

RUPTURES D'ORGANES DE MACHINE

cas des arbres épaulés-clavetés

**par G. Perraudin
(CETIM, Senlis)**



Les conséquences des ruptures de pièces sont très variables et vont du coût du simple remplacement de la pièce détériorée et de l'immobilisation d'une machine aux accidents graves provoquant des pertes en vies humaines. L'analyse morphologique des cassures permet dans de nombreux cas de déterminer les causes de rupture et par là même d'y remédier.

Depuis 1970, nous avons pu, dans le cadre d'assistances techniques réalisées dans les laboratoires du CETIM, étudier des cas d'incidents ou d'avaries survenus à des éléments de machines ou d'engins utilisés dans les industries mécaniques. Leur examen a fait ressortir l'importance de ce point de vue des effets d'entailles (changement de section, rainure, gorge, accident d'usinage) et des défauts de tracé des pièces, qui représentent à eux seuls 40 % des causes de ruptures. A l'intérieur de ce pourcentage, 30 % représentent les ruptures survenues aux arbres épaulés-clavetés et dues en général à des concentrations de contraintes provenant de la superposition de la rainure de clavetage avec des changements de section plus ou moins bien rayonnés.

Dans le dernier numéro de ce bulletin (n° 53) nous avons publié un article sur les règles pratiques de positionnement des rainures de clavetage dans le cas des arbres épaulés-clavetés. Cet article était illustré de quatre exemples-types de rupture. Dans le présent numéro nous publions cinq autres cas parmi les plus caractéristiques que nous ayons eus à connaître. Dans un prochain numéro nous en publierons trois autres.

Rappelons à ce propos que c'est toujours avec l'accord de l'entreprise, pour laquelle le travail a été réalisé, que nous publions les extraits d'exemples réels insérés dans ces colonnes.

PIGNON ARBRÉ

(Planche 5)

Conditions de fonctionnement

Les caractéristiques d'utilisation sont fournies par le bureau d'études du constructeur.

- Couple de torsion normal : 255 m.daN
- Couple de torsion en virage : 303 m.daN
- Marche normale : 180 CV à 500 tr/mn
- Marche en virage : 15 CV à 36 tr/mn
- Couple au démarrage : 612 m.daN.

D'après leur bureau d'études la contrainte de flexion varie entre ± 16 daN/mm² et celle de torsion a une valeur de 2 daN/mm².

Il est à noter que malgré l'ouvrage de Peterson, il n'est pas possible de calculer un coefficient de concentration de contraintes dû à la juxtaposition du changement de section et de la rainure de clavetage.

Analyse morphologique

La rupture est localisée suivant le schéma correspondant ci-contre et correspond au changement de section ($\varnothing 120$, $\varnothing 90$). La surface de rupture, perpendiculaire à l'axe du pignon arbré, est caractéristique d'une rupture de fatigue qui présente deux zones :

Zone I : surface lisse où l'on note la présence des lignes d'arrêt concentriques à l'amorce de la cassure située en A et dérivant (vers une zone meulée) en fonction du sens de rotation. La fissure progresse sous l'action de contraintes de flexion rotative.

Zone II : surface à grains fins ne présentant pas de caractères particuliers de fragilité.

Remarque : D'après la vue F' on notera dans la zone proche de la rupture, l'aspect relativement grossier de l'usinage par tournage.

Commentaires

L'arbre est suffisamment dimensionné mais on peut difficilement évaluer le coefficient de sécurité à adopter en raison de l'absence de renseignements sur le phénomène de concentration de contraintes dans ce cas précis de traversée d'une zone perturbée par une rainure de clavetage.

