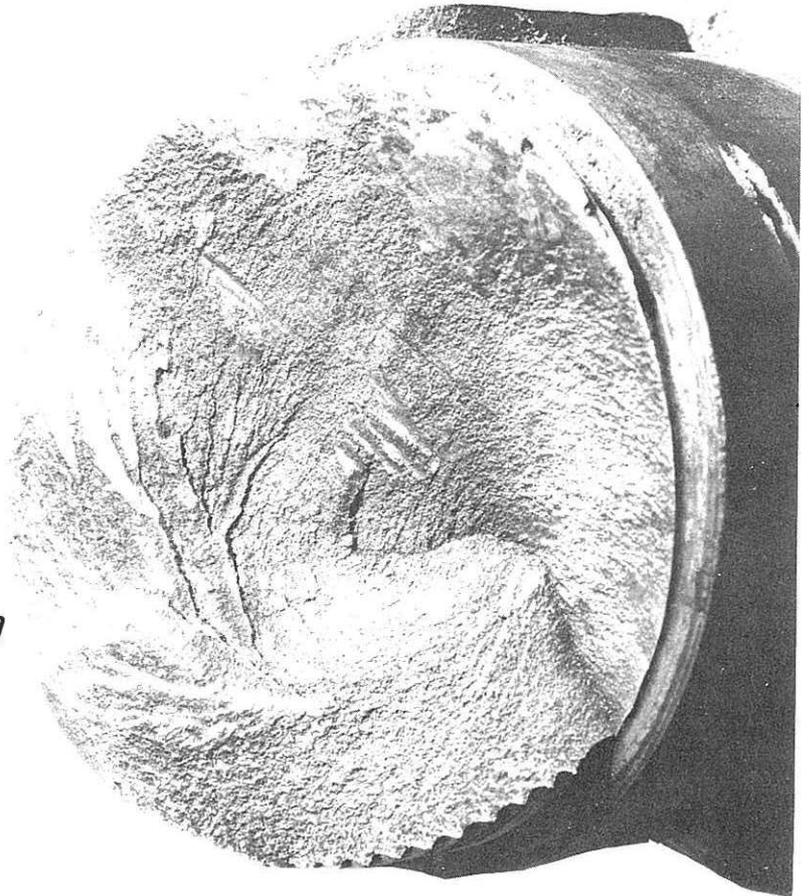


RÈGLE PRATIQUE DE POSITIONNEMENT DES RAINURES DE CLAVETAGE :

*cas des rainures de 10 mm
de profondeur sur arbres
épaulés-clavetés, sollicités
en flexion plane.*



par G. Perraudin
Division Assistance
Technique Région
Parisienne
(CETIM-Senlis)

Jusqu'à présent il n'existait pas de règle pratique permettant aux bureaux d'études de positionner les rainures de clavetage. Le CETIM vient de combler en partie cette lacune en proposant une règle de positionnement applicable au cas d'une rainure de 10 mm de profondeur sur un arbre épaulé claveté. Cette règle a pu être établie grâce à une étude approfondie des phénomènes de concentration de contraintes sur un certain nombre de pièces-types, de morphologie déterminée statistiquement à partir des cas concrets rencontrés dans l'industrie. Signalons que cette étude a fait l'objet d'un mémoire présenté au CNAM en juillet 1977 [3]. L'article suivant en présente l'essentiel.

Introduction

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, largement développée par H. de Leiris [1], permet, dans de nombreux cas, de déterminer les causes de ruptures 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 les cas d'incidents ou d'avaries survenus à des éléments de machine ou d'engins utilisés dans les industries mécaniques. L'examen de très nombreux cas de ruptures de pièces [2] a fait ressortir les fréquences mentionnées au tableau I.

TABLEAU I. Fréquences des types et des causes de ruptures de pièces.

Types de ruptures	ruptures de fatigue	68 %
	ruptures semi-fragiles	22 %
	ruptures « catastrophiques »	10 %
Causes de ruptures	« défauts » de conception et de réalisation	40 %
	inadaptation de la nuance choisie	13 %
	surcharges	10 %
	causes diverses { d'origine métallurgique	19 %
	{ d'origine non métallurgique	18 %

On y constate que les effets d'entaille (changement de section, rainure, gorge, accident d'usinage) et les défauts de tracé des pièces représentent à eux seuls 40 % des causes de ruptures. A l'intérieur de ce pourcentage, les ruptures survenues aux arbres épaulés clavetés figurent pour 30 %. En général, elles sont dues à des concentrations de contraintes provenant de la superposition de la rainure de clavetage avec des changements de section plus ou moins bien rayonnés.

Ces phénomènes sont assez connus. Néanmoins il n'existe pas, actuellement, de données chiffrées, bibliographiques ou autres, mettant en évidence l'influence réciproque des rainures de clavetage sur les épaulements ou changements de section brutaux. C'est pourquoi nous avons tenté de les obtenir expérimentalement dans un certain nombre de cas sélectionnés, correspondant à la pratique industrielle la plus courante. Les résultats obtenus en flexion plane nous ont ensuite conduits à établir une règle de positionnement de l'extrémité de la rainure par rapport à la zone de changement de section de l'arbre.

L'étude, limitée aux comportements sous charge statique s'est donc déroulée en trois étapes principales :

- Examen des cas concrets de ruptures d'arbres épaulés clavetés parmi les plus caractéristiques et choix des éléments géométriques à retenir pour la définition des pièces d'essais-types ;
- Détermination expérimentale des coefficients de concentration de contraintes correspondant à chaque morphologie étudiée et vérification des résultats obtenus par le calcul : cette double analyse a porté sur les cas de flexion et de torsion ; nous ne parlerons ici que des résultats obtenus en flexion plane qui, seuls, ont conduit à une règle pratique de positionnement ;
- Etablissement de la règle de positionnement de la rainure dans le cas de la flexion plane.

RAPPELS SUR LES CONCENTRATIONS DE CONTRAINTES

Notations

- σ_{nom} = Contrainte nominale (obtenue, par exemple, par calcul classique de résistance des matériaux).
- σ_{max} = Contrainte maximale (*mesurée* effectivement dans la section ou *calculée*, du fait de l'existence des concentrations de contraintes, elle est différente de σ_{nom}).
- $K_{t(f)}$ = Facteur théorique de concentration de contraintes dans le cas de la traction ou flexion.
- E = Module d'élasticité.
- G = Module de Coulomb.
- ν = Coefficient de Poisson.
- G ou μ = Module de cisaillement.

Définitions

Les formules classiques, utilisées en résistance des matériaux sont établies pour des éléments de machines ou de structures ayant une section constante ou variant progressivement. La présence d'épaulements, d'orifices, de filetages, de rainures de clavetage provoque une modification dans la répartition des contraintes. Localement, on peut atteindre une intensité de contraintes

qui est supérieure à la limite d'élasticité ou à la limite d'endurance de l'élément de la structure et contribuer ainsi à l'initiation d'une fissure qui tend à progresser. Cette élévation de contraintes très localisée est connue sous le nom de concentration de contraintes théorique ; elle est définie, dans le cas de la flexion, par le facteur théorique de concentration de contraintes :

$$K_{t(f)} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

La contrainte nominale, dans le cas de la flexion, est donnée par l'équation :

$$\sigma_{nom} = \frac{M'}{I_{z\beta}} \frac{V}{V}$$

avec

- M' = Moment de flexion dans la section considérée.
- $I_{z\beta}$ = Moment quadratique de la pièce par rapport à la fibre neutre $\alpha\beta$.
- V = Distance de la fibre neutre à la fibre la plus tendue.
- $\frac{I_{z\beta}}{V}$ = Module de flexion.

1. Analyse morphologique de cas réels. Géométrie des pièces d'essais-types

1.1. L'effet d'entaille

Dans l'analyse morphologique des cassures, l'effet d'entaille se manifeste d'une manière comparable à un affaiblissement superficiel qui favorise l'amorçage de la fissuration. On peut, d'après les travaux de H. de Leiris [1], considérer différents cas.

