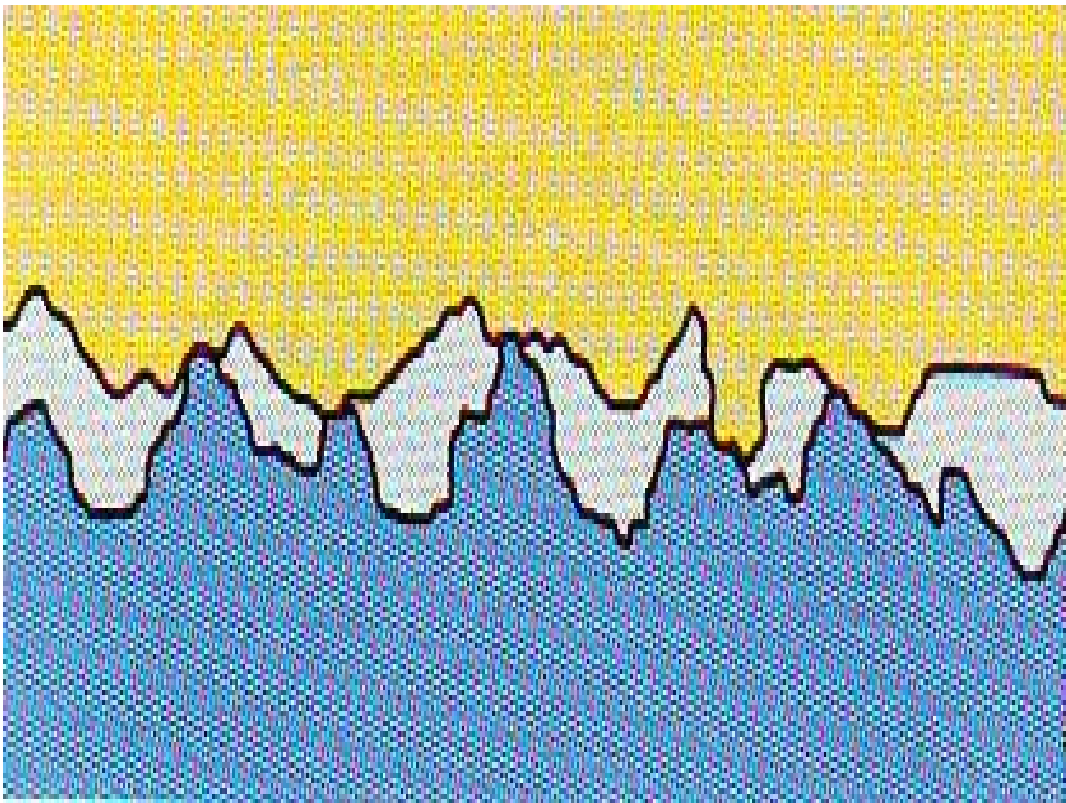


**SAID BENZAADA
M.T.BOUZIANE**

TRIBOLOGIE, PRINCIPES ET MATERIAUX



PREFACE

Cet ouvrage traite les fondements technologiques de l'usure des matériaux, les propriétés et caractérisations des aciers et fontes. Il expose les aspects de l'état de surface tels que la rugosité, le frottement et les différentes causes de l'usure.

Outre les concepts définis par les lois d'usure, au regard des propriétés des matériaux, par les phénomènes de frottement courant entre surfaces, une notion fondamentale sur l'élasticité étant insérée. L'étudiant aura à s'imprégner de l'ensemble des techniques exposées dans ce contexte.

Cependant, à travers le contenu de cet ouvrage, j'ai essayé de porter toute l'attention et le soin voulus, du point de vue pédagogique et didactique, afin de vous exposer, de manière utile, les bases fondamentales de l'usure, frottement, élasticité et propriétés des aciers et fontes très employés dans l'industrie.

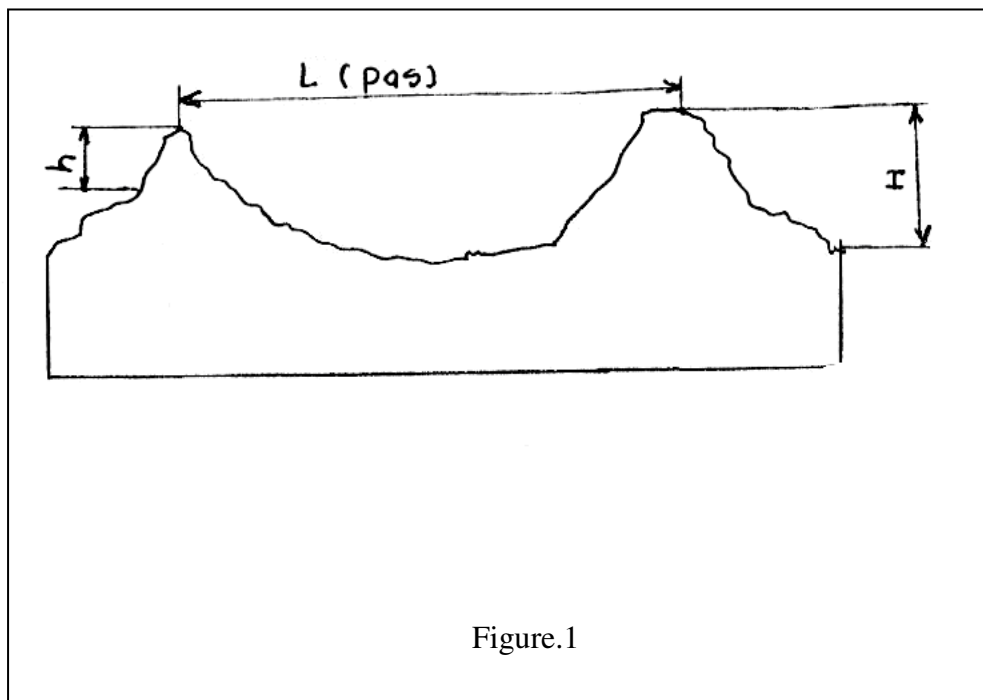
Les co-auteurs

1. ETATS DE SURFACE

1.1. Définition

Une surface réelle usinée n'est jamais parfaite, elle présente toujours des défauts par suite des erreurs systématiques d'imperfections, admissibles dans la fabrication. Les défauts peuvent être de forme (défauts macro-géométriques, ondulations) déjà étudiés dans la partie « contrôle du plan » ou de petits défauts (défauts micro-géométriques) désignés plus communément sous le nom de rugosité.

Ces deux types de défauts peuvent être distingués de la manière suivante, en considérant le schéma (fig.1), relatif à l'état de surface :



- L : Longueur.
- H : hauteur d'onde.
- h : hauteur de rugosité.
- Si $L/H = 50$ à 1000 on a une ondulation.
- Si $L/H < 50$, on a une rugosité.

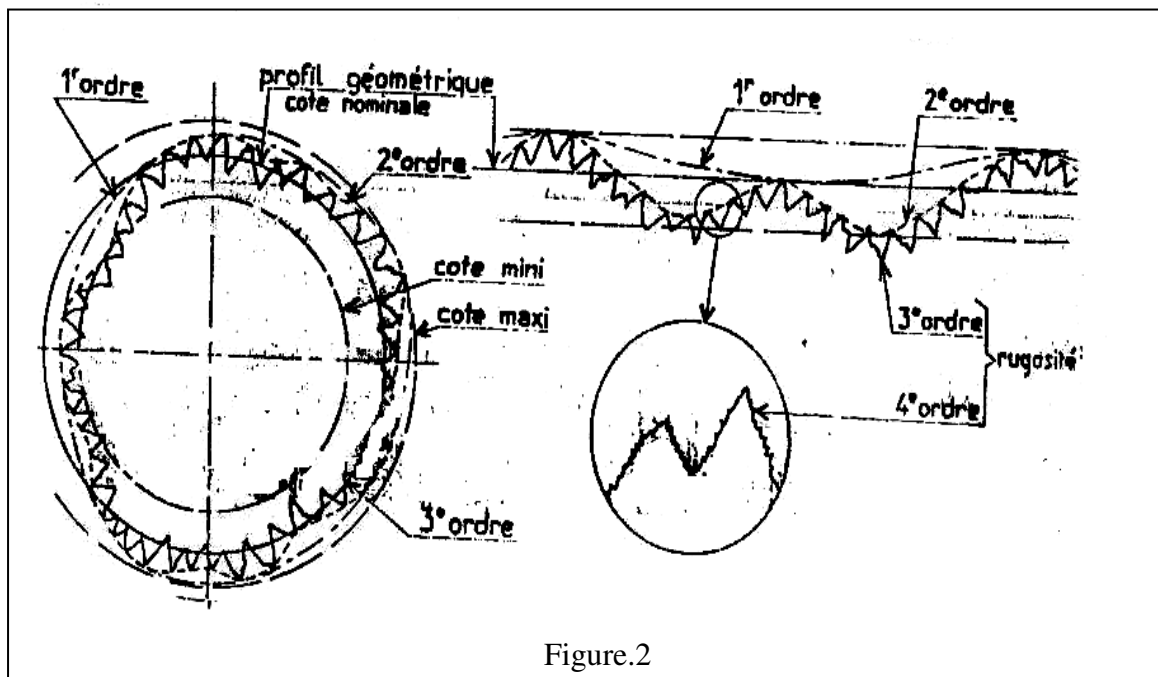
Donc la rugosité ou l'état de surface est caractérisée par des défauts de surfaces de faibles amplitudes.

1.2. Défauts de rugosité

Les défauts de rugosité possèdent une grande influence sur les fonctions des surfaces. L'état de rugosité dépend en effet des caractéristiques très diverses telles que :

- le frottement de glissement et de roulement,
- la résistance au matage,
- l'étanchéité,
- la résistance à l'écoulement des fluides,
- la facilité d'accrochage des revêtements,
- la résistance aux efforts alternés.

Une coupe longitudinale ou transversale d'une surface réelle donne un profil sur lequel on relevé des défauts de plusieurs ordres de grandeur (fig. 2).



Les défauts sont :

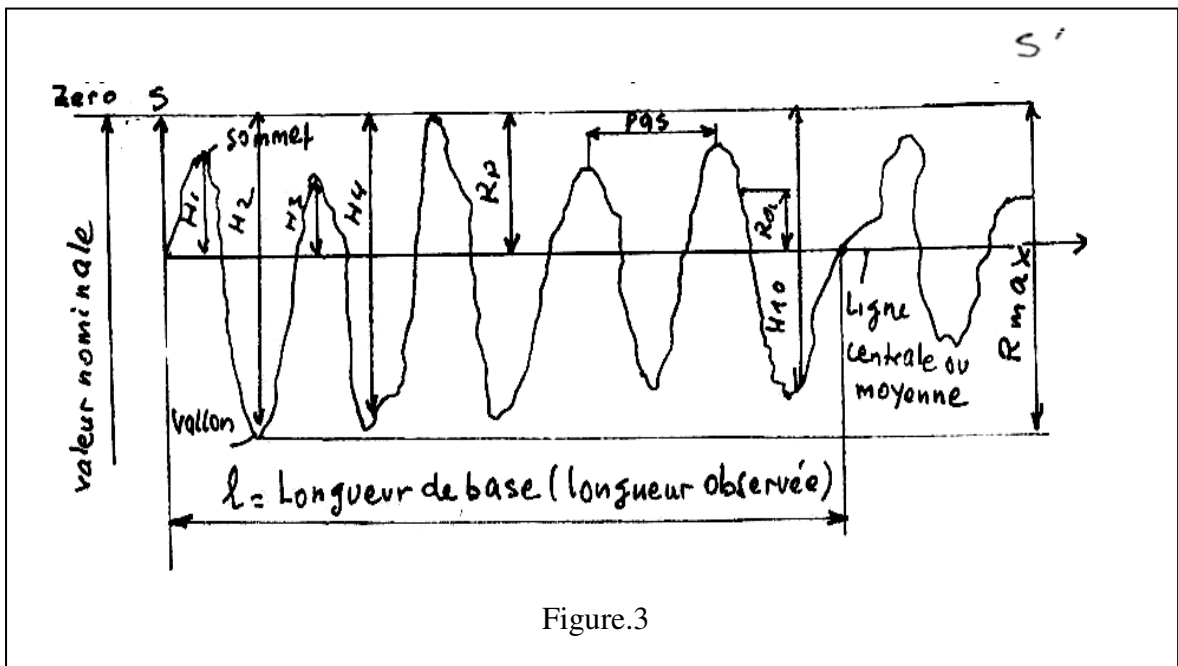
- Défauts de 1^{er} ordre : Ce sont des défauts dus à des écarts de forme (rectitude, cylindricité, etc.) et de position (perpendicularité, parallélisme, etc.). provenant de la déformation de la pièce pendant et après l'usinage, des défauts de bridage, de la flexion des éléments de la machine, d'un mauvais guidage des éléments mobiles ou de l'usure des organes de la machine-outil.

- Défaut de 2^{ème} ordre : Défauts plus petits. ayant l'aspect général d'une ondulation, et provenant de l'avance par tournage ou en fraisage, de vibrations de basse fréquence de la pièce ou de l'outil.
- Défauts de 3^{ème} ordre : Stries et sillons dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil, ou à l'avance par tour de la pièce, ou à des vibrations haute fréquence.
- Défauts de 4^{ème} ordre : Fentes et piqûres dues à des marques d'outil ou à des vibration haute fréquence.