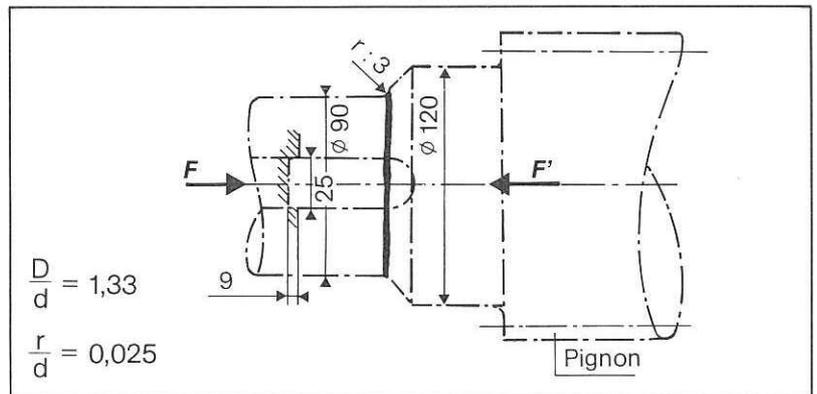
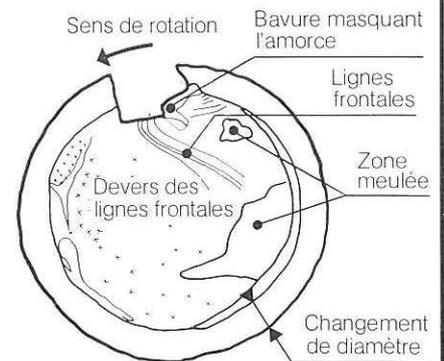


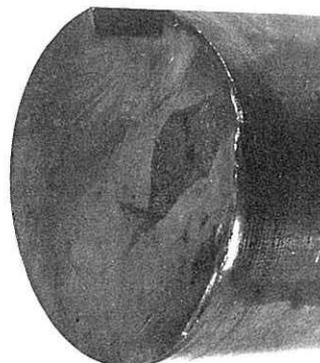
Schéma de localisation de la rupture



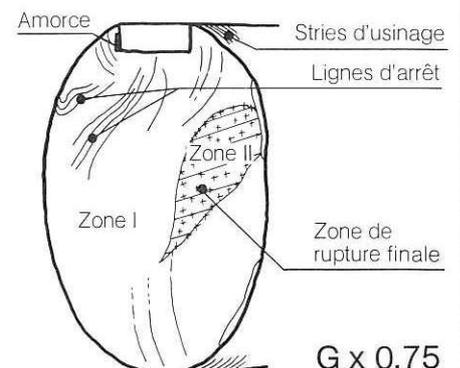
Vue suivant F



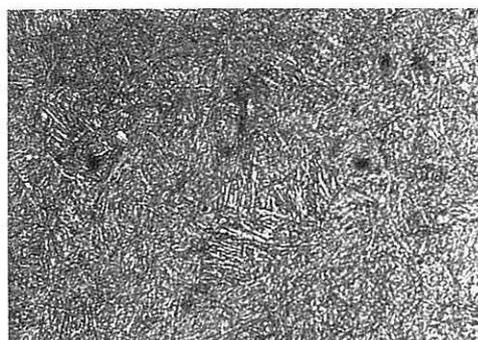
G x 0,75



Vue suivant F'



