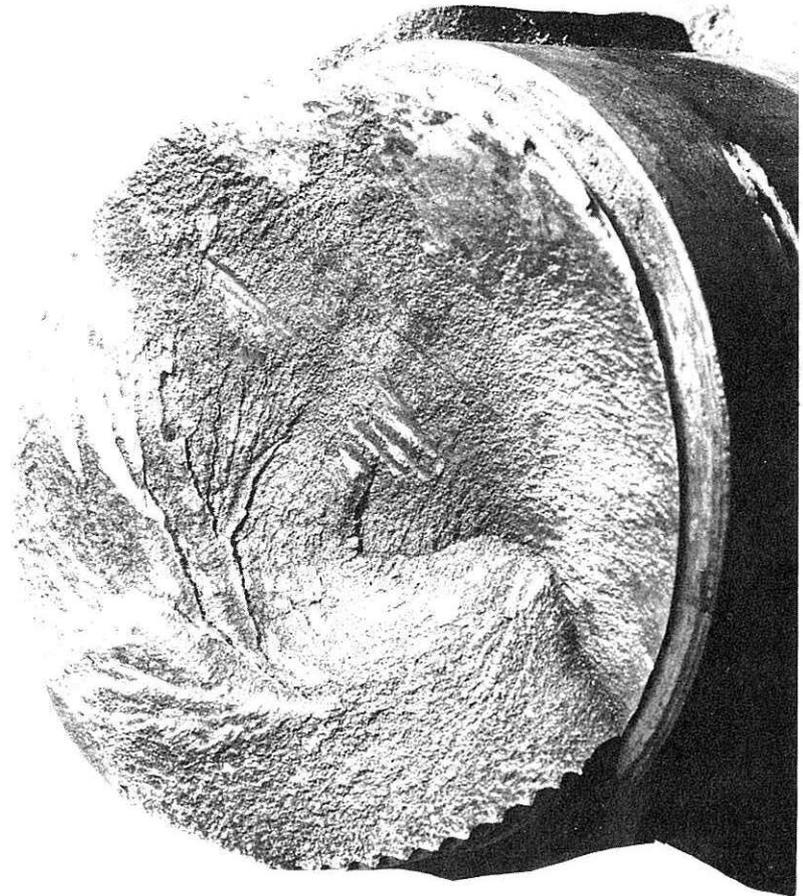


RUPTURES D'ORGANES DE MACHINE :

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 les deux derniers numéros de ce bulletin (n° 53 et 54) nous avons donc repris la publication des exemples-types de rupture () en choisissant 12 cas concrets d'arbres épaulés-clavetés parmi les plus caractéristiques que nous ayons eus à connaître. 9 ont déjà été publiés, les trois derniers le sont aujourd'hui. 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.*

Pour compléter cet ensemble, nous publions pages précédentes le début d'une troisième série d'exemples-types d'avaries de pièces ou d'organes mécaniques. Cette série, qui s'étendra sur deux numéros de ce bulletin, concerne les avaries résultant de la corrosion localisée. Elle est illustrée, comme celles qui l'ont précédée, par des analyses de cas concrets facilitant la compréhension du phénomène.

Cette troisième série terminée, nous souhaitons poursuivre bien sûr, mais cette fois-ci en répertoriant les exemples, non plus par causes d'avaries mais par familles de pièces. Si cette idée vous paraît intéressante ou si vous souhaitez que d'autres thèmes qui vous concernent plus directement soient traités, nous vous demandons bien entendu de nous le faire savoir.

(*) Pour la première série d'exemples, voir CETIM-Informations n° 36 à 42.

ARBRE DE ROTOR D'UN CONCASSEUR A PERCUSSION

(Planche 10)

Conditions de fonctionnement

Les caractéristiques d'utilisation fournies sont les suivantes :

- l'arbre entraîne une poulie de $\varnothing 1000$ mm,
- vitesse de rotation : 700 tr/mn,
- rupture après 1 000 heures de service,
- diamètre de l'arbre : 144 mm.