L'ensemble des défauts de 3^{ème} et 4^{ème} ordre constituent la rugosité de la surface.

1.3. Critères de rugosité

Schématisons une surface réelle par son profil géométrique dont les écarts HI par rapport à la valeur nominale sont donnés en dix points (fig.3)



L'observation d'une telle surface permet de la caractériser par :

- Le profil géométrique SS', plan de section théorique passant par les sommets les plus élevés.
- La ligne centrale ou moyenne XX' équilibrant sommets et vallons situés de part et d'autre dans la longueur de base l, elle sert de zéro à Ra dans les profilomètres.

- c. l : est la longueur de base qui est choisie de telle façon qu'elle ne doit pas comprendre d'autres défauts. Elle est normalisée et fonction de la valeur R_p .

l en mm	R_p en microns
0,08	0 à 0,5
0,25	0,5 à 0,6
0,80	1,5 à 10
2,50	10 à 40
8,00	40 à 63
25,00	63 à 320

Une rugosité est définie par trois valeurs fondamentales appelées critères de rugosité ou

- d. R_{max} : profondeur maximale : C'est la distance entre le plus haut sommet et le plus bas vallon ou creux.
- e. R_p : profondeur moyenne entre SS' et XX' .

$$R_p = \frac{(H_1 + H_3 + H_5 + H_7 + H_9) - (H_2 + H_4 + H_6 + H_8 + H_{10})}{5}$$

- f. R_a : écart moyen arithmétique, des ordonnées y par rapport à XX' :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dy = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

R_a en microns	R_p en microns
80	320
...	...
2,50	10
1,25	6,25
...	...
0,01	0,05

La fabrication d'une surface est d'autant plus coûteuse que la rugosité est faible. Chaque procédé de fabrication est limité dans l'obtention de la rugosité.

1.4. Indication de rugosité

La rugosité est symbolisée par : $\sqrt{\quad}$

Ce signe doit être porté sur la ligne représentative de la surface ou sur son prolongement. A l'intérieur du signe, on inscrit la valeur en microns du critère de rugosité retenu choisi comme limite admissible. Exemples :

$$Rm300\sqrt{\quad} \quad Rp40\sqrt{\quad} \quad Ra1,6\sqrt{\quad} \quad 1,6\sqrt{\quad} \quad 0,08\sqrt{\quad} \quad \text{Rodé}$$

Les indications Rm ou Rp doivent être inscrites par contre Ra peut être omis ou non. Dans le cas où ne doit pas être inférieure à une certaine valeur, on indique deux valeurs limites superposées.

$$0,04 < Raz < 0,10 : \begin{matrix} 0,10 \\ 0,04 \end{matrix} \sqrt{\quad}$$

Si la valeur de la rugosité doit être complétée par le mode ou direction d'usinage, ils seront indiqués sur la ligne prolongeant le signe de la rugosité (fig.4).

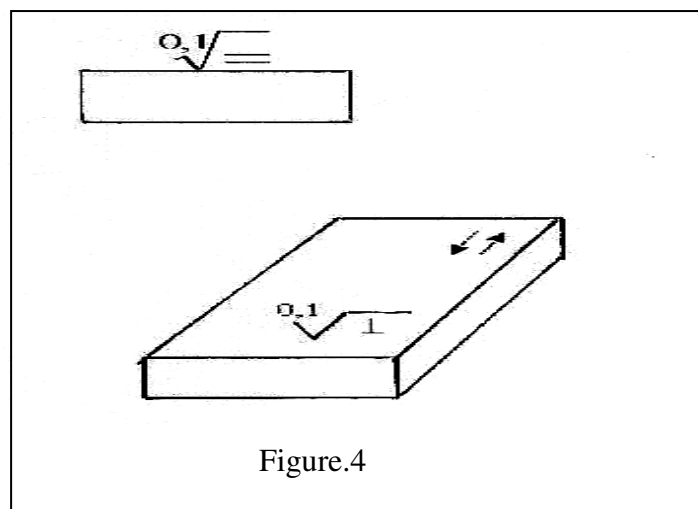


Figure.4

Parfois au lieu des critères de rugosité, on indique les signes de façonnage.

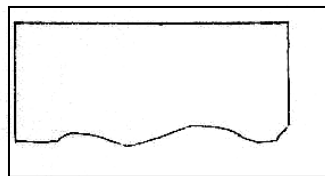
1.5. Les indices de façonnage

Dans ce paragraphe nous aborderons l'état géométrique des surfaces des pièces mécaniques. L'état de surface possède une grande influence sur les propriétés physiques et mécaniques des pièces, tels que frottement de glissement et de roulement., la résistance à l'usure, la résistance à l'écoulement des fluides, l'adhérence des revêtements etc. Tous ces défauts peuvent être contrôlés par des méthodes d'exploration aussi bien électriques qu'optiques.

Les surfaces des ébauches des pièces mécaniques sont réalisées en prévoyant des surépaisseurs de métal. L'enlèvement de ces surépaisseurs, permet d'obtenir des surfaces possédant les qualités géométriques et les dimensions exigées. L'amélioration de l'état de surface est très coûteuse, le dessin doit préciser quel degré de finissage doit être exigé. A cet effet, on utilise des symboles caractérisant l'état de surface comme indiqués ci-dessous.

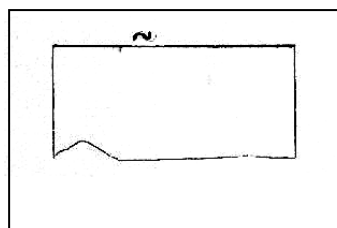
1.5.1. Surface sans surépaisseurs d'usinage

Si on ne porte aucun symbole sur les surfaces, son aspect peut être quelconque,



Le symbole \sim signifie que la surface peut rester brute ou subir une retouche grossière à l'outil

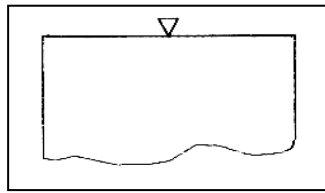
Ra =100 à 200 microns.



1.5.2. Surfaces avec surépaisseurs d'usinage

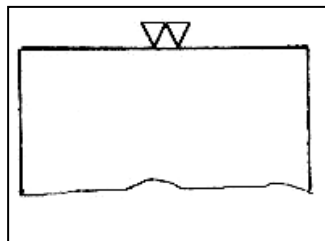
Le symbole utilisé est un triangle équilatéral.

- Un seul triangle ∇ signifie que les surfaces sont utilisées comme surfaces de contact d'assemblage et doivent avoir un bon aspect, elles peuvent être obtenues par tournage, meulage, rabotage, perçage et grattage. Ra = 12,5 à 50 microns



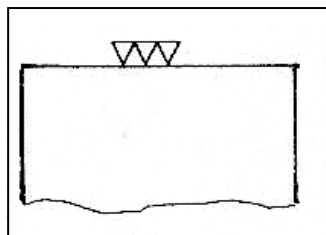
- Deux triangles▽▽, les surfaces doivent être géométriquement très correctes. Elles sont utilisées surtout pour les faces d'assemblage fixes et précises. Un parachèvement tels que le tournage de finition, le fraisage de face, le grattage, le brochage, la rectification et l'alésage, peut être nécessaire.

Ra = 1,6 à 6,3 microns.



- Trois triangles▽▽▽, ces surfaces doivent être géométriquement très correctes et posséder en outre de bonne qualités frottantes telle que surfaces d'assemblage mobile précis. Le parachèvement est obligatoire, tels que la superfinition, le polissage, le rodage à la pierre, la rectification de précision, l'alésage au diamant, le tournage au diamant etc.

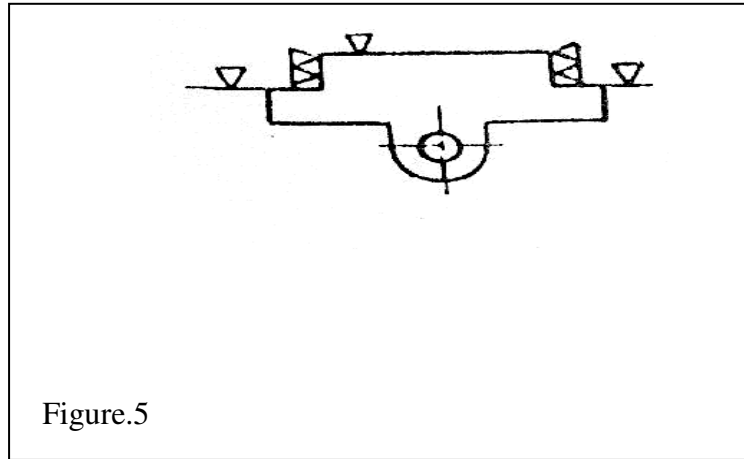
Ra = 0,05 à 0,8 microns.



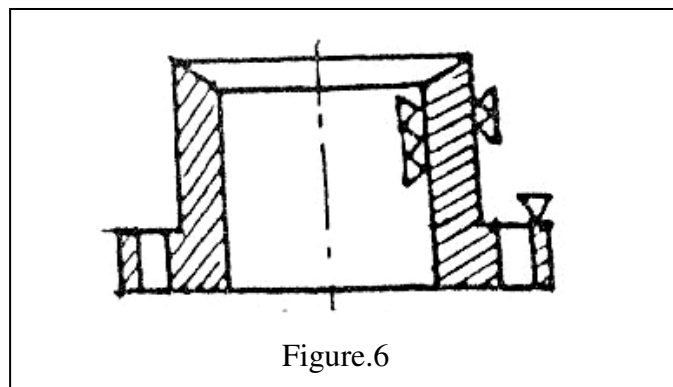
1.6. Mise en place des symboles sur le dessin

Les symboles sont placés sur les lignes représentatives des surfaces ou sur leur prolongement, autant que possible près des lignes de cotes correspondantes.

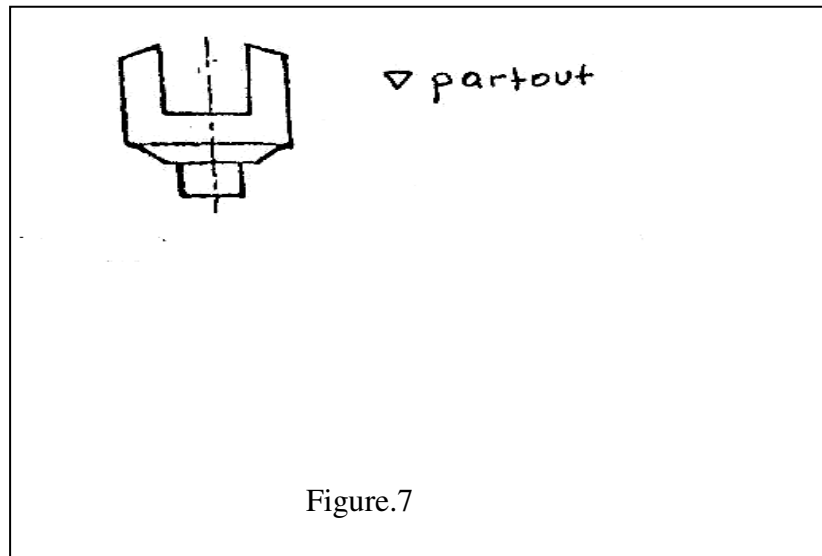
Pour une même surface, le symbole ne doit figurer qu'une seule fois quel que soit le nombre de vues. Si la pièce possède des surfaces symétriques les symboles sont placés sur chacune d'elles (fig. 5).



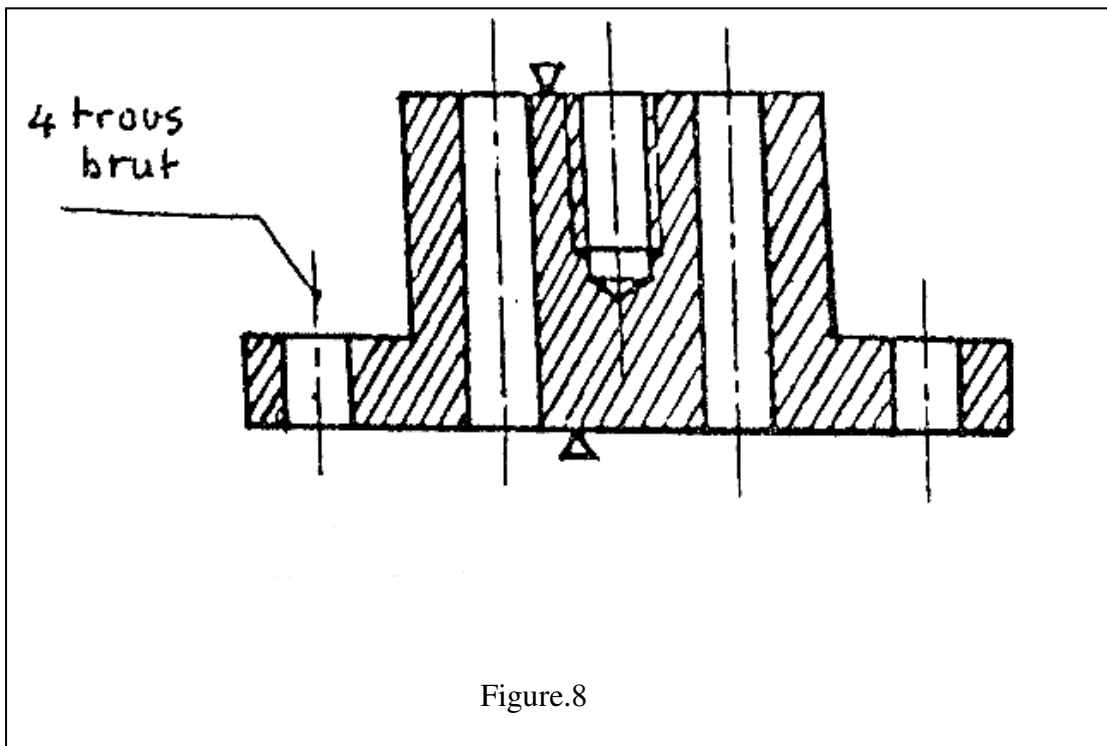
Le symbole n'est placé que sur une seule génératrice lorsqu'il s'agit des surfaces de révolution (fig. 6).