G x 0,75



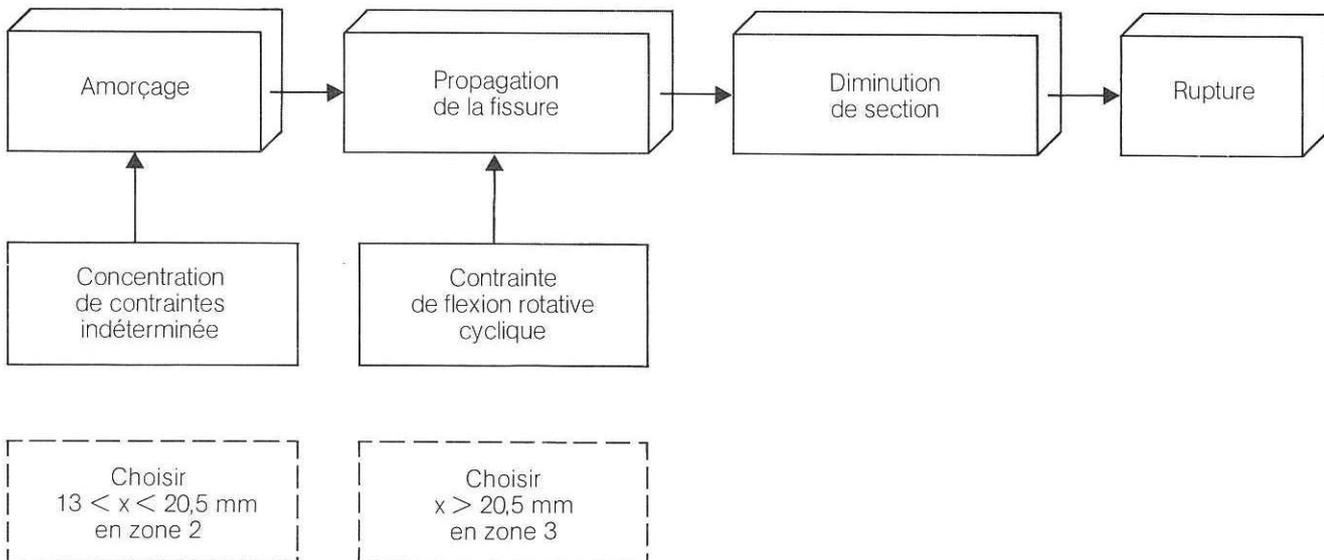
Structure de type sorbitique caractéristique d'un traitement de trempe et revenu.

G x 500
Attaque Nital

Essai de traction

R (hbar)	R _e (hbar)	A (%)	Z (%)
100	79	10	40

Schéma de la dégradation



Analyse chimique

Repère (%)	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo
Pignon arbré	0,27	0,28	0,47	0,007	0,011	2,12	2,07	0,37
Nuance normalisée	0,26 0,33	0,10 0,40	0,30 0,60	0,02 max	0,030	1,8 2,2	1,8 2,2	0,35 0,50

L'analyse chimique indique une nuance normalisée conforme au plan (30 CND 8) d'après NFA 35 551.

Examens micrographiques

La structure de type sorbitique n'appelle pas de commentaires particuliers.

Mesure de dureté

La moyenne arithmétique de cinq essais de dureté Brinell réalisés suivant NFA 03 153 est de :

HB = 321

ARBRE DE POMPE

(Planche 6)

Conditions de fonctionnement

Nous ne connaissons pas les caractéristiques d'utilisation de la pompe.

Les cotes notifiées au schéma sont celles que nous avons mesurées sur les fragments.

Analyse morphologique

La rupture est localisée suivant le dessin ci-contre au changement de section exempt de tout congé de raccordement.

La surface de cassure, perpendiculaire à l'axe de l'arbre, présente les deux zones caractéristiques des ruptures de fatigue.

Zone I : zone de fissuration progressive très lisse et quelque peu matée. Ces lignes montrent que la fissuration de fatigue a pris naissance au changement de section et leur déportement (non concentricité et non circularité) s'explique par la rainure de clavetage qui modifie la répartition des contraintes.

Zone II : zone de rupture finale. Elle intervient au centre de la surface et se produit lorsque la section de l'arbre devient insuffisante pour résister aux efforts auxquels il est alors soumis.

Remarque

La surface de la zone II, de faible étendue, indique que la pièce n'était pas surchargée et que les raisons de la rupture sont à rechercher dans la concentration de contraintes au droit du changement de section. Le caractère "maté" de la surface ne permet pas de déterminer avec précision le rôle de la rainure de clavette, mais on peut penser que dans cet exemple l'amorçage s'est produit sur la circonférence de fond d'entaille.