Analyse morphologique

La rupture est localisée suivant le dessin ci-contre. Il existe dans ce congé de raccordement des sillons d'usinage qui n'améliorent pas la bonne tenue de la pièce en service. De la seule surface rompue, on remarque une fissure qui est orientée suivant un angle à 45° de la génératrice.

La surface de cassure présente trois zones distinctes :

Zones I et II :

Zones de fissuration progressive d'aspect lisse et soyeux avec présence de lignes d'arrêt.

La zone I est caractéristique d'une fissuration qui s'amorce sur le coup d'outil localisé du congé de raccordement et progresse sous l'action de contraintes de torsion en formant des "becs" (voir schéma montrant le profil de la cassure).

La zone II initiée à partir des fissures de la zone I progresse sous l'action de contraintes de flexion.

Zone III :

Zone à grains fins qui correspond à la rupture finale. Cette zone présente encore des lignes d'arrêt. La géométrie plus tourmentée de ces lignes est imputable à la fissure radiale (intéressant l'angle vif de la clavette - voir cliché) orientée à 45° par rapport à la génératrice comme le montre le schéma.

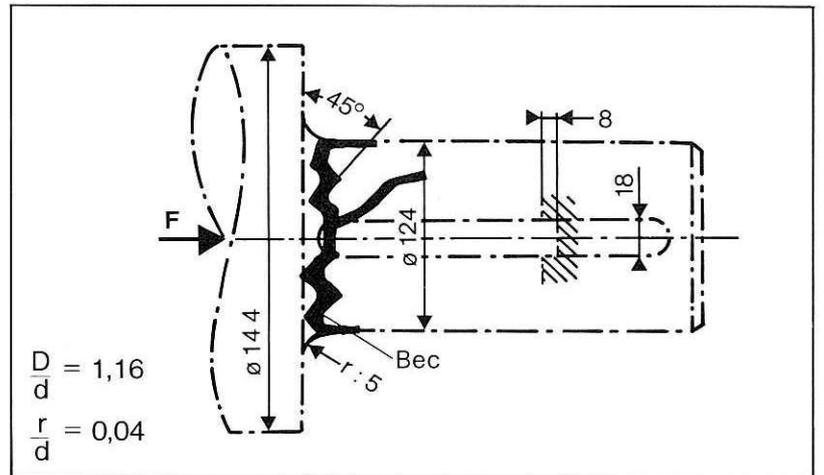
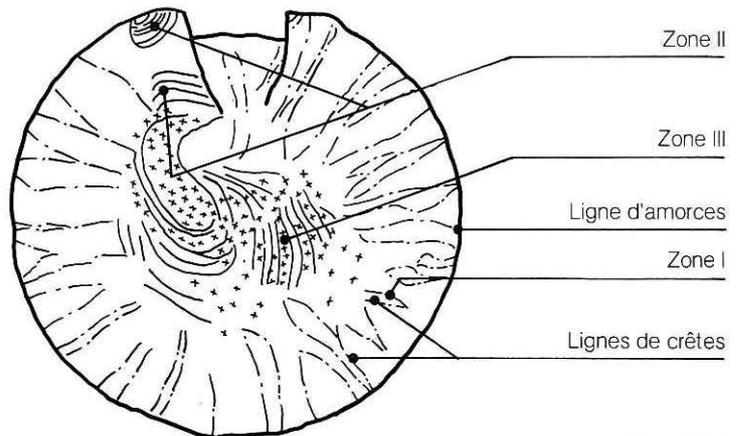