L'effet d'entaille est perpendiculaire à la contrainte principale

L'orientation de l'effet d'entaille coïncide avec celle de la fissure qui tendrait à se produire en l'absence de cet effet d'entaille.

L'effet d'entaille est oblique par rapport à la contrainte principale

La fissure suit d'abord le fond d'entaille. Le début de la cassure est d'autant plus lisse que le fond d'entaille est mieux défini : très uni pour un angle vif ; tourmenté pour un congé. Une fois parvenue à une distance suffisante du fond d'entaille, la fissure peut en générer plusieurs qui tendront à être orthogonales à la direction générale des contraintes.

L'effet d'entaille peut être rattaché à deux causes principales :

- *le défaut de tracé* : congé de raccordement sur arbre épaulé insuffisant, clavette, etc.
- *l'accident localisé* : usinage grossier, coup d'outil, coup d'arc, coup de pointeau, pièce brute de découpage.

Des exemples des modifications apportées par l'effet d'entaille sur des fronts de propagation des fissures progressives (contraintes de flexion) sont donnés tableau II.

1.2. Exemples-types de ruptures (cas concrets)

Douze exemples de ruptures ont été sélectionnés. Choisis parmi les plus caractéristiques des cas concrets que nous ayons eu à connaître, ils montrent l'importance du problème pratique posé par la rupture des arbres épaulés et clavetés. Leur analyse morphologique sera publiée dans cette revue (en moyenne quatre par numéro) avec une présentation inspirée de celle que nous avons déjà utilisée [2], mais plus complète. Les quatre premiers sont donnés ci-après (p. 40 à 47).

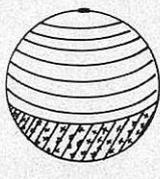
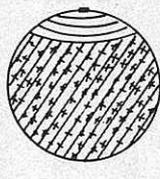
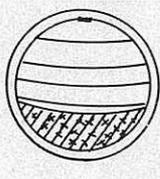
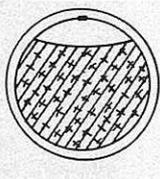
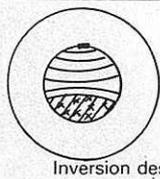
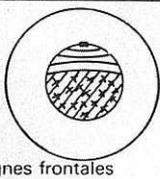
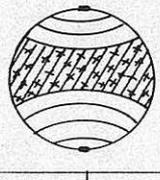
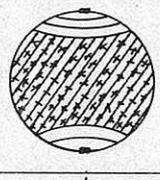
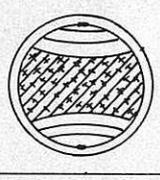
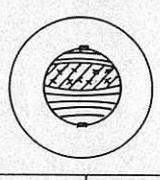
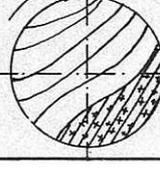
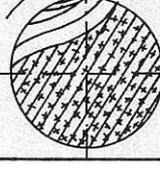
Types de sollicitations en flexion	Effet d'entaille nul		Effet d'entaille modéré		Effet d'entaille intense	
	Surcharge modérée	Surcharge élevée	Surcharge modérée	Surcharge élevée	Surcharge modérée	Surcharge élevée
Flexion plane répétée						
Flexion plane alternée						
Flexion rotative						

TABLEAU II. *Facès de ruptures de pièces soumises à des contraintes de flexion (d'après Weintraub).*

1.3. Géométrie des pièces d'essais-types

Ces exemples ont servi à déterminer les formes-types à tester (fig. 1). Le tableau III en récapitule les paramètres principaux et le tableau IV donne les géométries des trois formes-types retenues; elles correspondent à la forme limite supérieure, la forme moyenne (moyenne arithmétique des exemples) et la forme limite inférieure. On remarque en particulier, sur ces tableaux, ce qui nous a conduits à nous intéresser aux rainures de 10 mm de profondeur.

Un certain nombre de configurations d'essais ont été réalisées à partir de ces formes-types (8 par forme), la variable considérée à l'intérieur de chaque forme-type étant la distance X entre l'extrémité de la rainure et le changement de section de l'arbre.

TABLEAU III. Récapitulatif des cas-types retenus (dimensions en mm).

Planche	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D	135	185	75	90	120	20	100	30	100	144	107	315
d	120	130	50	77	90	19	85	20	80	124	98	270
r	10	5	5	1	3	0,2	3	# 0,2	5	5	1,5	1,5
l	32	36	16	18	25	6	24	5	20	18	28	55
p	11	7	7	10	9	4	19	3	10	8	11	20
$\frac{D}{d}$	1,12	1,45	1,5	1,16	1,33	1,05	1,17	1,5	1,25	1,16	1,09	1,15
$\frac{r}{d}$	0,08	0,04	0,1	0,011	0,025	0,01	0,03	0,01	0,06	0,04	0,015	0,005
$\frac{D}{d'}$	1,23	1,50	1,75	1,34	1,48	1,33	1,51	1,75	1,42	1,94	1,22	1,26

Remarques : Pour les planches 1, 3, 5 et 8, les ruptures se produisent essentiellement sous l'action de contraintes de flexion rotative. La planche 6 représente une rupture de torsion pure. La planche 7 montre une rupture se propageant sous l'action de contraintes alternées de torsion. Les autres cas imagent des dégradations survenues sous l'action de contraintes complexes de flexion rotative et torsion combinées. Dans les quelques cas que nous présentons, nous remarquons que la majorité des clavetages sont à bout rond (90 %) et que seulement deux rainures de clavetage sont rayonnées (planches 11 et 12).

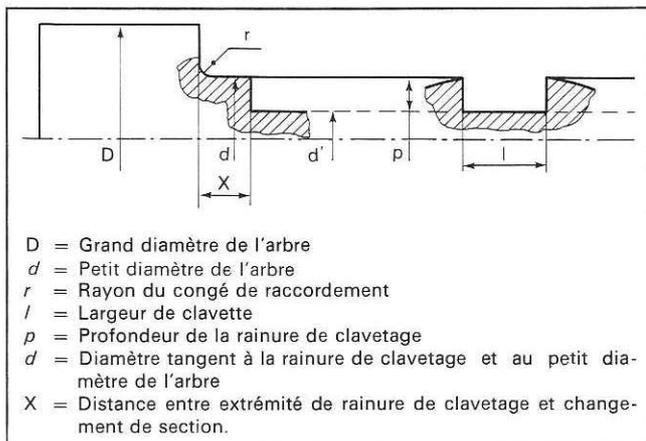


Fig. 1. Paramètres géométriques des pièces d'essais-types.

TABLEAU IV. — Dimensions (en mm) des pièces-types ou maquettes

Flexion plane	Cas limite inférieur	Moyenne arithmétique	Cas limite supérieur
$\frac{D}{d}$	1,05	1,28	2
D	126	126	126
d	120	98,4	63
r	3,5	3,5	3,5
p	10	10	10

Remarques : Le fond de rainure de clavetage n'est pas à angle droit. Le rayon de raccordement mesuré au projecteur de profil est de 0,2 mm.

2. Détermination de la variation des coefficients de concentration de contraintes en fonction de l'épaulement (D/d) et de la position de la rainure (X)

Deux méthodes ont été utilisées, l'une expérimentale en photoélasticimétrie, l'autre de calcul par la méthode des éléments finis. Leurs résultats étant cohérents en flexion plane, qui nous intéresse seule ici, nous résumons ci-après ceux qui ont résulté de la campagne expérimentale.

Pour chaque configuration, les valeurs des contraintes nominales et maximales (et les valeurs de $K_{t(f)}$ correspondantes) ont été déterminées aux points les plus critiques (repérés A et B sur la figure 2) des zones de concentration que sont le congé de raccordement de section (A) et le fond de rainure de clavetage (B). La figure 3 présente les courbes obtenues dans le cas $D/d = 1,05$, les figures correspondant aux deux autres cas sont assez semblables.

a) *Forme-type correspondant à D/d minimal (D/d = 1,05)*

$X > 30$ mm - $K_{t(f)}$ (clavette) \simeq $K_{t(f)}$ (congé).