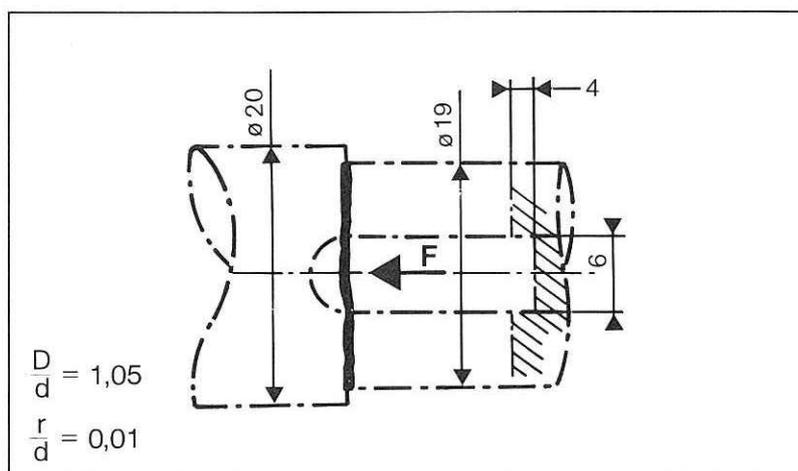


Schéma de localisation de la rupture.

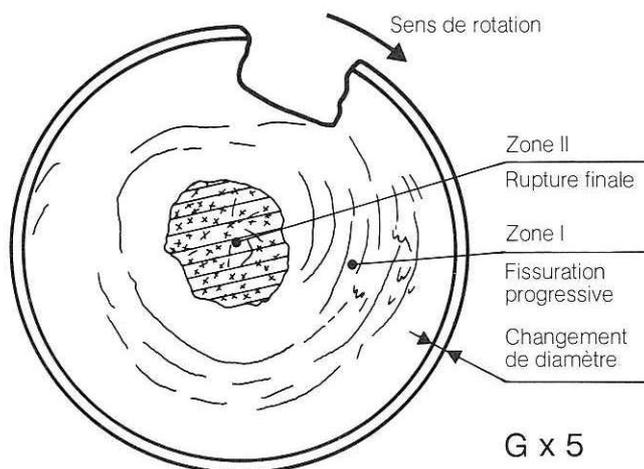
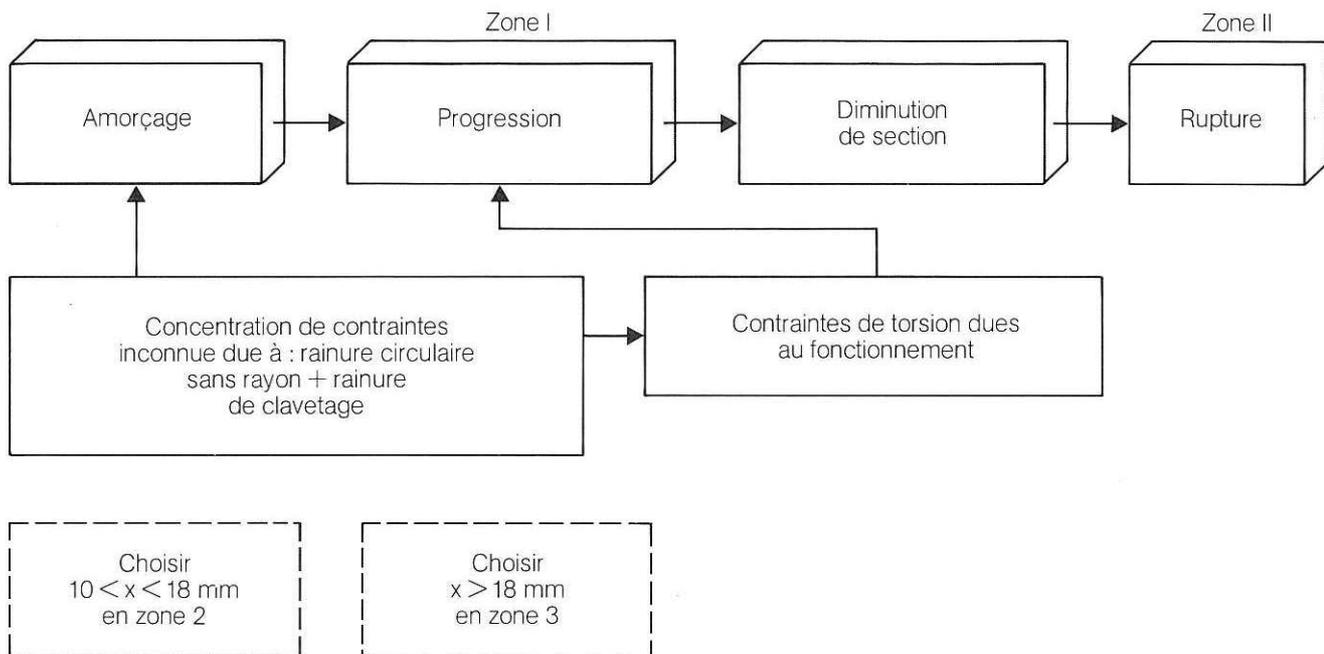