Schéma de localisation de la rupture

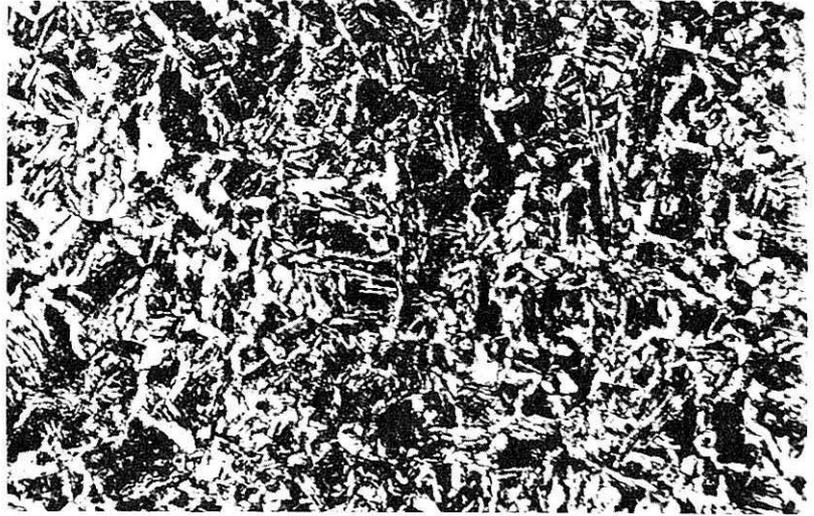


G x 0,7

Remarques

La présence de lignes frontales dans la zone de rupture finale indique que la pièce n'était pas surchargée et que la cause vraisemblable de la cassure est due aux concentrations de contraintes imputables à la juxtaposition locale des éléments suivants :

- changement de diamètre,
- rainure de clavette située dans une zone proche du congé de raccordement du changement de diamètre,
- usinage grossier du congé de raccordement.



Examen micrographique
dans la zone d'amorce.

Structure perlite-ferritique.

G x 500
Attaque Nital

ARBRE DE TURBINE

(Planche 11)

Conditions de fonctionnement

D'après le bureau d'études du constructeur, l'arbre est soumis à une force orthogonale de 1 800 daN au démarrage et de 233 daN en fonctionnement normal.

Dans la zone de rupture le moment de torsion est nul et le moment de flexion est de 480,250 m.daN au démarrage et 62,327 m.daN en fonctionnement, ce qui correspond à des contraintes de flexion :

$$\sigma \text{ (dem.)} = 5,61 \text{ hbar}$$

$$\sigma \text{ (fonct.)} = 0,73 \text{ hbar}$$

A ces contraintes, il faut appliquer un coefficient de concentration de contraintes que nous ne pouvons déterminer (effet d'entaille cumulé).

Analyse morphologique

Rupture I

Le faciès de cassure caractéristique d'une rupture de fatigue présente deux zones lisses de fissuration progressive et une zone à grains fins.

Les zones de fissuration progressive sont diamétralement opposées mais c'est celle de la partie supérieure qui correspond à la dégradation initiale. Elle est située au débouché d'une gorge de dégagement de filetage et d'une rainure de clavetage.

On observe des lignes frontales qui entourent d'abord concentriquement l'amorce pour changer de sens de concavité.

La seconde amorce est apparue beaucoup plus tardivement et a pris naissance à fond de filet. C'est lorsque la première fissuration a atteint une phase de développement assez avancée qu'elle s'est propagée à son tour.