Si toutes les surfaces d'une pièce sont usinées avec le même degré de finissage, le symbole est porté à côté du repère en ajoutant, s'il y a lieu, la mention « façonné partout » (fig. 7).

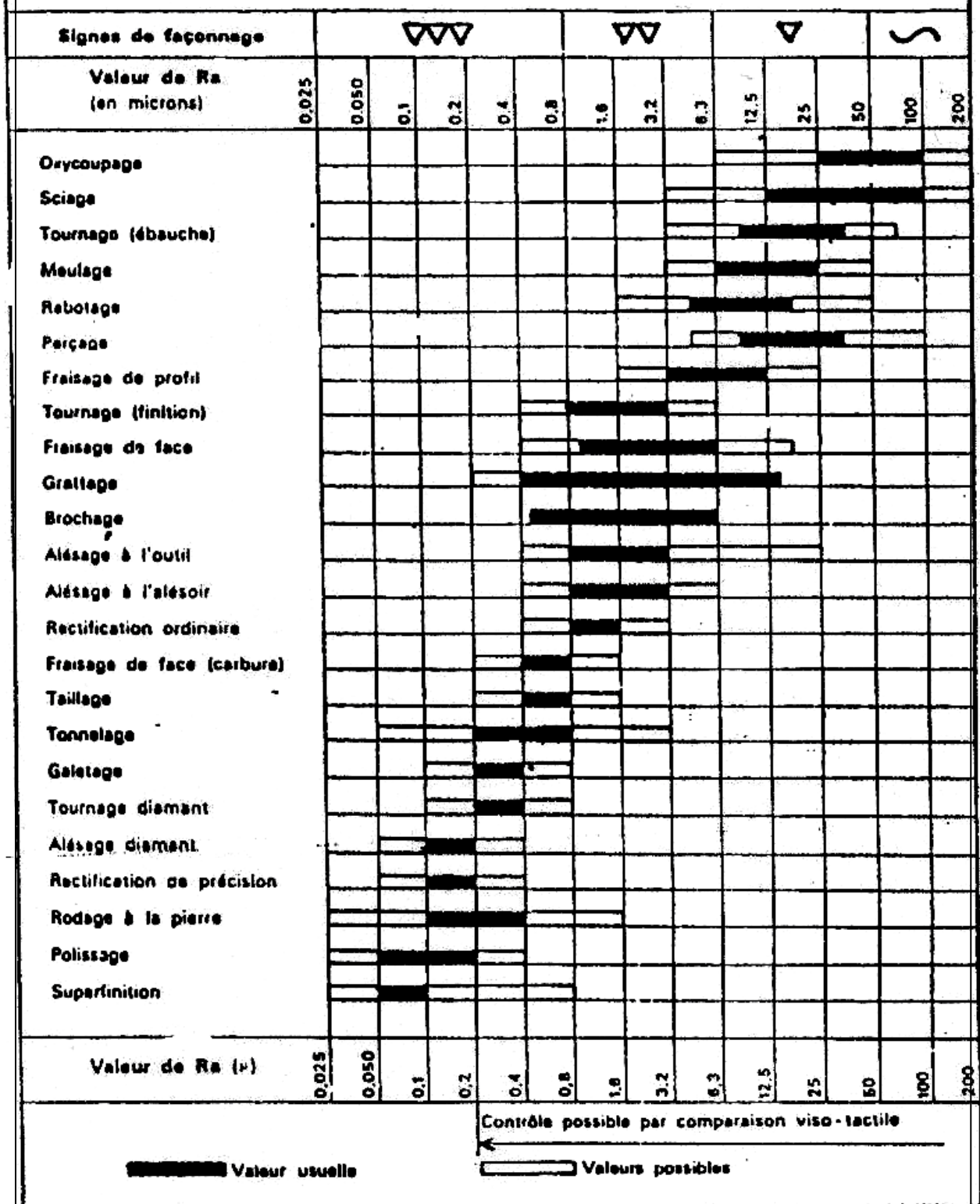


On n'indique pas le signe d'usinage des trous taraudés et des trous de faible diamètre qui sont obligatoirement percés. Par contre on repère les trous restant bruts (fig. 8)



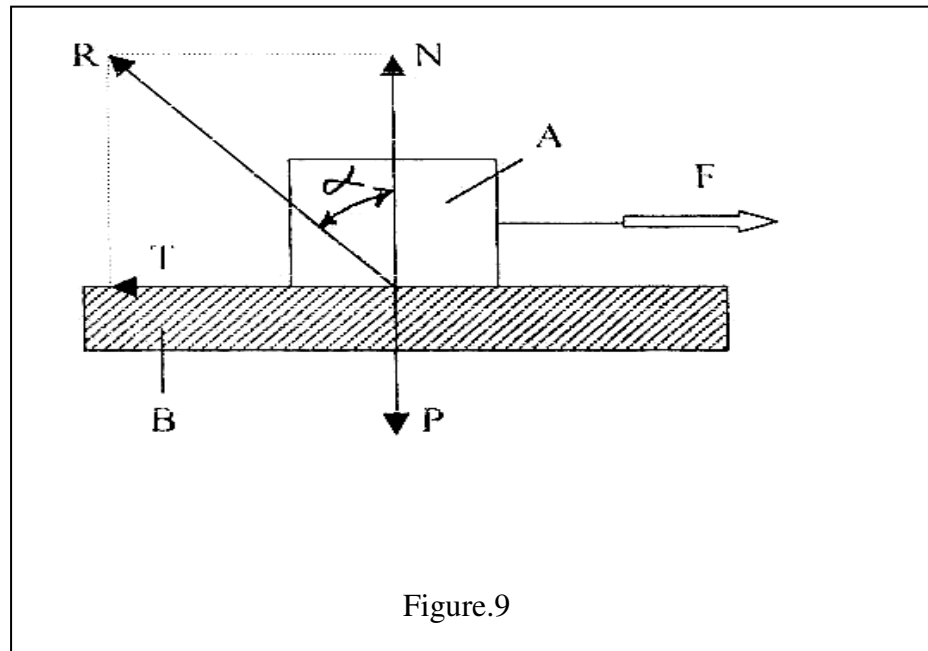
ÉTATS DE SURFACE

obtenus par les différents procédés d'usinage



2. FROTTEMENT ET LUBRIFICATION

Si un solide A glisse sur un plan horizontal (fig. 9), l'effort normal exercé par A sur B est P et la force qui le tait déplacer est F agissant suivant le sens du mouvement, cette force est destinée à vaincre la résistance au glissement appelée « force de frottement » dirigée en sens inverse du mouvement.



T est appelée force de frottement.

Le rapport $T / N = f$ est appelé coefficient de frottement.

Egalement $T / N = \operatorname{tg} \alpha = f$ avec α angle de frottement ou angle que fait R avec la normale.

Nous n'avons envisagé jusqu'ici la résistance au glissement par translation relative de deux surfaces planes ; examinons maintenant le cas d'un déplacement par rotation, exemple : celui d'une surface cylindrique (fig. 10).

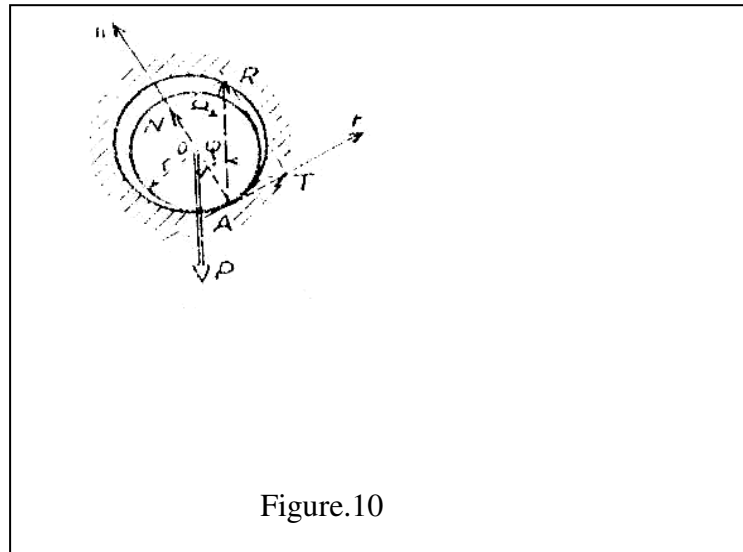


Figure.10

Sous l'action du couple C, l'arbre tourne dans l'alésage et le couple ou le moment de frottement qui s'oppose à son déplacement a pour valeur :

$$M = T.r = N \operatorname{tg} \alpha . r = N.f.r$$

$$\text{La réaction normale } N = R.\cos \varphi = P.\cos \varphi$$

Le coefficient de frottement est indépendant de la vitesse de déplacement, de l'étendue des surfaces en contact, donc de la pression. Par contre, il dépend de la nature des matériaux en contact, de l'état des surfaces (rugosités) frottantes.

La valeur du coefficient de frottement est, par exemple : de 0,15 à 0,18 pour les métaux usuels (fontes, aciers, bronzes), de 0,25 à 0,35 pour le frottement cuir sur fonte, de 0,30 à 0,50 pour le frottement des férodos sur acier (ou fonte). Le coefficient de frottement est plus grand au démarrage qu'en marche, ensuite il reste sensiblement constant, puis il diminue quand la vitesse augmente.

Il existe aussi trois plages du coefficient de frottement :

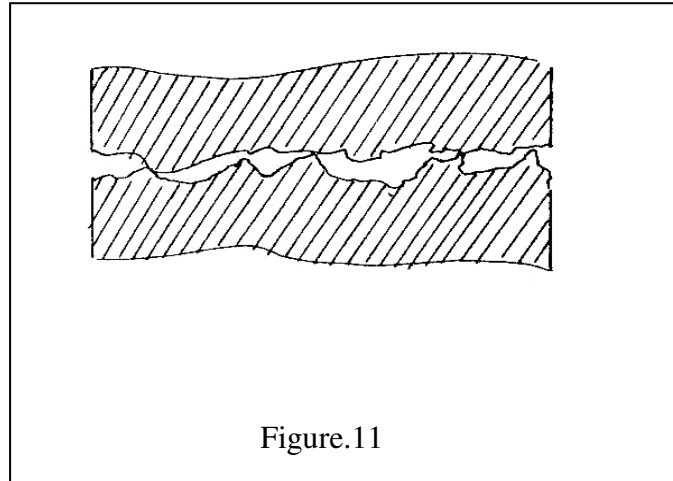
- de glissement de l'ordre de 0,1 à 1
- de roulement de l'ordre de 0,001 à 0,01
- fluide de l'ordre de 10^{-3}

Maîtriser la grandeur et l'effet du coefficient de frottement sur le comportement des pièces en contact entraînera une protection contre l'usure adhésive générée de ce contact

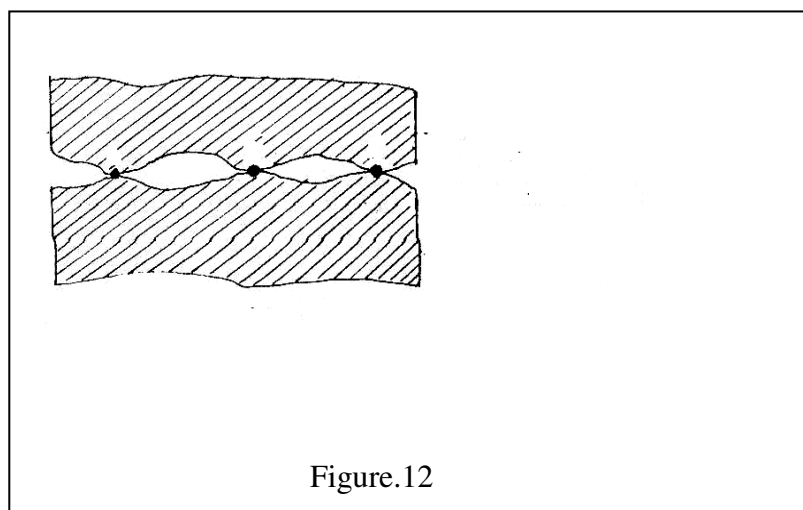
2.1. Causes et effet du frottement

Les causes de la résistance au glissement (frottement) sont dues :

- d'une part aux irrégularités des surfaces en contact, ce qui détermine un enchevêtrement des aspérités; d'où nécessité d'un effort tangentiel pour franchir où creuser ces aspérités (fig. 11).