On a un risque d'amorçage d'une fissuration progressive aléatoire, liée à la microgéométrie de la surface (coup d'outil, blessure superficielle)

$10 < X < 30$ - $K_{t(f)}$ (clavette) sensiblement constant et $K_{t(f)}$ (congé) en baisse. Le congé de raccordement fait office de « rainure de déchargement » : l'amorçage d'une fissuration progressive sera essentiellement localisé dans la zone de la rainure de clavetage.

$X < 10$ mm - Augmentation sensible du $K_{t(f)}$ (clavette).

b) *Forme-type correspondant à D/d moyen (D/d = 1,28)*

Les remarques sont semblables à l'exemple précédent, à la différence près que les valeurs de X sont dans ce cas : $X > 30$ mm ; $15 < X < 30$ mm et $X < 15$ mm.

c) *Forme-type correspondant à D/d maximal (D/d = 2)*

Dans cette morphologie, les valeurs de X sont : $X > 30$ mm, $25 < X < 30$ mm et $X < 20$ mm.

En fabrication mécanique, les exemples où $\frac{D}{d} > 2$ sont déjà considérés défectueux ou sujets à critiques.

Remarques

- Pour des maquettes planes sollicitées en flexion, le fait de trouver des résultats cohérents entre théorie et expérimentation ne doit pas faire oublier qu'un élément essentiel (la triaxialité des contraintes) n'est pas pris en considération : ceci sera d'autant plus sensible que la forme du fond de la rainure de clavetage sera à arêtes vives.
- L'analyse des courbes de la figure 1 montre que plus la distance entre extrémité de clavette et changement de section augmente moins la rainure de clavetage a d'importance.
- On peut simplifier l'analyse du phénomène en posant :

$$\Omega = \frac{K_{t(f)} \text{ (clavette)}}{K_{t(f)} \text{ (congé)}}$$

et en traçant les courbes $\Omega(X)$ (fig. 4).

- Lorsque $\Omega = 1$, il n'y a pas un point unique de concentration de contraintes et les chances d'initiation ou d'amorçage de rupture seront sensiblement équivalentes aux endroits des changements de section : on a dans la pièce un état de contraintes qui lui confère une tenue améliorée. Dans le cas de la fatigue, l'amorçage de la (ou des) fissuration(s) progressive(s) sera alors essentiellement tributaire de la qualité d'usinage des formes.
- Lorsque Ω augmente, on cumule les risques d'initiation dans la zone du champ de contraintes où se situe $K_{t(f)}$ maximal (intensité de contrainte prépondérante). Dans notre cas, cette augmentation correspond à la zone de l'extrémité de rainure.

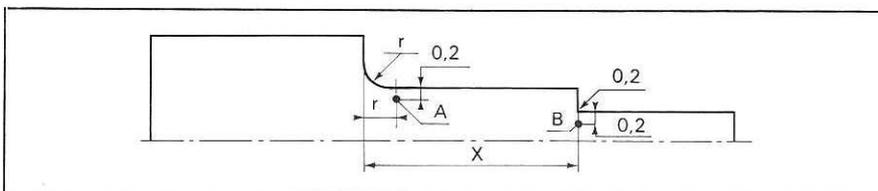


Fig. 2.

Points critiques A et B. Le point A a été choisi, contrairement aux différentes théories, en raison des difficultés technologiques de réalisation dues aux phénomènes de plongée au changement de section.

Fig. 3.

Concentrations de contraintes au congé et à l'extrémité de la rainure de clavetage dans le cas où $D/d = 1,05$. Résultats obtenus par photoélasticimétrie bidimensionnelle.

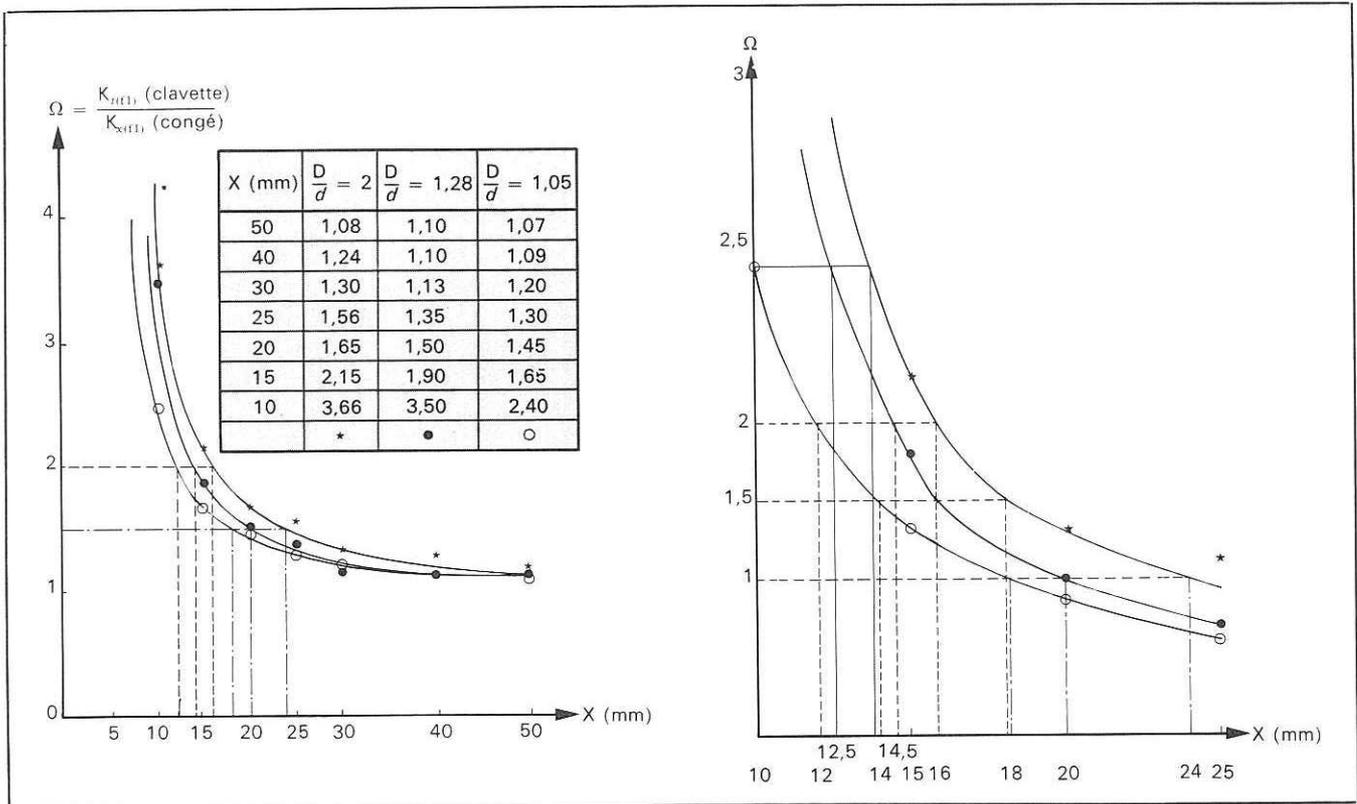
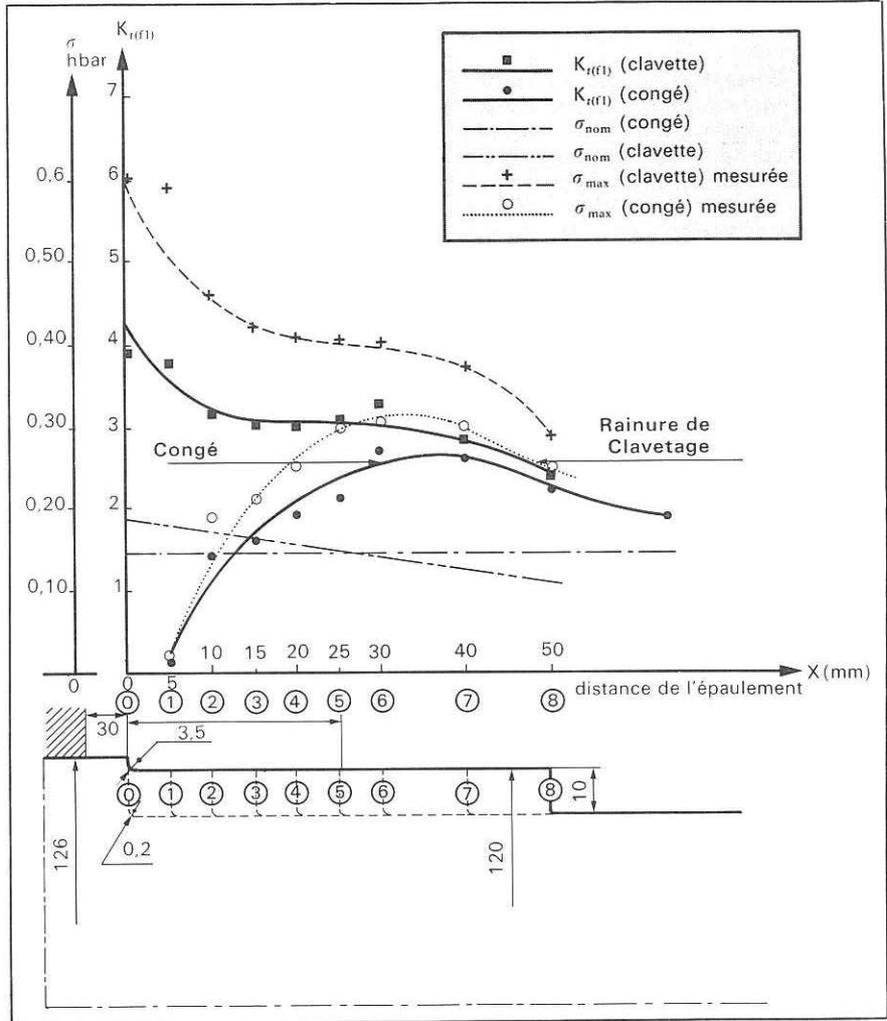