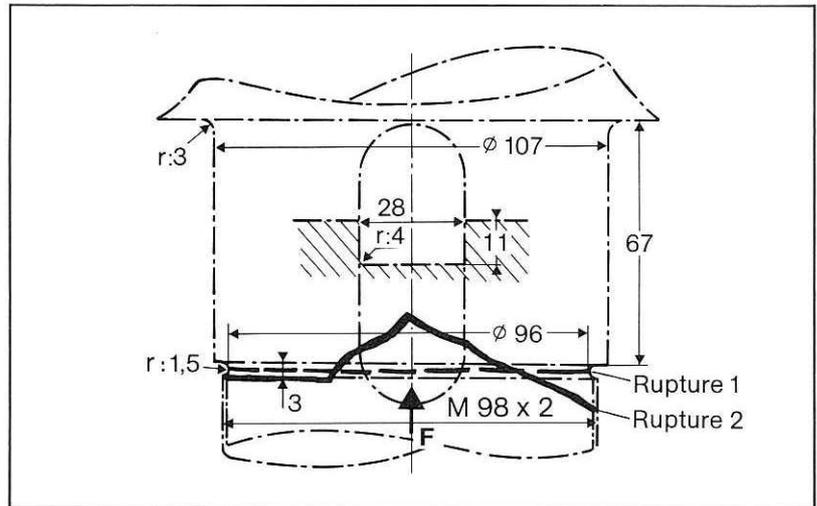
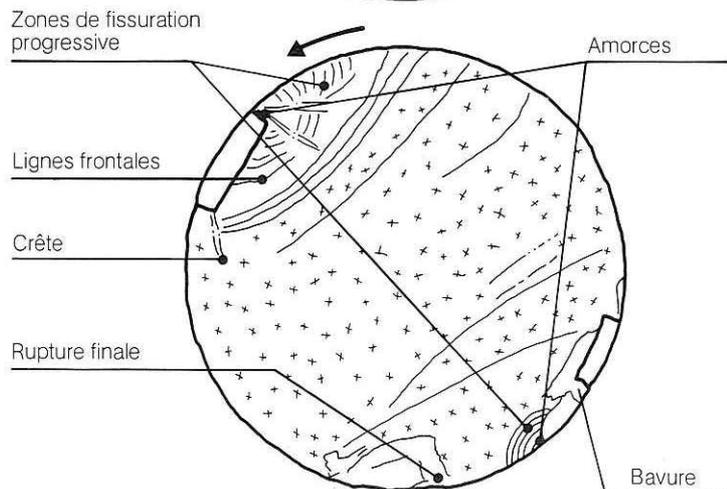
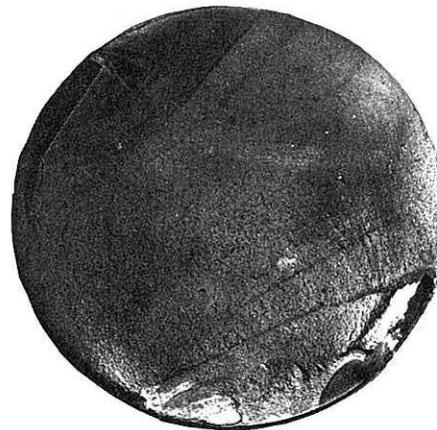


Schéma de localisation de la rupture



Ruptures II et III

Les traces des ruptures sont représentées sur les schémas de ces planches après modification du positionnement de la rainure de clavetage. Les causes de ces ruptures sont à rechercher dans la réalisation de l'arbre qui a été fileté puis rechargé.

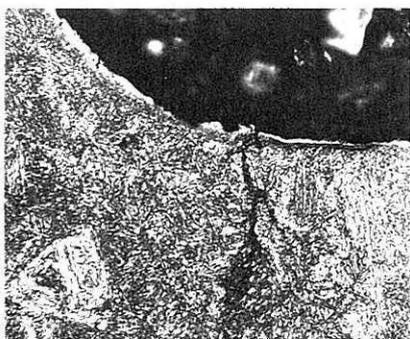
Ces fautes de réalisation, cumulées au phénomène de concentration de contraintes dû au changement de section et à la proximité de la rainure de clavette engendrent au démarrage et en cours de fonctionnement un taux de contraintes excessif.

Examen micrographique

La coupe réalisée suivant un plan longitudinal de l'arbre dans la zone fileté montre une fissure amorcée à fond de filet qui progresse dans la matrice bainitique.

Remarque

A la demande de l'intéressé, il n'a pas été effectué d'examens complémentaires.



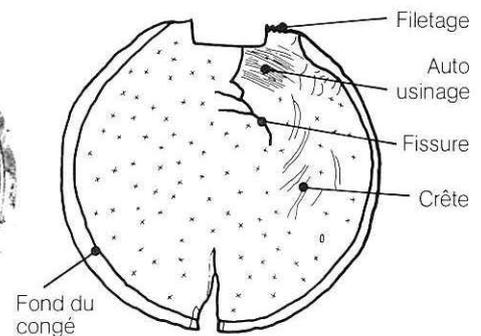
Examen micrographique suivant une coupe perpendiculaire à la cassure et passant par le diamètre fileté.