- d'autre part, l'étendue réelle des surfaces en contact étant réduite à quelques zones où la pression est très forte, il en résulte une déformation importante et une véritable soudure à froid dans le cas de deux métaux (fig. 12). La force de traction doit cisailer les zones de jonction qui se sont ainsi formées. Il y a donc arrachement de particule et élévation de température



- et enfin lorsque les surfaces de frottement ont subi un polissage très poussé, la résistance au glissement est encore notable; les forces d'attraction moléculaire jouent donc un rôle important.

Donc les forces de frottement procèdent de deux origines distinctes :

a. Lorsque, même à faible charge, deux surfaces rugueuses se déplacent l'une par rapport à l'autre, leurs aspérités s'entrechoquent et il faut développer un effort important pour perpétuer le mouvement (tant que les surfaces ne sont pas rodées).

b. Deux surfaces polies pressées l'une contre l'autre ont tendance à adhérer l'une sur l'autre et à se souder l'une à l'autre lors d'un déplacement faible, même sous l'effet d'une charge faible. Si les surfaces sont parfaitement polies et propres, l'absence d'une couche d'air inter-faciale et conduit à un contact généralisé et à un effort de frottement considérable (cas de deux vitres parfaitement nettoyées avec un solvant volatil). Les attractions intermoléculaires provoquent alors un coefficient de frottement supérieur à 100 et il faut exercer un effort d'une tonne-force pour déplacer une masse de 10 Kg.

Les effets du frottement sont considérables dans les machines et diminuent par conséquent leur rendement car une partie de l'énergie motrice est utilisée pour vaincre les frottements. Le travail utile W_u est inférieur au travail moteur W_m d'où :

le rendement : $W_u / W_m < 1$.

Les effets du frottement ont des conséquences majeures sur l'échauffement et risque de grippage. L'énergie mécanique dépensée pour vaincre le frottement se transforme en énergie calorifique en provoquant l'échauffement des surfaces en contact et qui peut conduire à la dilatation des pièces, modification du jeu entre pièces par exemple : le cas d'un alésage et d'un arbre, la dissipation de cette chaleur étant en général plus rapide. Pour l'alésage que pour l'arbre; le jeu fonctionnel subit une réduction si l'échauffement est trop important, il peut se produire un blocage de l'arbre dans l'alésage par grippage (micro-soudure au point de contact).

L'échauffement peut conduire aussi à la modification des propriétés des matériaux. Les effets du frottement peuvent entraîner aussi l'usure des pièces en contact, tels que l'arasement des aspérités des surfaces en contact, l'arrachement des micro-soudures aux points de contact, l'abrasion des surfaces par les particules arrachées etc. Donc il en résulte un enlèvement de matière et une modification du jeu initial, quelques fois de la forme (ovalisation).

L'usure dépend de plusieurs facteurs tels que : propriétés mécaniques des matériaux, pression de contact, état de surfaces, température de fonctionnement etc. L'usure peut être limitée par des dispositifs de rattrapage de jeu où on réduit les frais en reportant l'usure sur

l'une des pièces, moins chère ou plus facilement remplaçable que l'autre. Il est donc nécessaire de réduire le frottement pour tous les mécanismes de transformation de mouvement. Par contre le frottement est nécessaire pour les systèmes de freins et d'embrayages.

2.1.1. Réduction du frottement et de l'usure

Maîtriser la grandeur et l'effet du frottement sur le comportement des pièces en contact entraînera une protection contre l'usure adhésive générée de ce contact. Pour réduire le frottement on peut ainsi agir soit :

2.1.1.1. Sur la conception technologique et géométrique

Elle consiste à diminuer les échauffements inter-faciaux et à veiller sur les concepts technologiques suivants :

a. Réduction du risque de grippage :

Elle est obtenue indépendamment du refroidissement, par le choix des deux matériaux en contact, ne pouvant pas se soucier

La réduction de l'usure est obtenue par l'emploi de métaux durs, compacts, à structure fine, par certains traitements de surface tels que cémentation et trempe, nitruration, sulfinisation ainsi que l'amélioration des états de surfaces (rectification, rodage, polissage etc.).

Les matériaux utilisés sont généralement les fontes et les aciers alliés et non alliés. Les fontes donnent de bonnes surfaces frottantes grâce à leur structure (carbone sous forme de lamelles de graphite), et à leur propriété de retenir le lubrifiant. Les plus utilisées sont la fonte grise et la fonte à graphite sphéroïdal (coulisseaux cylindres de moteurs, pistons, segments etc.). Les aciers sont utilisés pour la fabrication des arbres; leurs qualités frottante et leur dureté peuvent être améliorés par traitement de surface (cémentation, nitruration, sulfinisation, etc.) ou par un dépôt électrolytique (chrome, nickel). Les types d'acier les plus utilisés sont XC 18, XC 38, 100 C6, 35 CD4, etc.

Outre la fonte et l'acier, d'autres matériaux peuvent remplir aussi les conditions exigées, ce sont les alliages de cuivres (bronze ou plomb, cuivre au plomb, bronze d'aluminium). Les antifrictions (ou régules); ce sont des alliages complexes contenant des métaux durs (cuivre, antimoine), résistants à l'usure et pouvant supporter des charges élevées, et des métaux mous (plomb, étain) permettant d'obtenir une surface de contact maximale. Les alliages divers tels que alliages de zinc, alliages d'aluminium, alliages de cadmium.

b. Réduction des pressions de contact et de vitesse :

La pression de contact entre les pièces ainsi que leur vitesse de fonctionnement influent beaucoup sur l'usure, il croît avec ces deux paramètres.

c. Refroidissement convenable des surfaces :

Il peut s'effectuer soit par :

- Le choix des matériaux thermo-conducteurs.
- Le choix des pièces favorisant la dissipation de la chaleur (l'augmentation du volume, donc de la masse, permet de diminuer l'échauffement).
 - L'emploi d'un fluide réfrigérant qui peut être le lubrifiant (graissage par circuit d'huile avec refroidissement de celle-ci).

d. Amélioration de l'état de surface :

Soit par des procédés mécaniques (rectification, rodage, polissage etc.) ou par des procédés chimiques et thermiques (revêtement de surface, durcissement etc.).

2.1.1.2. Interposition d'un film lubrifiant

La deuxième possibilité de protéger les deux surfaces antagonistes contre l'usure adhésive est l'interposition entre les deux surfaces d'un film lubrifiant ou autolubrifiant à faible résistance au cisaillement. Le film peut être (dépôts superficiels) :

- un métal mou (Pb, Sn, Cu, In) déposé en faible épaisseur sur un substrat très dur (coussinets minces, garnitures d'antifriction etc.),
- des sels métalliques autolubrifiants tels que les sulfures, les chlorures, les phosphates apportés soit par traitement de surface (sulfuration) soit par formation in situ, par action d'additifs extrême pression incorporés dans le lubrifiant (additifs soufrés, chlorés et phosphorés essentiellement),
- des composés possédant une structure favorables, se cisillant facilement par clivage tels que graphite, bisulfure de molybdène (MoS_2),
- des matières plastiques, tels que les matériaux stratifiés (permaloy, céleron, textolite), ce sont des matériaux constitués de couches de papier, tissu, bois, etc., imprégnés de résine synthétique, fortement comprimés et agglomérés par polymérisation ou polycondensation de la résine. Le nylon et le rilsan sont des résines synthétiques possédant une grande résistance mécanique, une grande résistance à l'usure, un faible coefficient de frottement, une marche silencieuse. Le téflon (polytétrafluoréthylène) possède un faible coefficient de frottement, une grande résistance à l'usure, une grande inertie chimique et une résistance à la chaleur et au froid.

2.2. La lubrification

Il résulte de tout ce qui précède concernant les lois du frottement sec et les inconvénients du frottement entre les corps mobiles d'une machine, qu'il s'avère très nécessaire de substituer au cisaillement de la matière solide superficielle, le cisaillement d'un fluide visqueux que l'on introduit dans l'interface séparant les deux solides, c'est à dire l'interposition d'une couche fluide entre les surfaces frottantes permet de diminuer considérablement la résistance au glissement donc de protéger contre l'usure adhésive les pièces en contact. Donc la lubrification est la troisième solution de protéger les pièces frottantes contre l'usure.

En plus, il est nécessaire que le milieu résistant inter-facial possède une épaisseur suffisante pour éviter tout contact entre les aspérités des surfaces frottantes quelles que soient les valeurs des charges appliquées. Dans ce cas lorsque la vitesse relative des surfaces est faible et que la viscosité du fluide inter-facial est insuffisante, il faut, pour éviter tout contact désastreux que :

- les déformations subies par les surfaces en regard sous l'effet de la charge appliquée soient aussi

 - faibles que possible,

- la rugosité des surfaces en regard soit aussi faible que possible,

Le lubrifiant doit remplir certaines conditions tels que :

- la température d'ébullition soit assez élevée,

- la température de solidification soit relativement basse,

- la faible affinité pour l'oxygène de l'air,

- être passif vis à vis des surfaces frottantes de façon à assurer un long usage sans modification notable des propriétés,

- adhérer aux surfaces de frottements (pouvoir mouillant).

Pratiquement, seules les huiles et graisses d'origine minérale remplissent suffisamment ces conditions pour pouvoir être utilisées comme lubrifiants.

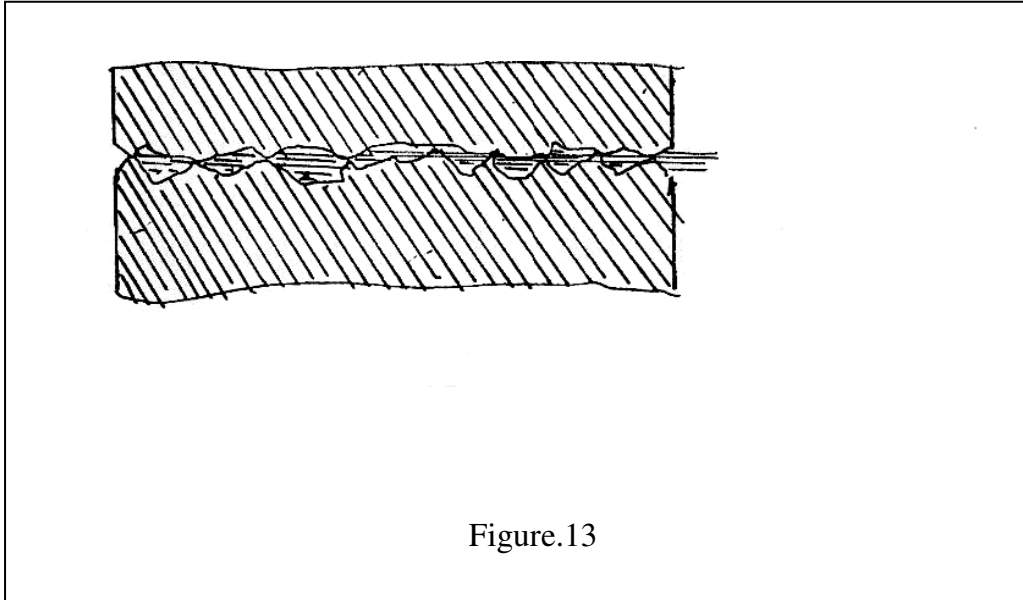
2.2.1. Modes d'action d'un lubrifiant

On distingue essentiellement deux régimes de lubrifiant :

2.2.1.1. Le régime onctueux

Dans ce cas l'épaisseur de la couche lubrifiante est inférieure à la hauteur des aspérités des surfaces frottantes. Les surfaces restent en contact par leurs aspérités auxquelles adhère une faible couche de lubrifiant offrant une résistance mécanique non négligeable à l'écrasement et l'arrachement et c'est cette résistance qui définit l'onctuosité du lubrifiant ou le pouvoir graissant

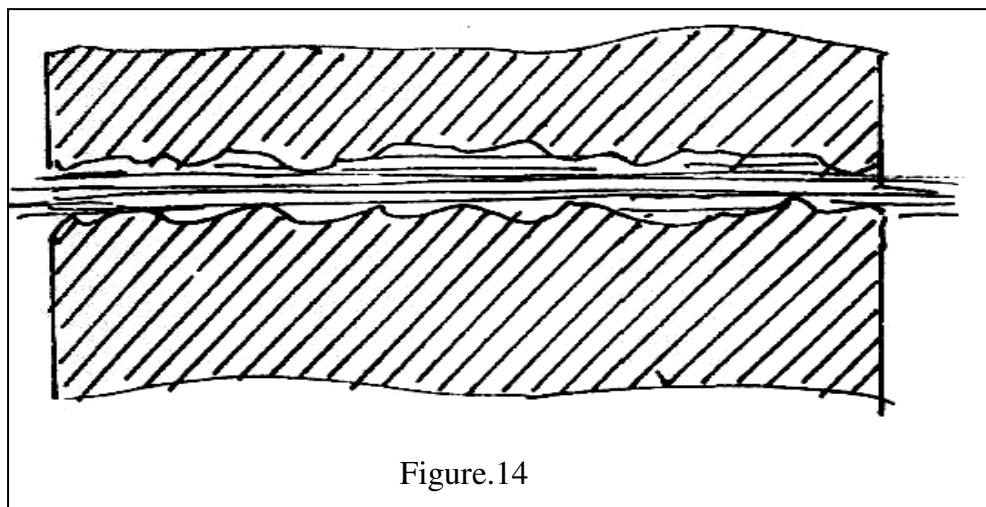
en couche mince (l'onctuosité ne se chiffre pas) (fig. 13). La couche du lubrifiant est discontinue et le coefficient de frottement f est de l'ordre de 0,008: à 0,12.