Fig. 4. Concentration de contraintes en flexion plane : détermination des X critiques.

3. Règle de positionnement de la rainure

Pour les bureaux d'études, il n'existe pas de règle pratique de positionnement. Les contingences de tracé sont d'ordre fonctionnel, d'encombrement et de calculs de résistance des matériaux classiques. Il nous a donc paru raisonnable de choisir comme base de la règle le rapport D/d et d'en déduire les limites de X pour le tracé considéré. C'est ce que proposent les courbes de la figure 5 paramétrées en Ω et valable pour les cas envisagés dans nos essais c'est-à-dire rainure de 10 mm de profondeur et flexion plane. Ces courbes définissent trois zones.

Zone 1 : zone interdite.

Zone 2 : zone de transition ou zone critique.

On ne peut dans cette zone positionner une clavette qu'après un examen sérieux portant sur les rapports D/d , D/d' , r/d' les qualités d'usinage et l'étude éventuelle de diverses possibilités de déchargement, en imposant une rainure de clavetage rayonnée.

Zone 3 : zone sans gros risque de rupture.

Exemples d'application

Dans le cas de l'avarie figurant planche 4, le rapport $D/d = 1,16$; la profondeur de la rainure est de 10 mm. Si nous avions eu à conseiller le bureau d'études nous lui aurions fait les recommandations suivantes :

- éviter toute extrémité de clavette à moins de 12 mm du changement de section ($X < 12$ mm : zone (1) interdite) ;
- surveiller l'usinage et envisager un fond de rainure rayonné si $12 < X < 19$ mm (zone (2) critique ou de transition) ;
- s'il n'existe pas de surcharge ou d'incidents locaux particuliers et si la structure générale s'y prête, choisir une distance $X > 19$ mm pour être dans les meilleures conditions de sécurité.

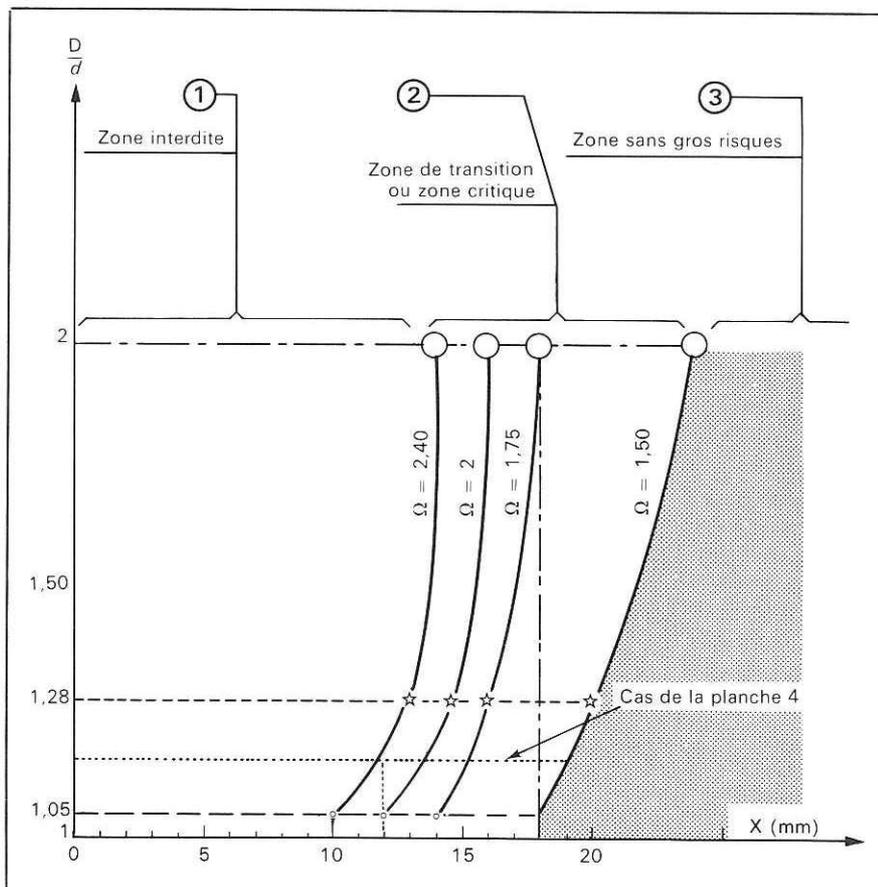


Fig. 5. Courbes paramétrées en Ω .

Remarque

- Pour le bureau d'études, le choix de la zone 2 ou 3 pour la détermination de X sera naturellement influencé par le couple que doit transmettre la clavette ; à la limite, il pourra même envisager d'utiliser celle-ci comme fusible de la chaîne cinématique.
- Si la rainure de clavetage a une profondeur supérieure à 10 mm, il est vraisemblable que les courbes paramétrées en Ω seront translatées vers la droite (côté des X croissants).

Conclusions

La règle de positionnement que nous proposons figure 5 concerne les arbres épaulés clavetés (profondeur de rainure : 10 mm) sollicités en flexion plane. Elle ne concerne pas, loin s'en faut, tous les cas de figures mais son utilisation devrait tout de même conduire à l'élimination d'un certain nombre de ruptures en fonctionnement.

Il serait évidemment souhaitable de compléter cette première proposition par le tracé des courbes correspondant aux différentes profondeurs de clavettes prévues par la norme. Encore faudrait-il pour cela qu'un nombre suffisant de demandes en ce sens nous soient faites.

Bibliographie

- [¹] De LEIRIS (H.). — *Analyse morphologique des cassures*, Ed. Masson et Cie, Paris, 1974.
- [²] PERRAUDIN (G.) et PRETTE (P.). — Attitude du mécanicien en présence d'une rupture d'organes de machines, *CETIM-Informations n° 36 à 42*, 1974-1976.
- [³] PERRAUDIN (G.). — Contribution à l'étude des phénomènes de concentration de contraintes. Cas d'un arbre épaulé-claveté soumis à des efforts de flexion et torsion. *Mémoire CNAM*, juillet 1977.