Schéma de la dégradation**Analyse chimique**

Repère	%	C	S	Si	Mn	P	Ni	Cr	Mo
Arbre de pompe		0,20	0,015	0,84	0,48	0,08	0,27	13	0,02
Nuance normalisée NFA 35 572 Z 20 C 13		0,15 0,24	≤ 0,03	≤ 1	≤ 1	0,040	1	12 à 14	–

ARBRE DE VOLANT

(Planche 7)

Conditions de fonctionnement

Nous n'avons pu obtenir ni les couples de démarrage et de fonctionnement, ni les conditions d'utilisation exactes.

Le schéma coté est relevé par nos soins sur les fragments de la pièce.

Analyse morphologique

La trace de rupture représentée ci-contre est dite à "bec". Elle est caractéristique d'une rupture se produisant sous l'action de contraintes alternées de torsion.

La cassure présente deux zones asymétriques d'aspect lisse sur lesquelles on distingue surtout des lignes radiales.

Ces deux zones se développent selon deux surfaces hélicoïdales inclinées à 45° par rapport à l'axe.

La présence de ces fissurations progressives primaires a engendré un amorçage suivi d'une propagation de fissures secondaires (opposées géométriquement).

On remarque que les amorces sont localisées suivant une même section (tracé du plan suivant A-A) qui correspond sensiblement à la position de la clavette.

On note d'autre part, la présence de traces de fretting corrosion dans la zone d'amorce. Ce phénomène, lié aux contraintes superficielles de torsion dues au clavetage, est ajouté à la concentration de contraintes due au filetage, au congé ou au clavetage coupant le filetage.

Examen micrographique

L'examen micrographique réalisé à cœur de l'arbre révèle une structure composée de ferrite et perlite.

Mesure de dureté

Moyenne arithmétique de 5 essais de dureté Vickers NFA 03 154 sous 30 daN :