2.2.1.2. Le régime hydrodynamique

Le régime hydrodynamique apparaît lorsque le déplacement relatif d'une surface par rapport à l'huile engendre, au sein de cette huile inter-faciale, une contraction telle que la pression induite équilibre la charge exercée entre les deux surfaces.

Dans ce cas la couche d'huile est suffisamment grande pour que les aspérités de pièces ne puissent venir en contact (fig.14), l'épaisseur du film d'huile est alors 1000 fois plus élevée que dans le régime onctueux et la résistance de glissement est très faible.



Le coefficient de frottement et l'épaisseur du film d'huile varient :

- avec la viscosité μ du fluide,
- avec la vitesse du glissement relatif des surfaces : U ,
- et en raison inverse de la pression moyenne P équilibrant la charge.

$$f = F / P = \mu \cdot U / P = 0,001 \text{ à } 0,0001$$

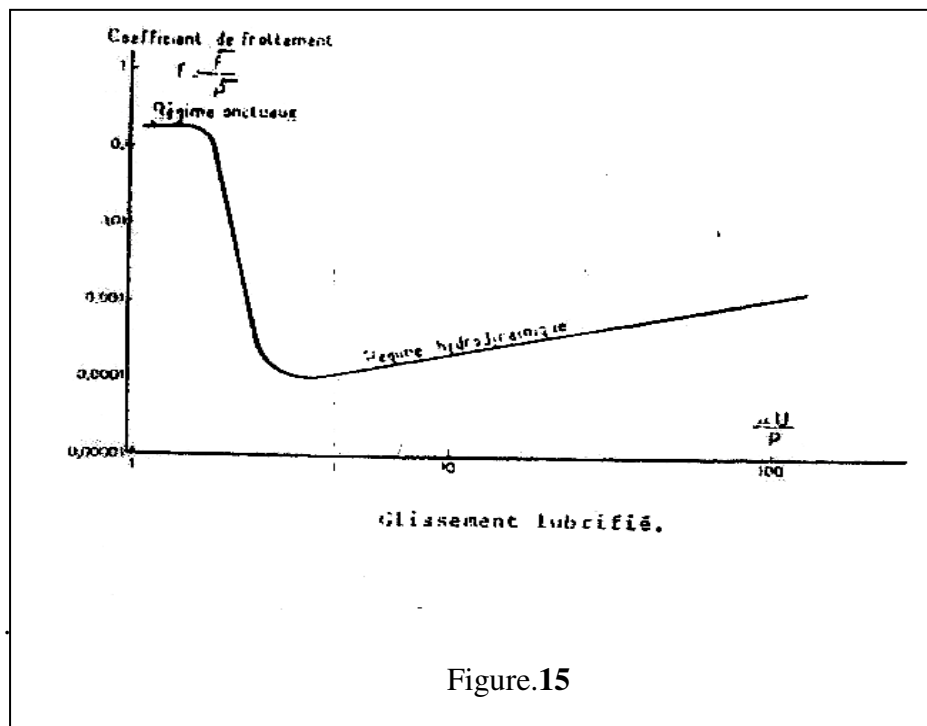


Figure.15

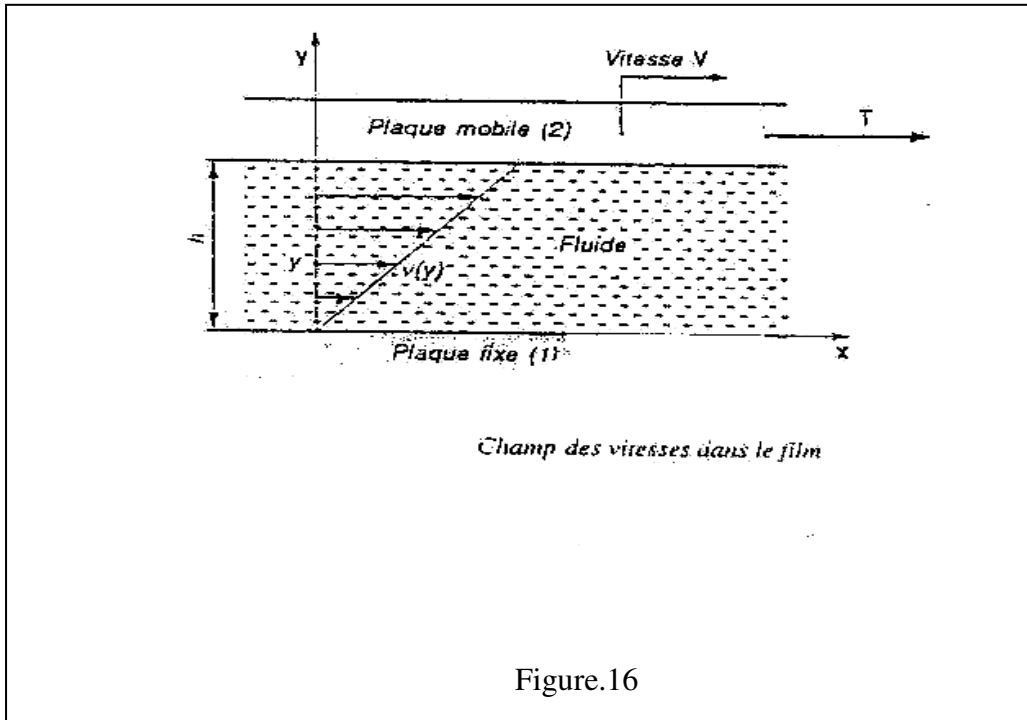
En régime hydrodynamique, l'énergie de frottement est développée au sein même de l'huile et est évacuée grâce à la circulation d'huile. La lubrification peut être aussi hydrostatique, c'est à dire, effectuée par une source de pression extérieure au mécanisme.

Quelque soit le phénomène mis en jeu, l'épaisseur minimale du film doit être plus grande que la hauteur des aspérités des surfaces, sinon on est en présence de lubrification hydrodynamique où le film d'huile a une épaisseur relativement importante (6 à 8 μm lorsque les surfaces sont rectifiées).

2.2.2 Caractéristiques d'un lubrifiant

2.2.2.1 La viscosité

Si on considère deux plaques parallèles horizontales distantes de h (fig. 16)



Un fluide sépare ces deux plaques. L'épaisseur h est très faible par rapport aux dimensions des plaques, donc on parle de film d'huile. On constate qu'il est nécessaire d'exercer une force tangentielle T parallèle à la direction du filet pour déplacer tangentiellement la plaque (2) à la vitesse V , par rapport à la plaque (1) supposée immobile.

Si l'écoulement est linéaire : le champ des vitesses admet l'allure représentée sur la figure 39, il y a donc glissement des couches de fluide les une par rapport aux autres, et l'on peut définir un gradient de vitesse :

$$dV(y) / dy$$

La résistance au glissement est caractérisée par une contrainte de cisaillement $\tau(y)$. Le modèle Newtonien suppose qu'il existe une relation de proportionnalité entre la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse comme suit :

$$\tau(y) = \mu \cdot dV(y) / dy$$

μ est le coefficient de viscosité dynamique qui caractérise donc la résistance au glissement fluide sur fluide.

Dans le système SI est exprimée en Kg/m.s ou N s/m² et porte le nom de pascal-seconde (Pa.s). Dans le système CGS, l'unité de viscosité dynamique est g/cm.s et s'appelle le poise (Po). Généralement on utilise le centpoise (cPo).

$$1 \text{ Pa.s} = 10 \text{ Po} = 10^3 \text{ cPo.}$$

On utilise également la viscosité cinématique ν qui est le quotient de la viscosité dynamique par la masse volumique : $\nu = \mu / \rho$

L'unité de mesure de ν dans le système SI est m²/s. Dans le système CGS elle est le cm²/s qui s'appelle aussi le Stokes (St) il existe aussi le centistokes (cSt) :

$$1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} = 10^6 \text{ cSt.}$$

La propriété inverse de la viscosité est la fluidité.

Les raffineurs caractérisent les huiles livrées aux mécanismes par leur viscosité cinématique ν qui dépend des qualités d'écoulement de l'huile dans un tube capillaire de 200 cm³. La viscosité est mesurée par le quotient de la durée d'écoulement à travers ce tube à 20°C d'un fluide par la durée d'écoulement du même volume d'eau distillée. Il s'agit de la vitesse relative par rapport à l'eau, elle s'exprime en degrés Engler (E:) et elles varient suivant la qualité d'huile de 2E à 15 pour les huiles courantes à 50°C. L'eau à 20°C possède une viscosité de 1 cSt. A titre indicatif, la viscosité cinématique d'une huile fluide pour moteur est voisine de celle de l'air, aux températures ordinaires. Or on ne lubrifie pas les moteurs avec l'air.

2.2.2.2. Influence de la température et de la pression sur la viscosité

Les paramètres les plus influents sur la viscosité d'un fluide sont la température et la pression.

a. Influence de la pression :

La viscosité des huiles minérales croît avec la pression de façon quasi exponentielle. Une viscosité d'huile peut atteindre le double de sa valeur pour une pression croissant de 0 à 300 MPA. Il en est de même pour les pompes à haute pression.

b. Influence de la température :

La viscosité des huiles minérales décroît de façon quasi exponentielle avec la température (fig. 17)

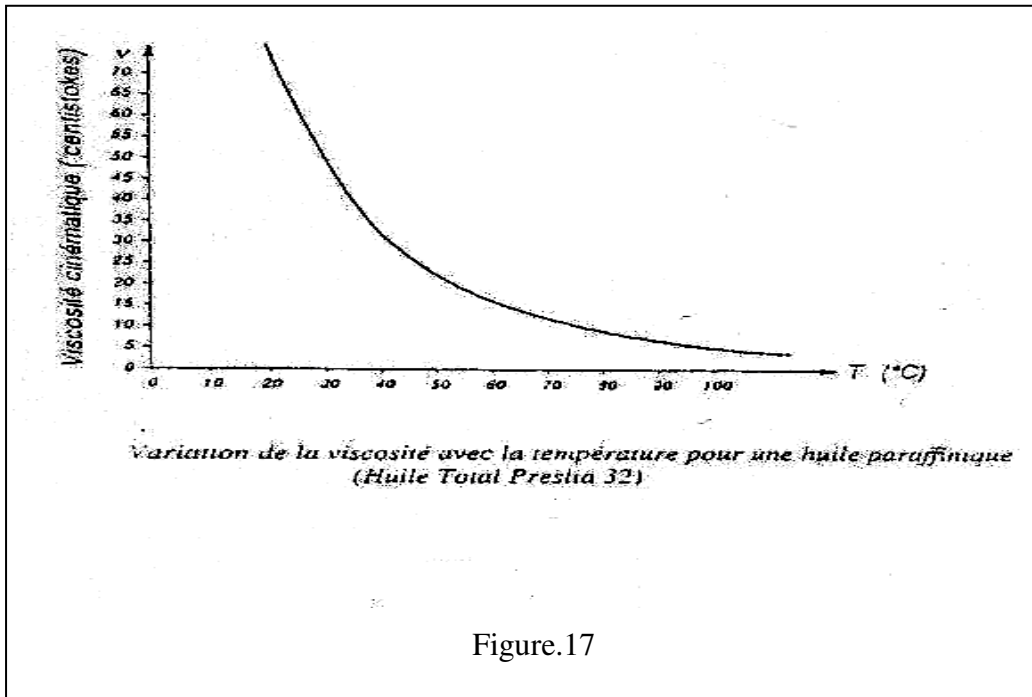


Figure.17

On peut approcher localement la variation de la viscosité dynamique par une relation de la forme :

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{[\alpha \cdot (p - p_0) - \beta (T - T_0)]} \text{ avec :}$$

- α : coefficient de piézo-viscosité.
- β : coefficient de thermo-viscosité.
- μ_0 : viscosité dynamique pour la pression P_0 et la température T_0 .

La viscosité en poiseilles (Pos) de quelques fluides à 20°C et à pression atmosphérique :

- Air : $1,8 \cdot 10^{-5}$
- Eau : 10^{-3}
- Huiles minérales : 10^{-2} à 12,5
- Glycérine : 0,87
- Huile de ricin : 0,725

Le tableau ci-dessous donne la classification des huiles industrielles en fonction de leur viscosité.