Nos lecteurs trouveront pages suivantes les premiers exemples de rupture d'arbres épaulés-clavetés (planche 1 à 4). Dans le numéro suivant de ce bulletin nous publierons la suite de ces exemples-types de rupture.

RUPTURE D'ORGANES DE MACHINES

ARBRES ÉPAULÉS-CLAVETÉS

ARBRE DE COMMANDE D'UN SURPRESSEUR

(Planche 1)

Conditions de fonctionnement

Nous ignorons les caractéristiques d'utilisation et la note de calcul de l'ensemble comportant l'arbre de commande.

Analyse morphologique

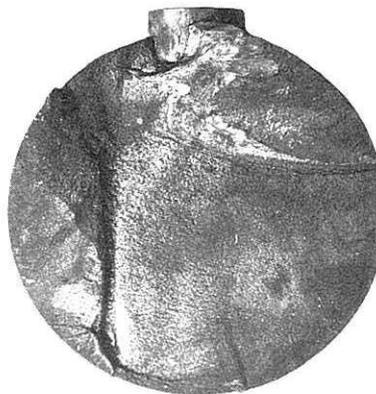
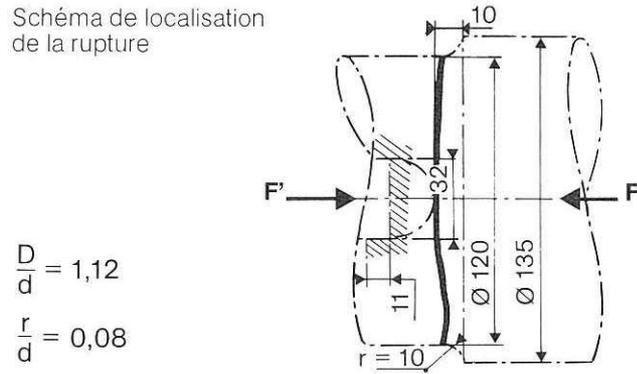
La rupture est perpendiculaire à l'axe de l'arbre au droit d'une section caractérisée par une concentration de contraintes importante due :

- à un changement de section,
- à l'embrèvement de la rainure de clavette,
- à un coup d'outil circonférentiel.

La cassure présente les deux zones caractéristiques des ruptures de fatigue : la zone de fissuration progressive, d'aspect lisse et soyeux, comportant des lignes concentriques à l'amorce A et une zone périphérique striée de lignes radiales (coup d'outil).

La rupture finale de type grenu intéresse la majeure partie de la section ce qui est significatif d'un chargement élevé lors du fonctionnement.

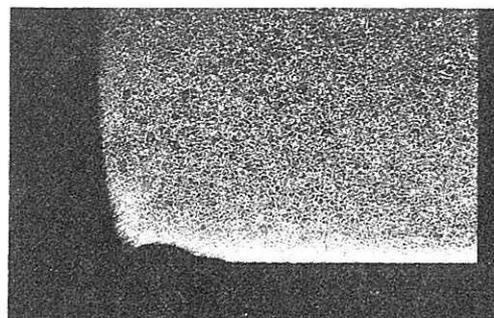
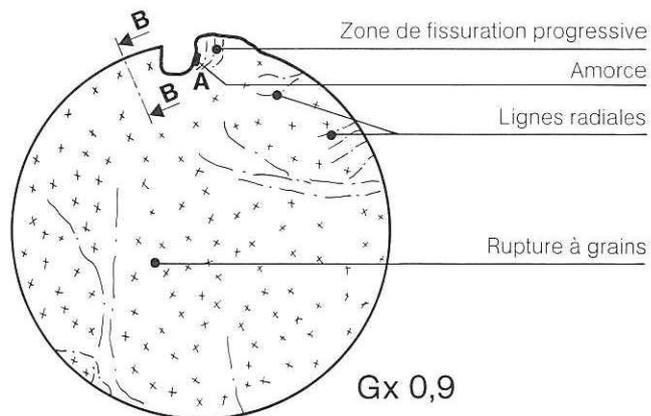
Schéma de localisation de la rupture



Vue suivant F



Photo de la rupture suivant F'

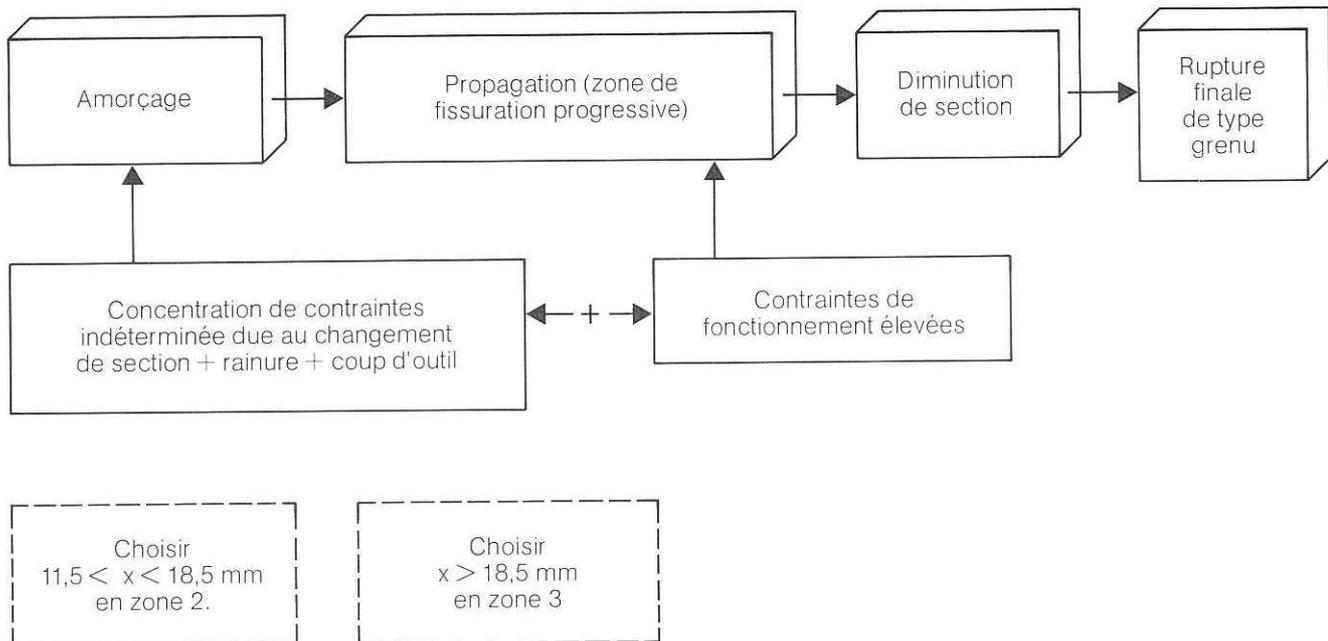


Examen macrographique
(coupe BB)

Petit diamètre de l'arbre
Congé de raccordement côté rupture.

G x 15
Attaque Nital

Schéma de la dégradation



Analyse chimique

Non réalisée.

Examen macro et micrographique

Les examens sont réalisés suivant la coupe BB.

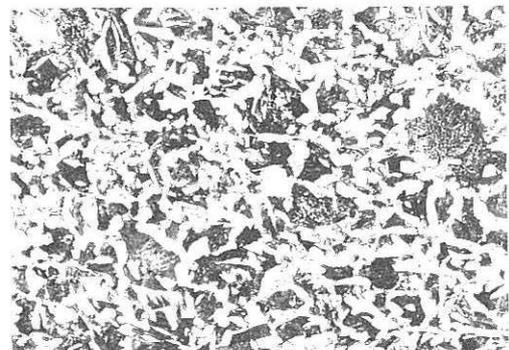
L'examen macrographique montre "la plongée" au raccordement de changement de diamètre.

L'examen micrographique révèle une structure de type ferrito-perlitique.

Mesure de dureté

Moyenne arithmétique de cinq essais de dureté Vickers réalisés conformément à la norme NFA 03 154.