HV₁₀₀ = 280

Structure bainito-perlitique.
Fissuration perpendiculaire à l'axe du cylindre en fond de filet.
G x 500
Attaque Marble.



Profil de la cassure ci-dessous.



Après changement de la position de la rainure de clavette.

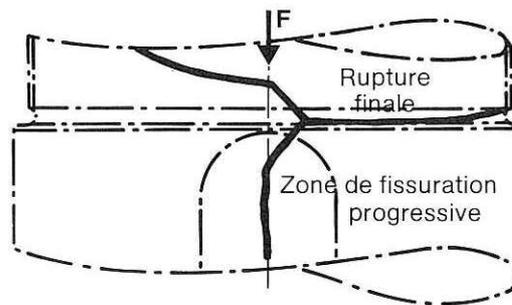


Schéma de localisation de la rupture



Profil de la rupture finale inclinée à 35° par rapport à l'axe de l'arbre sous des contraintes combinées de flexion et torsion.
Fissuration progressive.



Rupture finale partiellement matée.

PIGNON ARBRÉ DE RÉDUCTEUR

(Planche 12)

Conditions de fonctionnement

Les caractéristiques fournies par le constructeur sont les suivantes :
 moteur : 450 kW, réducteur : 520 CV,
 rapport de réduction : 1 475 à 16,6 tr/mn.

Analyse morphologique

Le faciès de rupture est caractérisé par une zone d'aspect soyeux, sur laquelle on distingue les lignes d'arrêt et frontales (aspects classiques des ruptures par fissuration progressive), et une autre d'aspect granuleux correspondant à la rupture finale.

Les lignes d'arrêt indiquent que la fissuration progressive s'est initiée sur la face extérieure de l'arbre non loin de la rainure de clavetage (voir cliché).

De cette amorce, la fissure progresse sous l'action des contraintes combinées de flexion rotative et torsion cycliques.

Ceci explique pourquoi la rupture n'est pas dans un plan perpendiculaire à l'axe de l'arbre mais suivant une surface qui dans la zone de rupture finale s'incline légèrement.

Remarques

Le profil géométrique de la rupture indique que les contraintes de flexion sont plus importantes que celles de torsion.

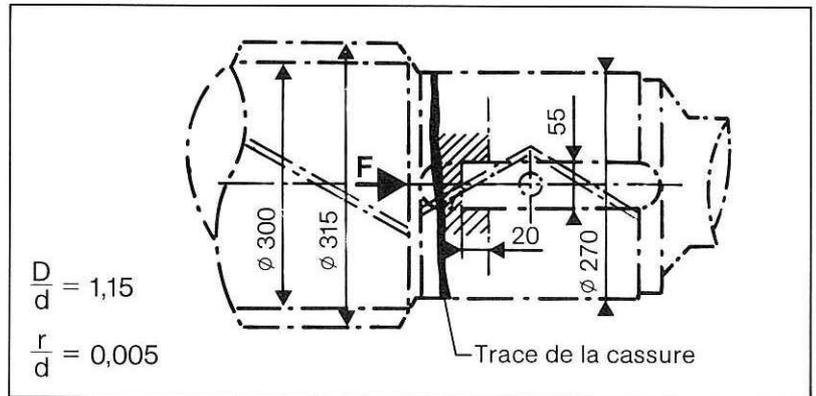


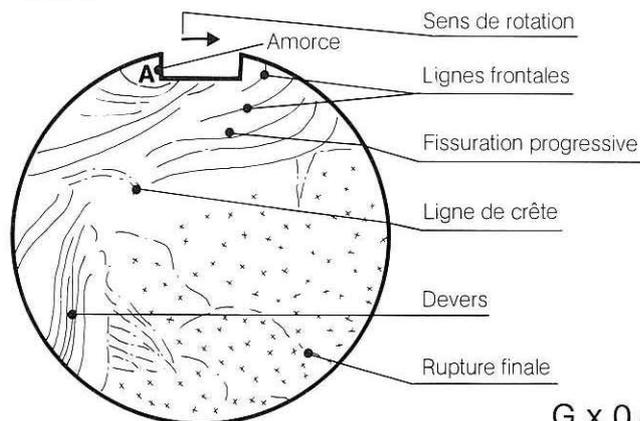
Schéma de localisation de la rupture



Vue suivant F



Amorce - Évolution du profil de la surface sous l'action des contraintes de torsion qui peu à peu deviennent prépondérantes.