Classe ISO de viscosité	Viscosité cinématique cSt à 40° c	Limites de la viscosité cinématique à 40° c	
		Mini	Maxi
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42
ISO VG 3	3,2	2,88	3,52
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48
ISO VG 10	10	9,00	11,00
ISO VG 15	15	13,50	16,50
ISO VG 22	22	19,80	24,20
ISO VG 32	32	28,80	35,20
ISO VG 46	46	41,40	50,6
ISO VG 68	68	61,20	74,8
ISO VG 100	100	90	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1000	1000	900	1100
ISO VG 1500	1500	1350	1650

Dans cette classification, la viscosité cinématique médiane de chaque classe doit être environ 50% plus élevée que celle de la classe précédente.

Les viscosités à d'autres températures sont généralement données sous formes de courbes de viscosité-températures ou exprimées en termes d'indice de viscosité. L'abaque (fig.18) permet une conversion rapide d'unités et fournit la loi viscosité températures d'un certain nombre d'huiles normalisées.

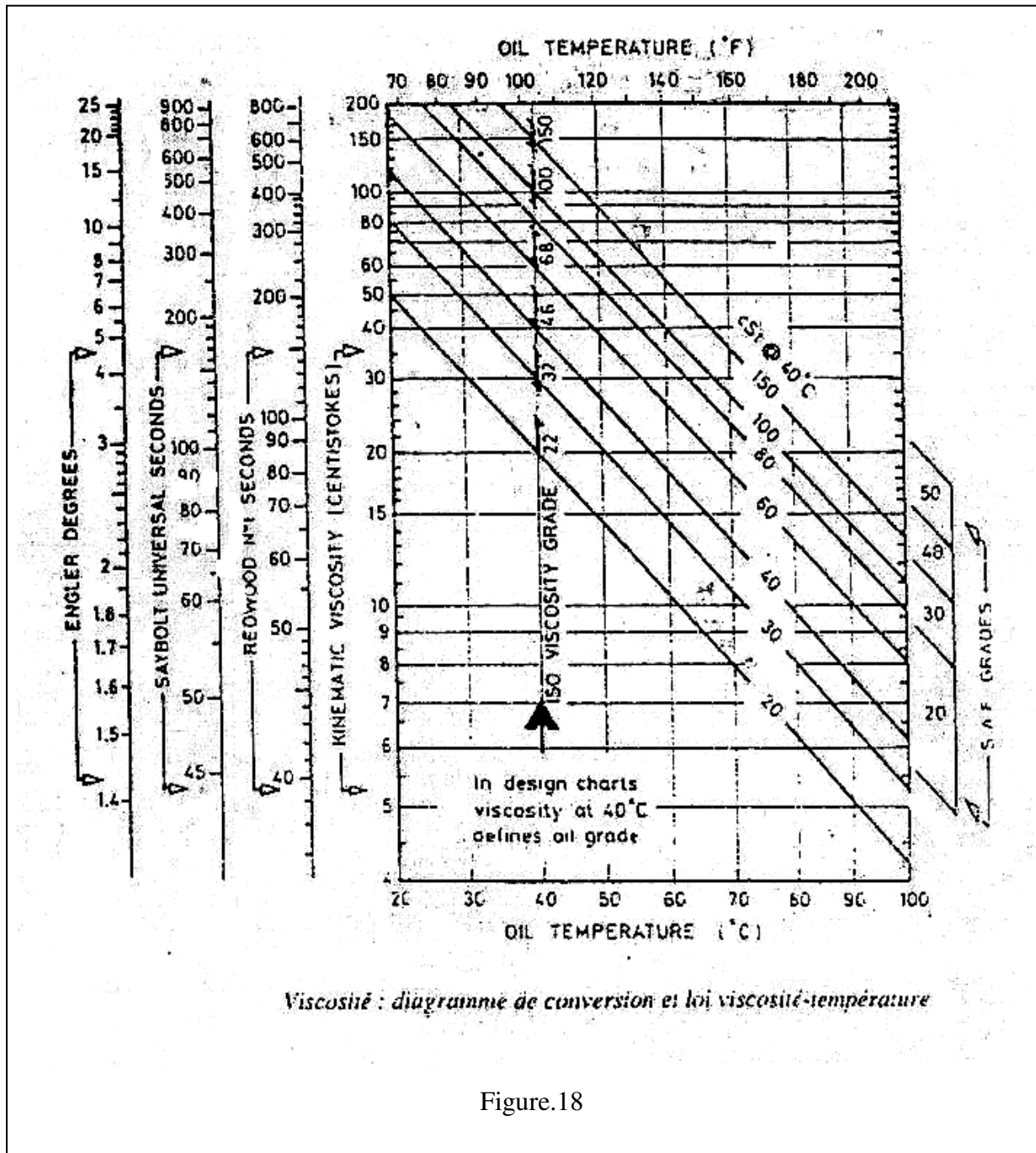


Figure.18

2.2.2.3. L'onctuosité

Elle exprime la possibilité, pour un lubrifiant, d'adhérer aux surfaces frottantes et de former une couche permanente entre ces surfaces. Donc c'est la résistance qu'oppose le lubrifiant à son arrachement de la surface frottante sur laquelle il est établi. L'onctuosité varie dans le même sens que la viscosité et elle ne se chiffre pas.

2.2.2.6. L'inflammabilité

Elle est mesurée par le point d'éclair qui est la température pour laquelle les vapeurs émises s'enflamment au contact d'une flamme.

2.2.2.7. La résistance au froid

Une huile figée ou gelée peut empêcher toute lubrification.

2.2.2.8. Caractéristiques diverses

Densité, couleur, volatilité, solubilité, point de fusion, point d'ébullition, acidité, tension superficielle etc.

2.2.3. Formation du film d'huile

On considère le cas de déplacement de deux surfaces cylindriques par exemple l'arbre et le coussinet. L'apparition d'une pression interne exige simplement la création d'une contraction géométrique entre l'entrée et la sortie de la veine d'huile, se traduisant par une vitesse moyenne de sortie supérieure à la vitesse moyenne d'entrée. L'obtention de cette contraction exige que :

- a. Le diamètre de l'arbre et le diamètre du logement soient différents, ce qui se traduit par un jeu diamétral. Ce jeu donne lieu à un coin d'huile déterminant la formation d'un film continu.
- b. Les centres des sections droites circulaires de l'arbre et du logement soient distincts ; la mise en position de l'arbre au sein du logement s'effectue sans contrainte, pouvant tourner librement autour d'un axe.

Une zone de détente (fig.19) fait suite à une zone de contraction, et inversement par la suite, la limite entre les zones étant sur la ligne des centres des cercles.

Cette géométrie entraîne la création d'un espace convergent-divergent qui compte tenu d'une part de l'adhérence du fluide de l'arbre et d'autre part de la vitesse de rotation de celui-ci, crée un champ de pression qui s'oppose à la charge extérieure. L'existence d'un espace divergent entraîne la rupture du film pour une zone située légèrement en aval de la zone d'épaisseur minimale du film.

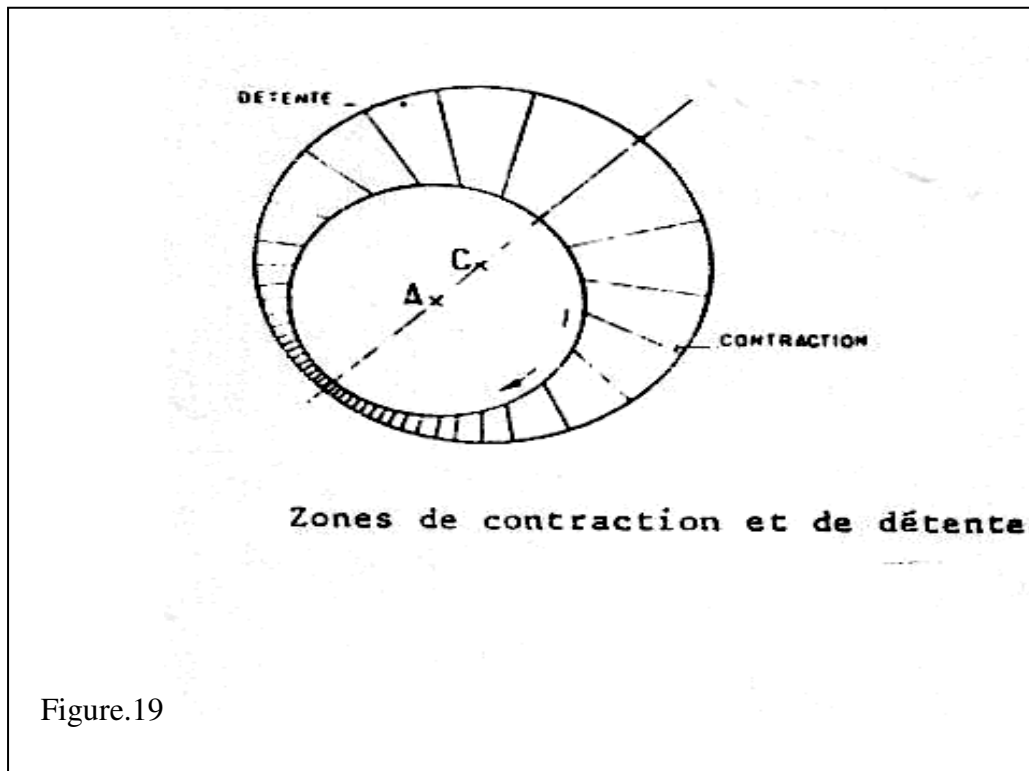


Figure.19

A l'arrêt ou au repos (fig.20 a), l'arbre A repose sur le coussinet par sa génératrice inférieure et l'épaisseur de la couche d'huile est négligeable au point de contact.

Au départ ou début du mouvement rotationnel (fig.20 b), l'arbre remonte dans le logement (comme sur une crémaillère) provoquant une contraction par unité de temps proportionnelle à la vitesse de rotation. On a un graissage onctueux.

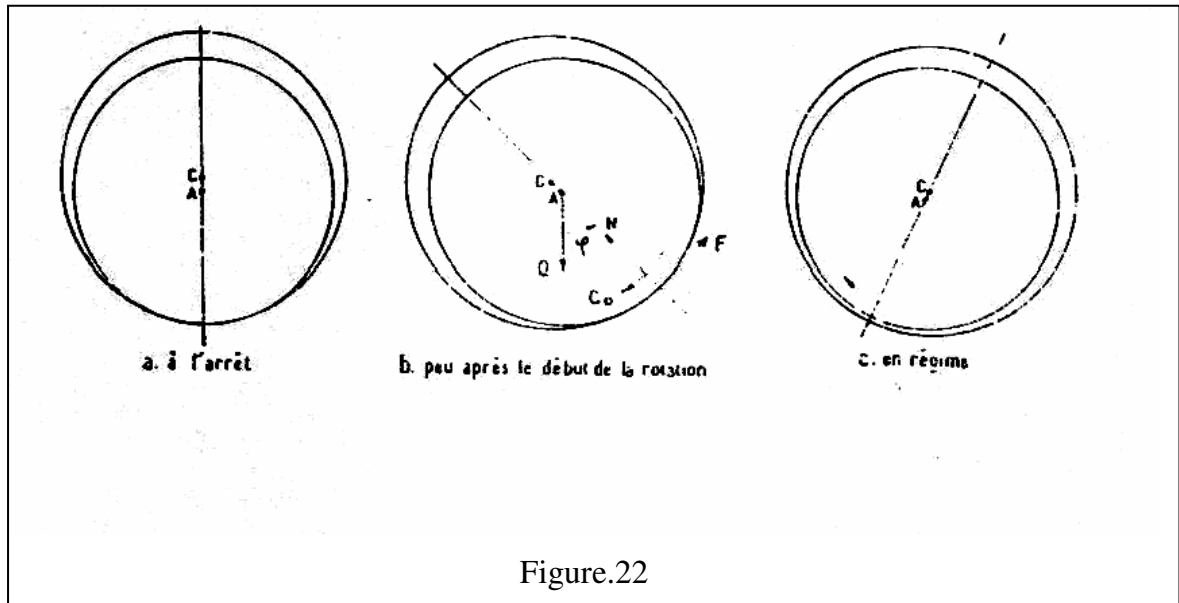
A partir d'une certaine vitesse de rotation (fig. 20c) l'arbre, tournant peut flotter librement dans le logement, supporté par un coin d'huile qui s'est formé, sous l'effet de la rotation de l'arbre, grâce à la différence des courbures de l'arbre et du logement et de la non concordance de leurs centres.

2.2.2.4. L'oxydabilité

Elle caractérise la résistance d'une huile à une éventuelle oxydation. Une huile qui s'oxyde se détériore.