HV₃₀ = 185



Examen micrographique

Structure proche de la zone rompue.
Structure composée de ferrite en blanc et de perlite en gris.

G x 100
Attaque Nital

PIGNON RENFORCÉ D'UN RÉDUCTEUR ARBRE INTERMÉDIAIRE

(Planche 2)

Conditions de fonctionnement

Les caractéristiques d'utilisation fournies sont les suivantes :

- couple nominal de sortie : 6 000 m.daN
- couple de l'arbre intermédiaire : 850 m.daN
- GV : 780 tr/mn - V' : 138 tr/mn - V : 79,5 tr/mn
- largeur denture : 370
- 15 dents module 10
- durée de vie prévue : 20 000 heures (fonctionnement 8 h x 3)
- rupture après 5 000 heures.

Si l'on considère un couple au démarrage égal à 2 fois le couple normal, on trouve une contrainte $\sigma = 20$ hbar.

Dans ce cas, on ne tient pas compte des contraintes de frottement et d'encastrement du $\phi 140$ ni des phénomènes de concentration de contraintes qui sont présentement # 2.

Analyse morphologique

La surface rompue est perpendiculaire à l'axe du pignon. L'amorce est située sur le flanc de clavetage et progresse sous l'action de contraintes combinées de flexion et de torsion. (Voir zone de fissuration progressive sur le cliché ci-contre). Le front de propagation s'incurve (dévers des lignes frontales) en fonction du sens de rotation.

On note l'excentration de la zone de rupture finale brutale qui indique que dans ce cas l'effet d'entaille n'est pas négligeable.

Remarque

Le faciès de rupture est partiellement détérioré en raison du meulage et du billage exécutés par le constructeur.

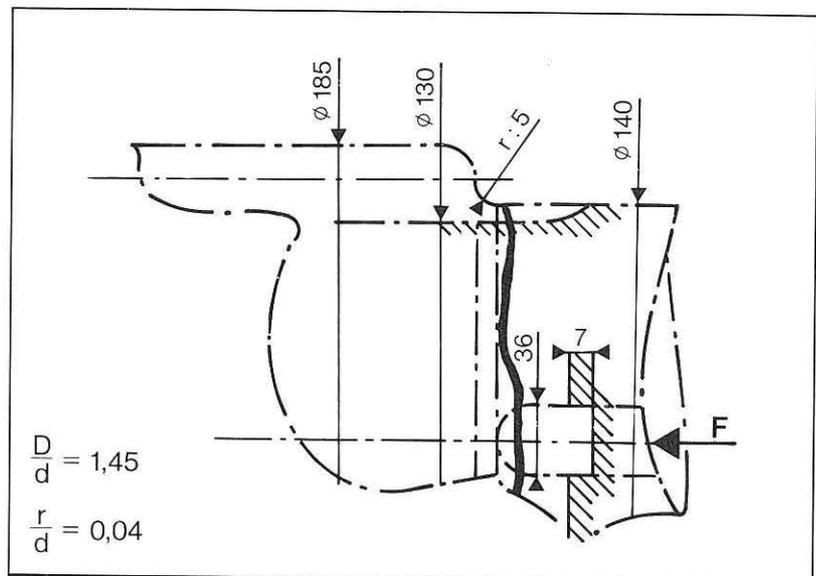
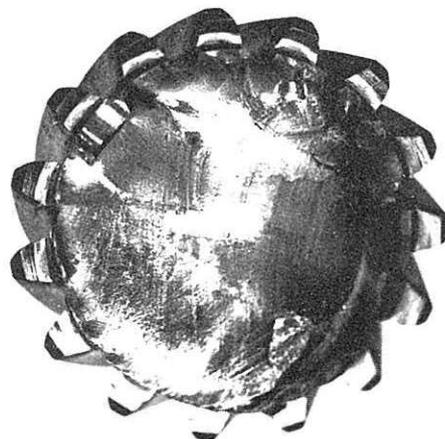
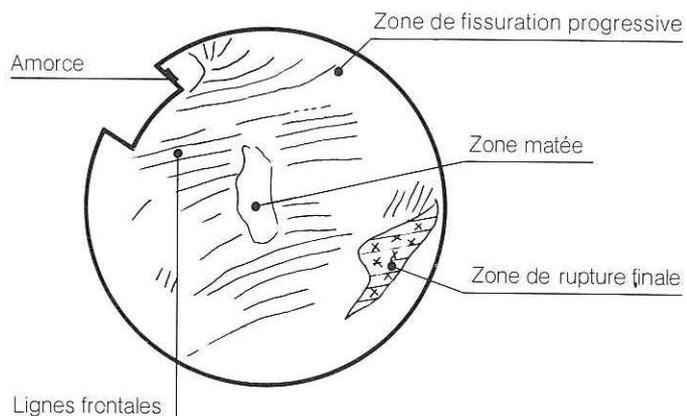


Schéma de localisation de la rupture

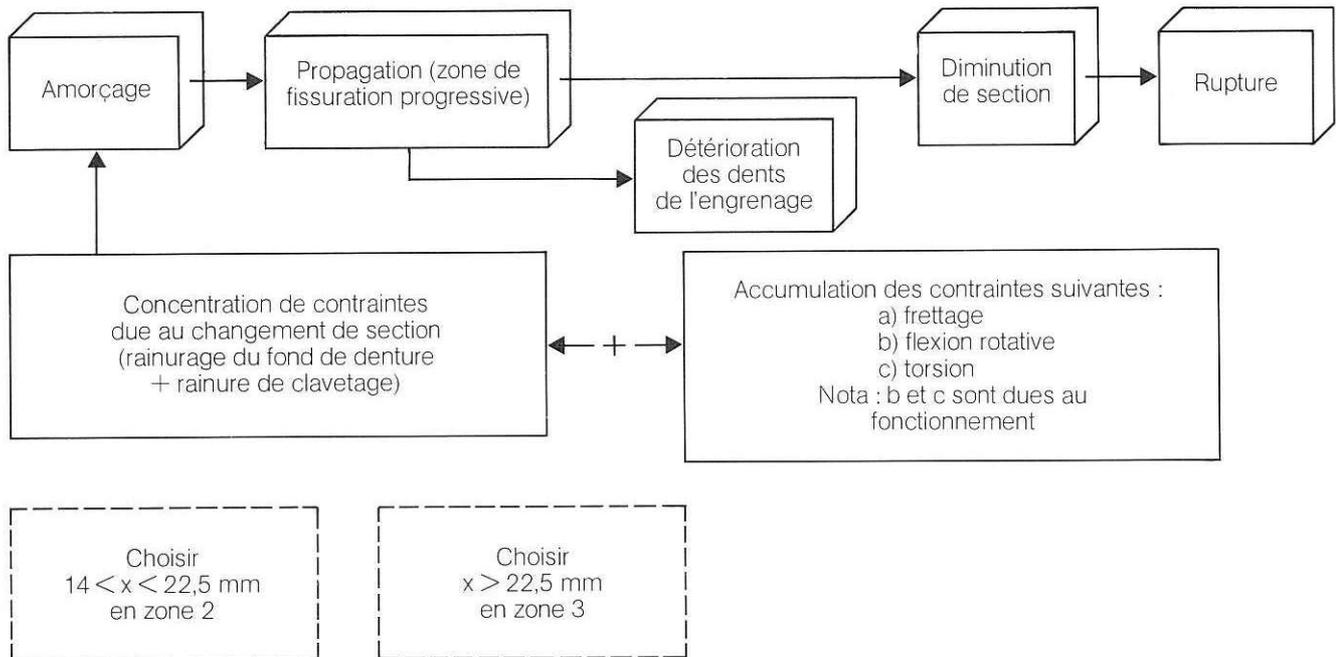


Vue suivant F



G x 1,5

Schéma de la dégradation



Analyse chimique

Repère	(%)	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo
Arbre intermédiaire (pignon renforcé)		0,35	0,18	0,80	0,010	0,015	1,10	0,20
Nuance normalisée		0,30	0,10	0,60	0,035	0,035	0,85	0,15
30 CND8		0,37	0,40	0,90			1,15	0,30
NFA 35 551								

Mesure de dureté

La moyenne arithmétique de 5 essais de dureté Brinell réalisés suivant NFA 03 153 est de :

HB = 260

Soit une correspondance approximative de 85 hbar.