HV₃₀ = 290

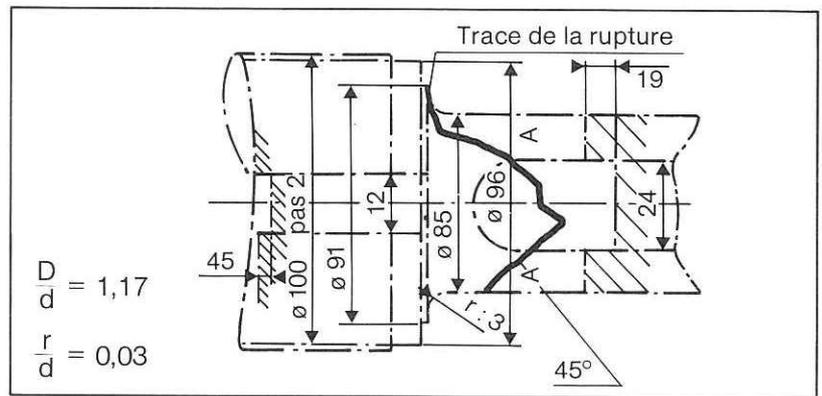
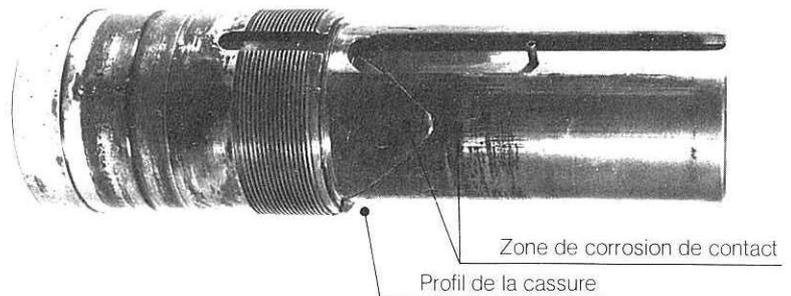


Schéma de localisation de la rupture



Fissuration progressive amorcée suivant le diamètre AA du schéma.

Fissurations secondaires typiques de zones "chargées".

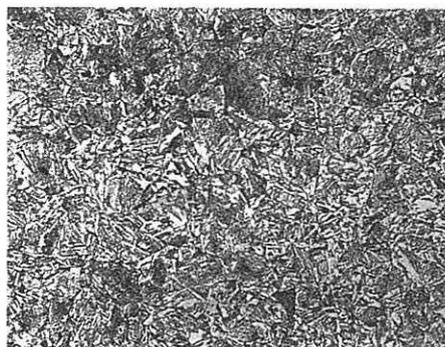
On remarque les lignes radiales très prononcées et la présence de quelques zébrures.



Examen micrographique du cœur de l'arbre.

Structure hybride composée de ferrite perlite.

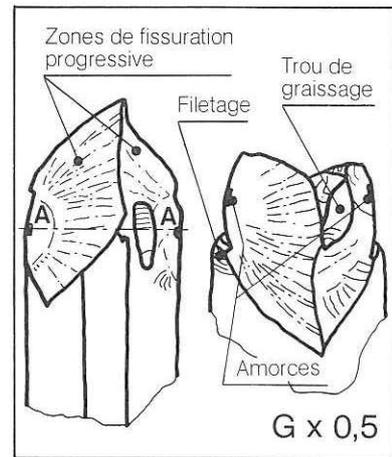
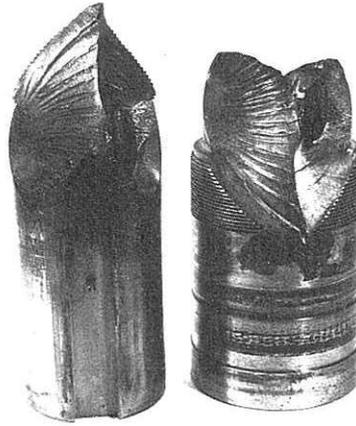
G x 500
Attaque Nital



Commentaires

La rupture de l'arbre n'est pas imputable au matériau, mais bien à des conditions de fonctionnement anormales. L'arbre est monté avec un serrage de 0,02 à 0,03.

La présence de corrosion de contact laisse supposer que la partie femelle présentait une "entrée" très légèrement conique. De ce fait, les micro-battelements relatifs des deux pièces ont provoqué une corrosion de contact d'où une usure accompagnée de micro-soudures locales qui lors d'un démarrage de la ligne d'arbre ont entraîné des fissures locales qui par la suite se sont propagées par fatigue.