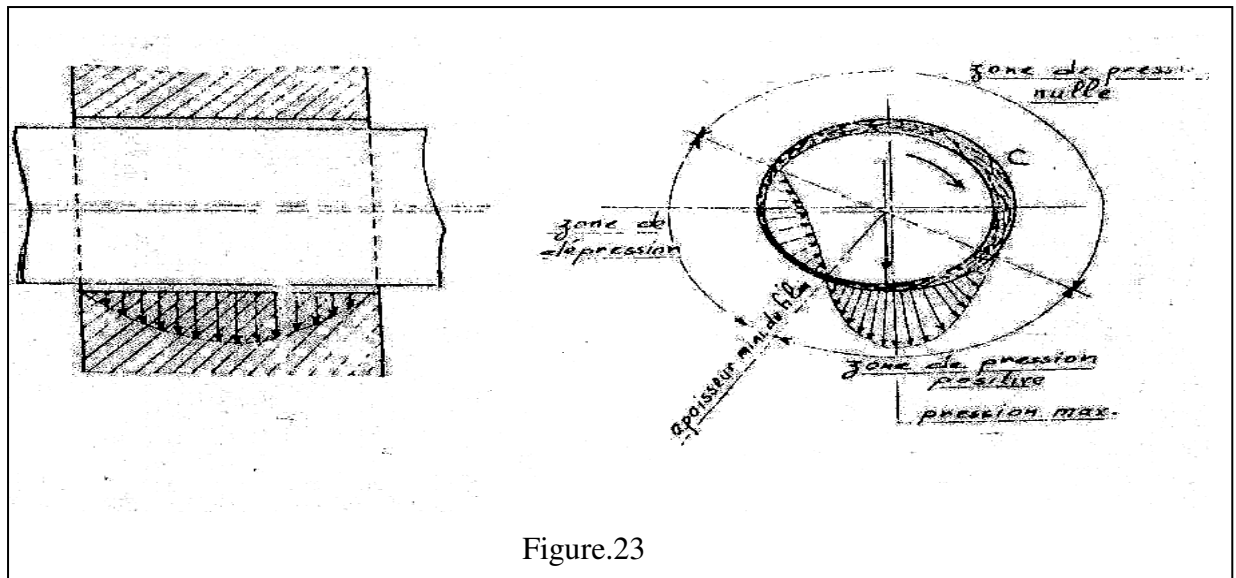
2.2.2.5. La corrosivité

Certaines huiles contiennent des additifs ou minéraux qui ont un caractère acide, pouvant attaquer les surfaces des pièces par le phénomène de corrosion. Donc la corrosivité est la détérioration des pièces par les acides.



2.2.4. Répartition des pressions au sein du film d'huile

Les pressions existantes entre différents points du film d'huile se répartissent selon la figure 23 par exemple le cas d'un palier lisse qui est constitué généralement d'un arbre qui tourne à l'intérieur d'un coussinet complet. Ces deux éléments sont totalement séparés par un film de lubrifiant. Si l'on applique une charge à l'arbre, les axes de l'arbre et du coussinet ne coïncident plus.



On distingue donc la zone où la pression est positive et le film est complet et une région ou zone de dépression où la pression est négatives et enfin une région inactive à pression nulle dans

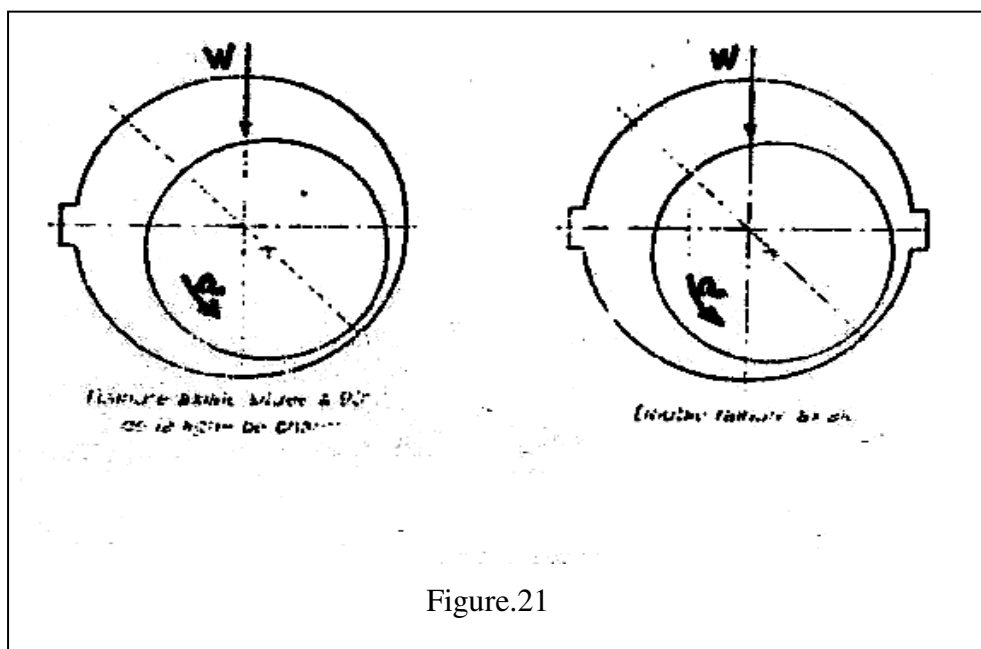
laquelle peut apparaître la cavitation. Pour que le film d'huile s'amorce et soit continu, il faut que la vitesse de l'arbre soit suffisante, la viscosité de l'huile soit suffisante et que l'alimentation soit abondante et qu'elle s'effectue dans une zone de pression faible ou nulle.

Une alimentation abondante peut être obtenue sous pression en permanence en exécutant une rainure d'alimentation qui a pour but de répartir l'huile sur toute la largeur du palier et de faciliter la formation du film d'huile et en particulier d'irriguer la zone inactive du film, on évite ainsi le phénomène de cavitation et d'augmenter le débit afin de limiter l'échauffement du fluide

Il existe deux types de rainures :

a. Les rainures axiales :

Les rainures axiales (fig. 21) sont utilisées pour les charges fixes. La rainure axiale qui donne le meilleur remplissage du palier est une rainure située dans la zone d'épaisseur maximale du film. Cependant comme cette zone change de position par rapport au bâti en fonction des conditions de fonctionnement (charge, vitesse, viscosité), on place en général la rainure axiale à 90° en amont de la charge. Si l'arbre peut tourner dans les deux sens, on place une deuxième rainure à 180° de la première (fig. 22). Cette rainure ne doit en aucun cas être située dans la zone des pressions maximales car la portance du palier serait considérablement amputée.



b. Les rainures circconférentielles :

Les rainures circconférentielles (fig. 26) sont utilisées lorsque la charge est tournante. Dans ce cas en effet, avec une rainure axiale, on se trouverait à chaque tour dans la situation évoquée dans le paragraphe précédent (rainure située dans la zone des pressions maximales). Ce type de rainure diminue la capacité de charge du palier car elle substitue au palier de longueur L , deux paliers de longueurs inférieures à $L/2$. On peut dans certains cas combiner les deux types de rainures.

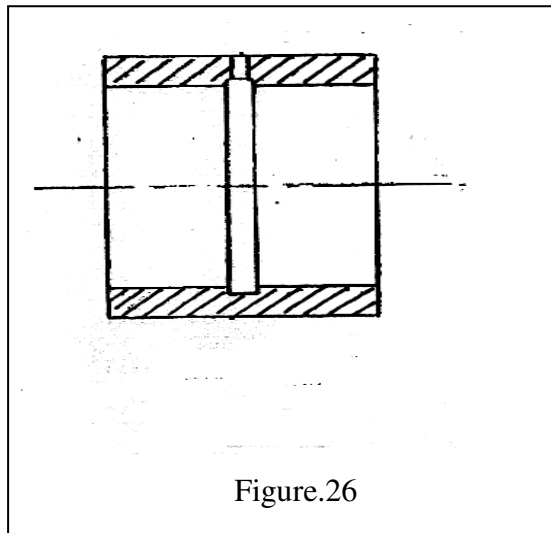


Figure.26

Quel que soit le mode d'alimentation, l'arrivée et la répartition du lubrifiant sont assurées par des trous et rainures ménagés soit sur le coussinet, soit sur l'arbre (fig.27a et b).

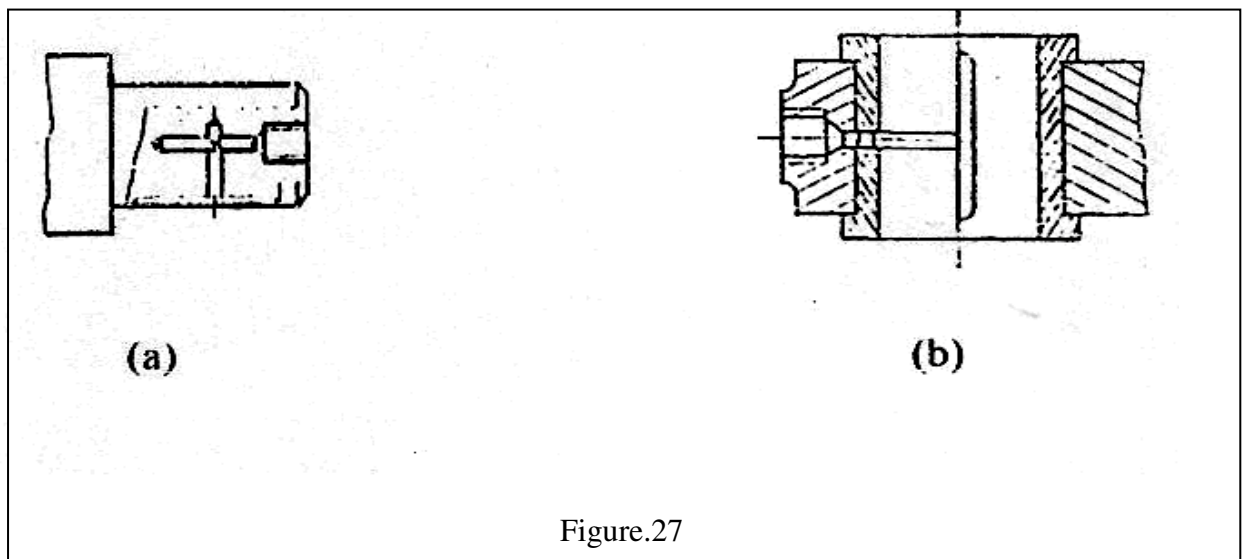


Figure.27

Si la charge est de direction constante, la rainure est creusée dans la pièce fixe en arrière de la charge ($\alpha = 45^\circ \times 135^\circ$) (fig.25a), et si la charge est tournante, la rainure est creusée sur la puce mobile, en avant de la charge (fig. 25b).

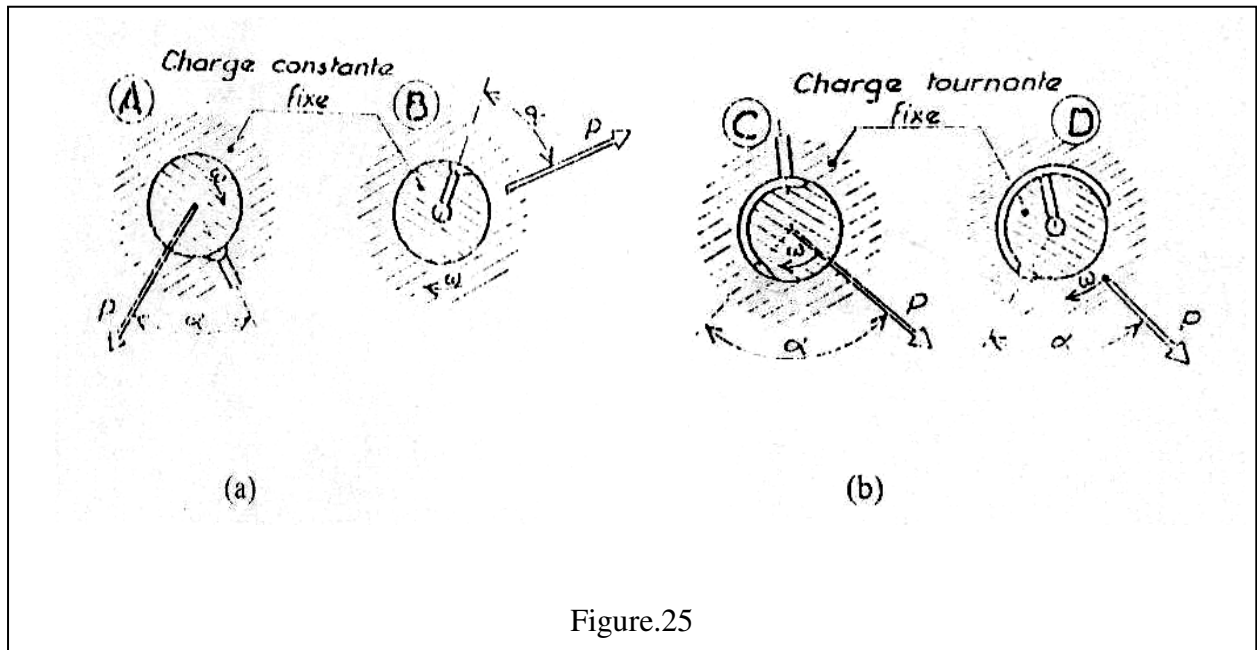


Figure.25

2.2.5. La lubrification à la graisse

L'utilisation croissante de pièces lubrifiées à la graisse, associée au développement du concept de graissage à vie, fait de la graisse un composant à part entière de la pièce à lubrifier.