ARBRES INTERMÉDIAIRES DE RÉDUCTEUR

(Planche 3)

Conditions de fonctionnement

Nous n'avons pu obtenir de renseignements concernant les conditions de fonctionnement.

Analyse morphologique

Photo n° 1 :

– On retrouve les deux zones caractéristiques des ruptures de fatigue (sous sollicitations cycliques).

• Zone de fissuration progressive

– La rupture de l'arbre progresse à partir d'une amorce située en fond de rainure de clavetage.
– Elle s'est propagée grâce à des contraintes de flexion rotative.

• Zone de rupture finale

– On remarque la position excentrée de la rupture finale qui indique un effet d'entaille non négligeable.

Photo n° 2 :

– Le faciès de cassure est comparable au précédent.
– On retrouve deux zones de fissuration progressives (opposées), dont les amorces sont, soit en fond de rainure de clavetage, soit en périphérie (plan d'encastrement du pignon).
– La dimension de la rupture finale n'est pas négligeable et sa position confirme que les contraintes de flexion rotative sont relativement importantes et aggravées par le phénomène d'effet d'entaille.

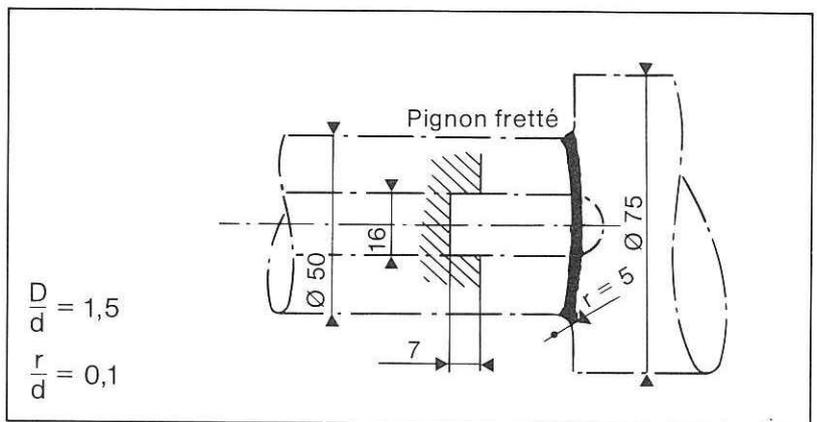


Schéma de la localisation de la rupture

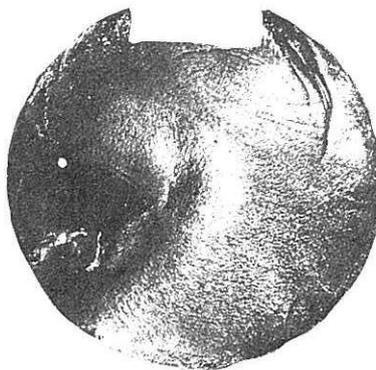


photo n° 1

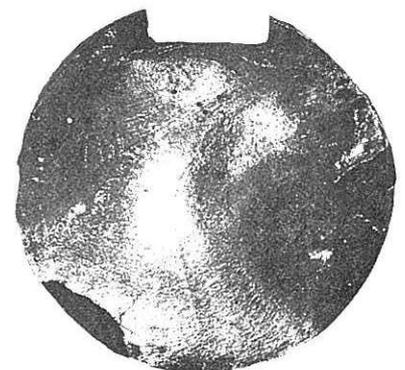
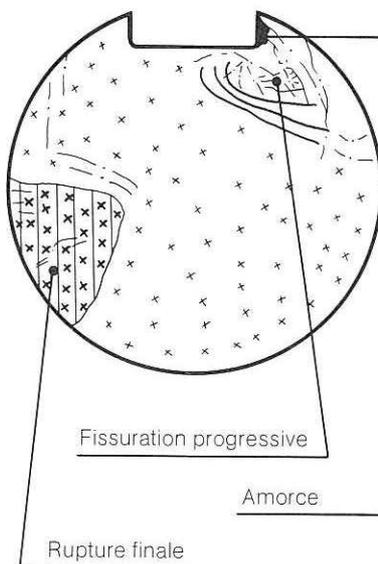
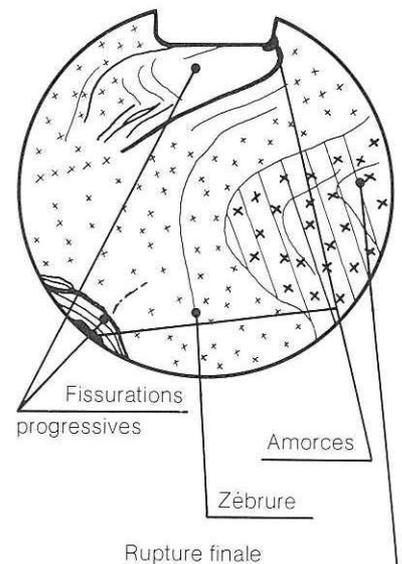


photo n° 2

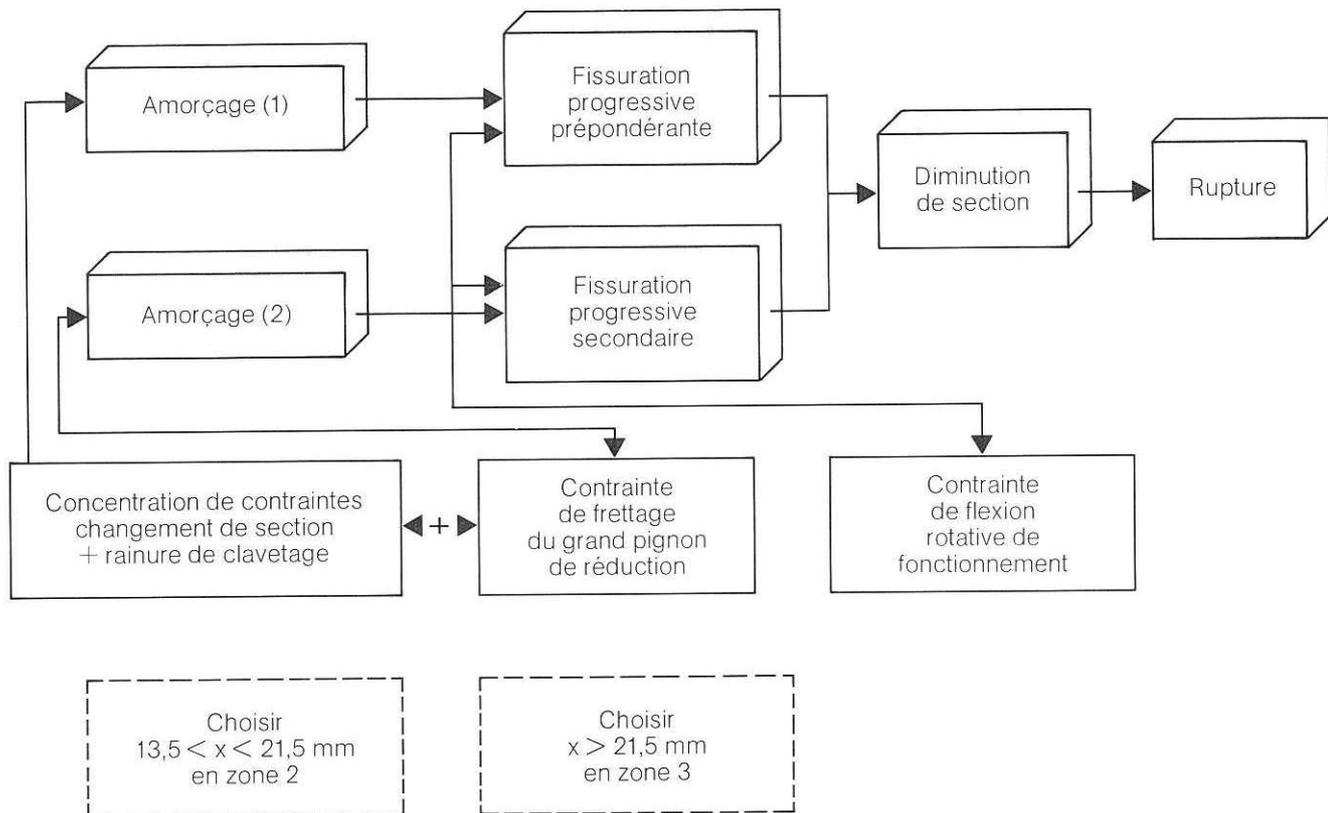


G x 1,5



G x 1,5

Schéma de la dégradation



Analyse chimique

Repère (%)	C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S
Arbre rompu	0,37	0,73	0,26	1,07	0,25	0,013	0,06
Nuance 35 CD 4 normalisée NFA 35 551	0,33 0,39	0,60 0,90	0,10 0,40	0,85 1,15	0,15 0,30	0,035 maxi	

