil and aluminum grit

References: 2.6.6.1.8(a), 2.6.6.1.8(b), 2.6.6.1.8(d)

Test Parameters:

Loading - Axial

Frequency - Not Specified

Temperature - RT

Environment - Air

No. of Heats/Lots: 4

Equivalent Stress Equation:

$$\log N_f = 9.90 - 3.13 \log (S_{eq} - 34.4)$$

$$S_{eq} = S_{max} (1 - R)^{0.68}$$

Std. Error of Estimate, $\log (\text{Life}) = 23.1 (1/S_{eq})$

Standard Deviation, $\log (\text{Life}) = 1.15$

$$R^2 = 92\%$$

Sample Size: 104

[Caution: The equivalent stress model may provide unrealistic life predictions for stress ratios beyond those represented above.]

Résistance à la fatigue

En plus de la connaissance exacte du Matériau, 6 points à respecter lors de la conception des pièces mécaniques critiques en fatigue

Pièce critique en fatigue = 6 facteurs critiques

- Un matériau sans **sites d'amorçage internes** évidents : pas de porosité, propreté inclusionnaire correcte, pas de pollution par des corps étrangers.
- Un bon **état de surface** : pas de stries d'usinage perpendiculaires à l'axe des efforts (si possible, polissage avec stries dans l'axe des efforts)
- Un matériau non-**dénaturé en surface** : pas d'échauffement à l'usinage, pas de traitement de surface qui provoque des attaques chimiques à l'échelle de la microstructure....etc
- Pas de **contraintes résiduelles** (contraintes internes à la pièce lorsqu'elle n'est pas soumise à un effort externe) **de traction**. Si possible, trouver des gammes de fabrication qui développent des contraintes de compression dans les zones critiques en fatigue.
- Des **contraintes modérées**. Il est difficile d'atteindre une bonne garantie de résistance à la fatigue avec des contraintes supérieures à 50% de la résistance à la traction.
- Pas de dégradation de la surface en service : **FRETTING, Corrosion** (en particulier corrosion par piqûres sur certains inox)