Amorce secondaire située dans le même plan que l'amorce initiale, consécutive à la fissuration progressive.

Sur cette surface le caractère de fatigue est très marqué.

(Lignes frontales concentriques à la nouvelle amorce).

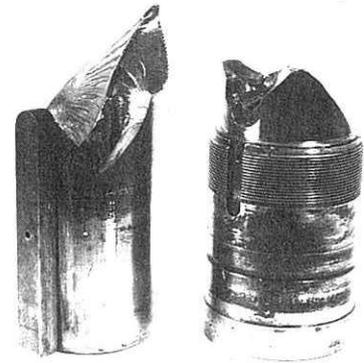
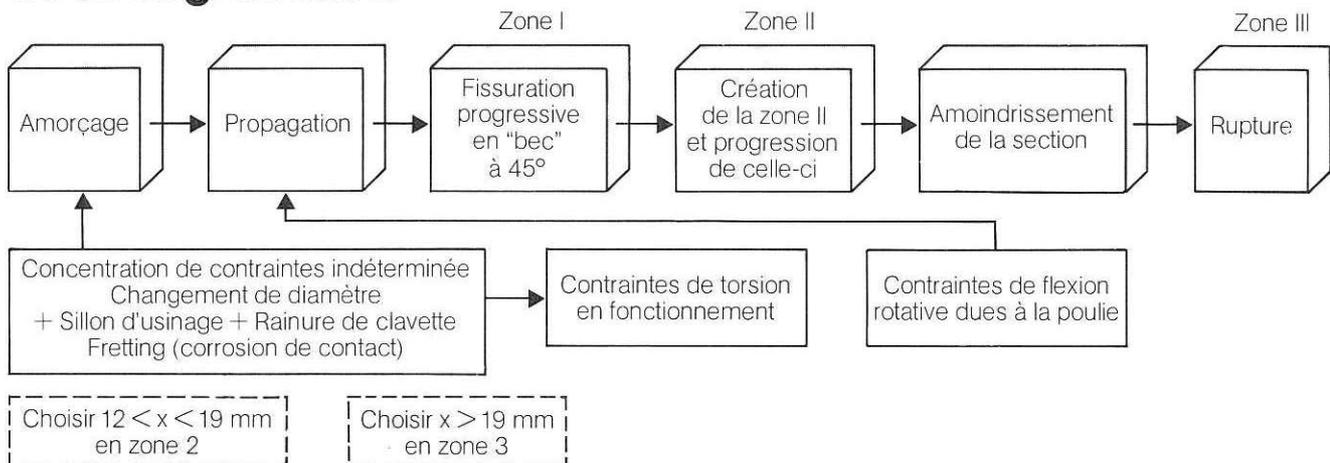


Schéma de la dégradation



Analyse chimique

Repère	(%)	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo
Arbre analysé		0,31	0,40	0,29	0,009	0,010	3,05	0,88	<0,05
NFA 35 551		0,27	0,35	0,10	0,035	0,035	2,50	0,6	-
Nuance		0,34	0,60	0,40	max	max	3	0,9	-
30 NC 11									

Examens micrographiques

Les examens micrographiques sont réalisés suivant des coupes méridienne et perpendiculaire à l'axe de l'arbre et ne mettent pas en évidence d'anomalie structurale.

Structure hybride perlito-ferritique caractéristique d'un traitement de recuit.

Mesure de dureté

Moyenne arithmétique de 5 essais de dureté HB (NFA 03 153) réalisés avec une bille de 10 mm.

HB = 210

ARBRE D'ACCOUPLLEMENT

(Planche 8)

Conditions de fonctionnement

Nous n'avons pu obtenir de renseignements sur les conditions exactes d'utilisation.

Analyse morphologique

La cassure est localisée, comme le montre le schéma, au droit d'un changement de section.

La surface de cassure, bien que détériorée, présente les deux zones caractéristiques des ruptures de fatigue par fissuration progressive sous l'action de contraintes cycliques de flexion rotative.