Mesure de dureté

Moyenne arithmétique de cinq essais Vickers réalisés suivant NFA 03 154 :

$$HV_{30} = 278$$

ARBRE MOTEUR

(Planche 4)

Conditions de fonctionnement

Nous n'avons pu obtenir les caractéristiques d'utilisation de l'ensemble comportant l'arbre moteur.

Analyse morphologique

La rupture est perpendiculaire à l'axe de l'arbre.

Son faciès, à grains, peut être classé en 3 zones :

- zone proche de l'amorce à grains très fins,
- zone principale à grains fins,
- zone à grains grossiers, correspondant à l'arrachement final et bordée d'un liséré présentant de nombreuses lignes de crêtes.

La première zone, comprenant l'amorce A est limitée à ce que l'on appelle généralement une zébrure.

L'amorce est localisée au point de concentration de contraintes maximales, à l'endroit où la lèvre de la rainure de clavetage coupe le congé de raccordement.

La deuxième zone, postérieure à la première présente quelques lignes radiales et de nombreuses lignes de crêtes situées en fond du congé de raccordement.

L'absence de front de propagation visible macrographiquement indique une charge importante et un fonctionnement de l'arbre quasi permanent.

La dernière zone, d'importance non négligeable, confirme une forte intensité de contraintes déjà prévues par les deux zones précédentes.

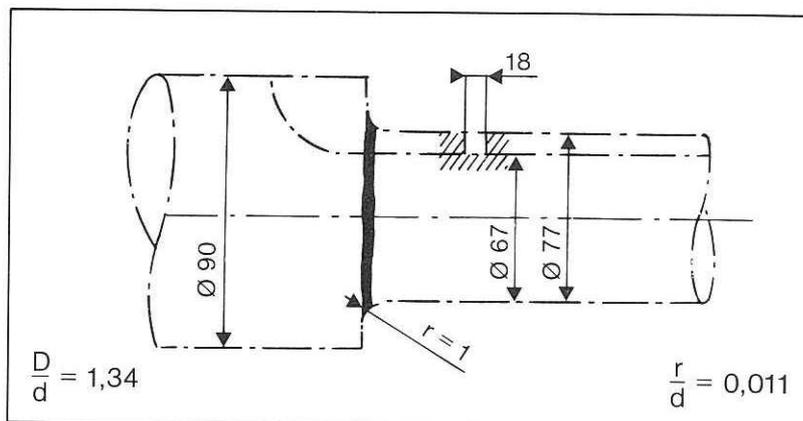
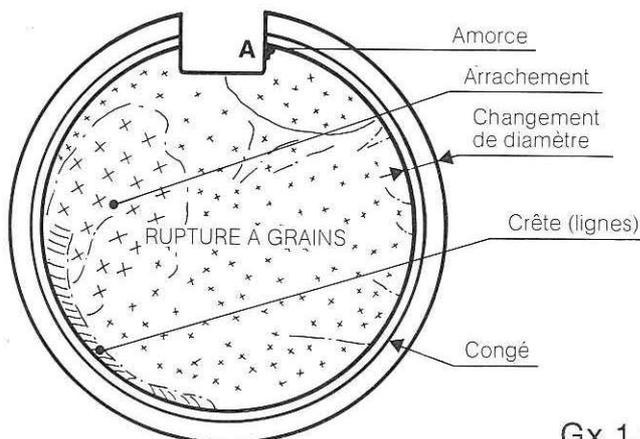


Schéma localisant la rupture

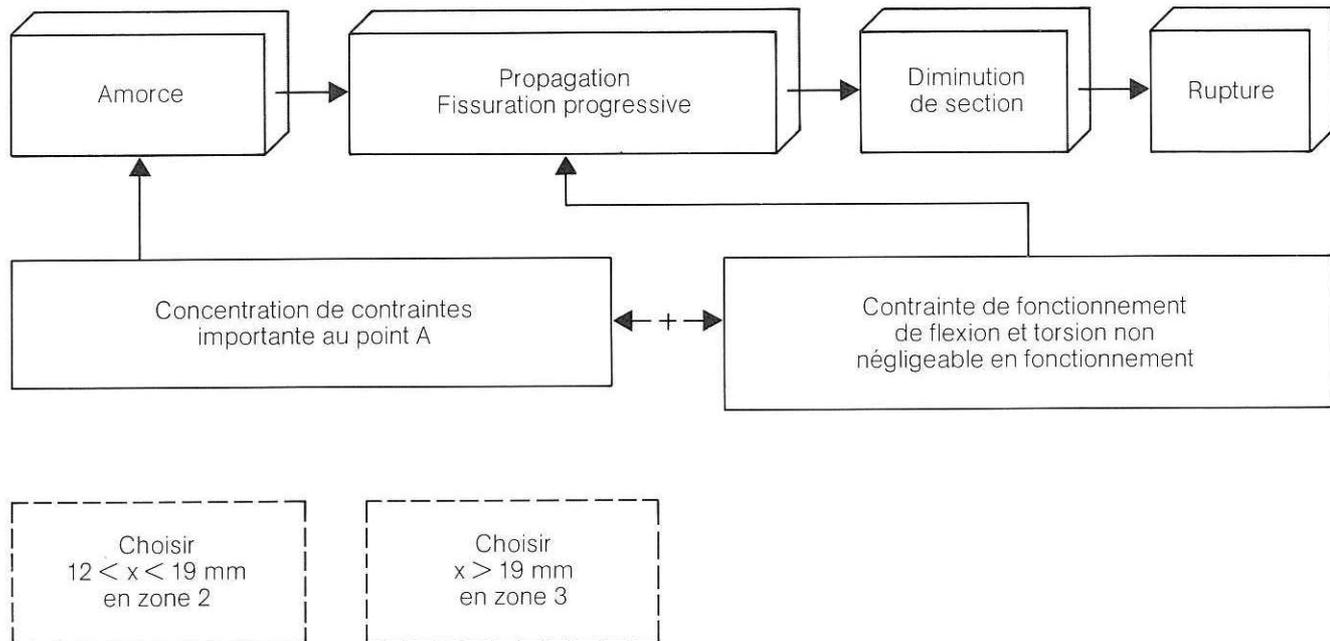


Vue d'ensemble de l'arbre



Gx 1,2

Schéma de la dégradation



Analyse chimique

Repère (%)	C	Si	Mn	S	P
Arbre rompu	0,39	0,20	0,60	0,034	0,019
Nuance XC 38 Normalisée AFNOR NFA 35 551	0,35 0,40	0,10 0,40	0,50 0,80	0,035	0,035

Examen micrographique

Structure de type perlito-ferritique.
La ferrite aciculaire caractéristique d'une surchauffe (légère) sensibilise le métal à l'effet d'entaille.

Examen micrographique dans la zone d'amorce.

Structure perlito-ferritique avec présence de ferrite aciculaire.

G x 100
Attaque Nital