G x 0,45

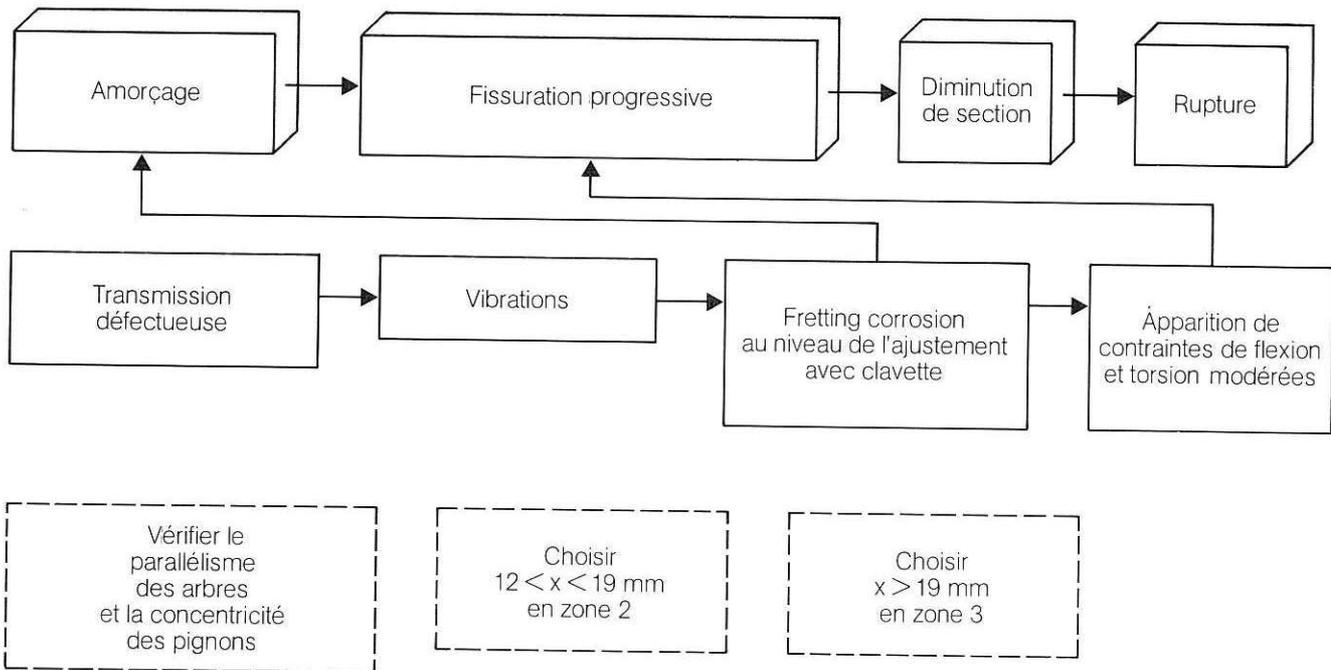


Examen micrographique réalisé suivant une zone proche de l'amorce.

Structure bainito-perlitique.

G x 200
Attaque Nital

Schéma de la dégradation



Analyse chimique

Repère (%)	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo
Pièce rompue	0,35	0,20	0,85	0,02	0,02	1	0,20
Nuance normalisée							
30 CND 8	0,30	0,1	0,6			0,85	0,15
NFA 35 551	0,37	0,4	0,9	0,035	0,035	1,15	0,30

Examen micrographique

L'examen micrographique met en évidence une structure bainite-perlitique dans la zone d'amorce. Cette structure est caractéristique d'un traitement de trempe et revenu.

Mesure de dureté

Moyenne arithmétique de cinq essais de dureté Vickers (NFA 03 154) réalisés sous une charge de 30 daN.

HV₃₀ = 370