La ligne radiale proche de l'angle de la rainure de clavetage indique une augmentation locale de la contrainte.

Commentaires

La pièce rompue n'est pas réalisée conformément au dessin de définition qui nous a été fourni.

La rainure de clavetage ne doit pas intercepter le changement de section. C'est cette "erreur" qui semble être la cause primordiale de la rupture.

Le changement de diamètre est, d'autre part, séparé par une saignée à angles vifs qui multiplie les risques d'avarie à ces emplacements.

Remarque

A la demande du ressortissant, il n'a pas été effectué d'examen complémentaires.

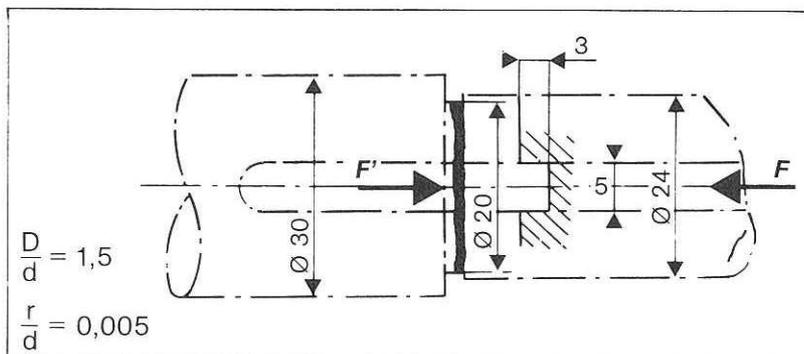
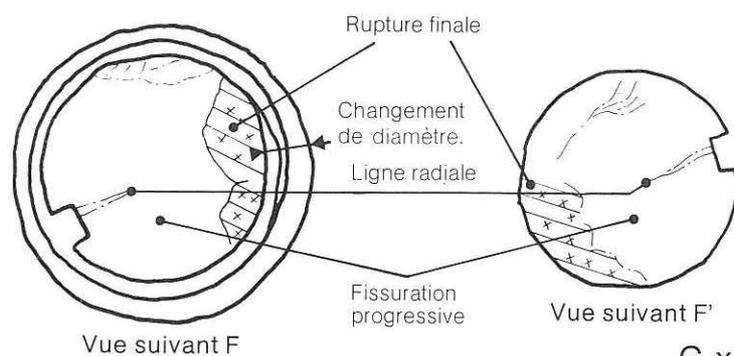


Schéma de localisation de la rupture.



G x 2

ARBRE INTERMÉDIAIRE DE RÉDUCTEUR

(Planche 9)

Conditions de fonctionnement

Le demandeur n'a pu nous fournir d'autres éléments que le plan de l'arbre qui précisait :

- presse : 320 tonnes
- nuance : XC 45

Remarque :

Les clavettes devront être usinées et montées très soigneusement en raison des efforts à transmettre.

Analyse morphologique

Le premier cliché ci-contre donne une vue d'ensemble de l'avarie survenue à l'arbre intermédiaire.

On remarque deux zones bien distinctes de l'arrachement du bord de la rainure de clavetage.

La zone de fissuration progressive d'aspect lisse à grain fin est localisée à l'intersection du raccordement rayonné entre les deux diamètres de l'arbre intermédiaire et la rainure de clavetage.

La zone II, de surface plus importante, présente des arrachements longitudinaux à facettes.

L'arrachement initial sous-jacent à la zone de fissuration progressive s'initie et se propage le long de l'angle vif de la rainure de clavetage.

Les multiples "escaliers" supérieurs sont imputables aux battements de la clavette.

Remarque

L'orifice au fond de rainure n'a été foré que pour le démontage de l'arbre.

A la demande de notre ressortissant, nous n'avons pas réalisé d'examen complémentaires.

Schéma de localisation de la rupture