Compte tenu des conditions de travail imposées au lubrifiant (laminage, malaxage), des graisses spéciales doivent être utilisées et qui ne peuvent être sélectionnées à la simple analyse de leurs caractéristiques physico-chimiques

2.2.5.1. Choix de la graisse

Le choix de la graisse repose sur la connaissance des conditions de fonctionnement qui doivent être définies de la manière la plus précise possible :

- Température.
- Charge.
- Ambiance.
- Vibration.

Les constructeurs d'équipements en relation avec les fabricants de produits pétroliers testent les performances des graisses pour chaque condition particulière de fonctionnement au niveau des laboratoires de recherche

2.2.5.2. Mise en oeuvre

La quantité de graisse nécessaire au bon fonctionnement doit occuper un volume optimum selon des pondérations empiriques, lesquelles seront adoptées et ensuite normalisées. Prenons l'exemple de graissage d'un roulement. La graisse doit occuper un volume égale à environ 20 à 30 % du volume libre interne de celui-ci, d'où la formule pratique :

$$G = 0,005. De. B$$

- G : la quantité de graisse en grammes ou en cm^3 .
- De : le diamètre extérieur du roulement en mm.
- B : la largeur du roulement en mm.

Un excès de graisse est préjudiciable au bon fonctionnement du roulement, toutefois la quantité peut être augmentée de 20 % pour les paliers munis d'un orifice d'évacuation de la graisse usée.

Par ailleurs, un roulement tournant à très faible vitesse tolère un plein ou remplissage complet, ce qui est favorable à sa protection en ambiance très polluée (galets de manutention,...).

2.2.5.3. Périodicité de graissage

Dans des conditions normales de fonctionnement, sans pollution extérieure et avec une retenue efficace, la durée de vie de la graisse est liée aux paramètres :

- de vitesse,
- de charge,
- de température.

Particulièrement au delà de 80°C en fonctionnement continu, la durée de vie calculée de la pièce est souvent limitée par celle de la vitesse. A titre indicatif, on peut dire que la durée de vie d'une graisse d'usage général est divisée par deux par tranche de 15°C au dessus de 80°C.

La détermination de la périodicité de graissage est essentiellement basée sur l'expérience de l'utilisateur et sur les moyens de surveillance qu'il peut mettre en oeuvre avec l'aide de diagrammes mis a jour.

2.2.6. Lubrifiants d'emploi courant

- a. Huiles végétales et animales : (dites huiles grasses), très onctueuses, mais plus souvent acides.
- b. Huiles de pétrole : extraites par distillation du pétrole brut.
- c. Huiles de pétrole avec additifs : (dites aussi « dopées ») ; les additifs sont des produits qu'on ajoute aux huiles minérales pour en améliorer certaines propriétés. Il en existe ceux qui augmentent l'onctuosité, d'autres qui empêchent le grippage, qui s'oppose à la corrosion des surfaces, etc.).

En automobile, on utilise très couramment des huiles détergentes dont l'additif empêche le dépôt adhérent de calamine, et parfois des huiles équivisqueuses ou multigrades dont la viscosité est peu influencée par la température.

- d. Huiles composées (compound) : mélanges d'huiles animales ou végétales et d'huiles de pétrole obtenus par dissolution de l'une dans l'autre ou par l'emploi d'un solvant commun.
- e. Graisses : la saponification partielle d'une huile suivie de l'émulsion du savon dans l'huile restante donne une graisse. Une graisse est définie par sa consistance (dureté).
- f. Lubrifiants divers : le bisulfure de molybdène et le téflon réduits en poudre, le graphite sont souvent employés. La paraffine, le talc et certains sous-produits de distillation de la houille sont utilisés dans des cas particuliers.

2.2.7. Dispositifs de graissage

Le choix du mode de graissage et de leurs dispositifs dépend essentiellement de la puissance absorbée par le frottement :

$$P = p.v.f$$

p : pression de contact (bars)

v : vitesse de glissement (m/s)

f : coefficient de frottement

Plus le produit p.v est important, plus la lubrification doit être efficace. Dans une lubrification, les qualités recherchées sont l'efficacité, la sûreté de fonctionnement, la continuité, l'automatisme et l'économie. Pour cela il faut :

- a. constituer une réserve de lubrifiant avec remplissage et vidanges faciles,
- b. assurer l'arrivée et répartition du lubrifiant sur les surfaces frottantes,
- c. assurer la mise en marche du graissage au démarrage, le réglage et le contrôle du débit d'huile en marche, l'interruption à l'arrêt,
- d. assurer si possible la récupération d'huile,
- e. éviter les fuites, donc assurer l'étanchéité.

Selon l'importance de la lubrification ou du produit p.v on distingue deux types de dispositifs :

- Les dispositifs à lubrification perdue.
- Les dispositifs à récupération d'huile.

2.2.7.1. Dispositifs à lubrification perdue

Ils sont utilisés pour une alimentation continue avec un débit faible, donc pour un graissage onctueux destiné uniquement pour les mouvements à faible vitesse et amplitude. Dans le cas d'une alimentation discontinue le lubrifiant est contenu dans un graisseur à l'huile ou à graisse tels que :

- a. Graisseur à couvercle (fig. 30).

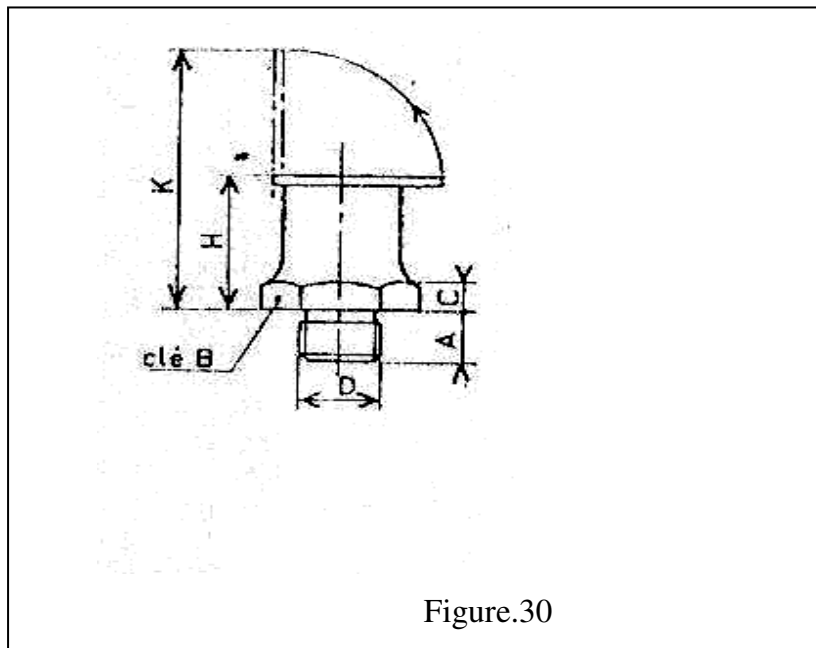


Figure.30

b. Graisseur à chapeau tournant (fig. 28)

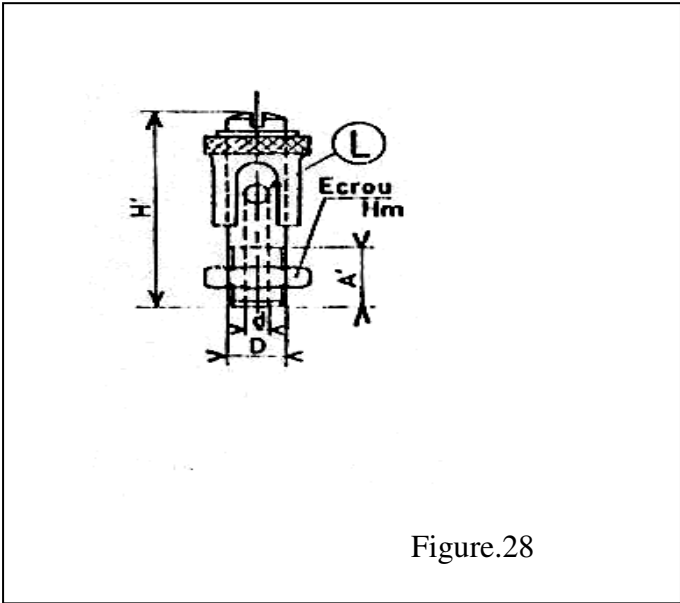


Figure.28

c. Graisseur Stauer (à graisse) (fig. 29).

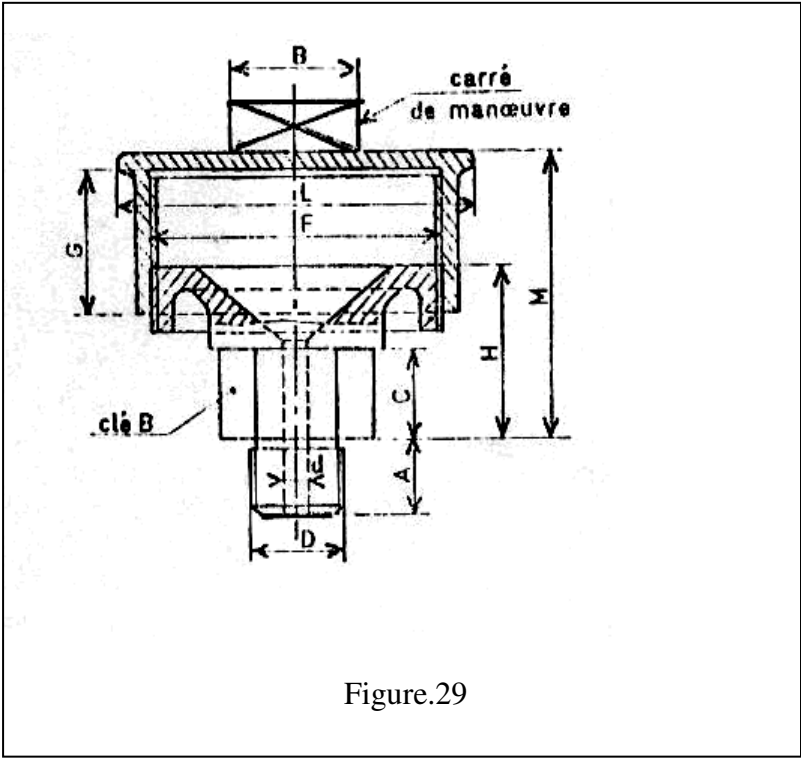


Figure.29

Le vissage du couvercle provoque une pression qui chasse le graisse vers les surfaces à lubrifier.

d. Graisseurs écalémit. Il existe trois types tels que :

- Graisseurs « hydraulic » (fig.33a) pour le graissage haute pression, à la graisse, au moyen d'une pompe s'accrochant sur la tête du graisseur
- Graisseur « six pans » (fig.33b) pour le graissage moyenne pression.
- Graisseurs « Lub » ou « Metrolub » (fig.33c) pour le graissage basse pression. à l'huile ou a la graisse légère.

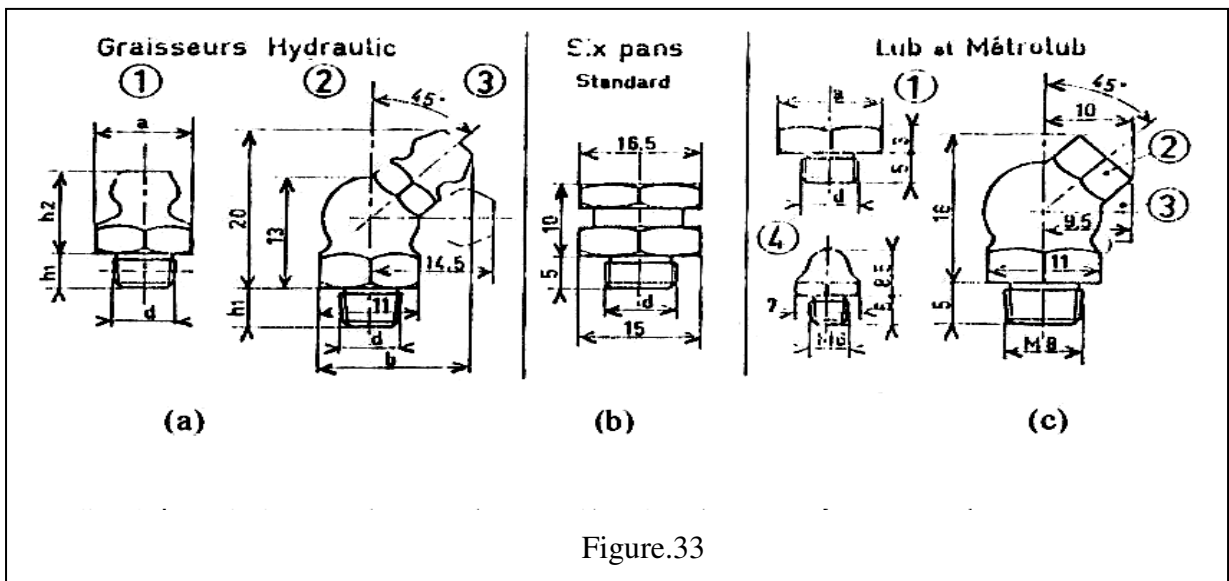


Figure.33

Dans le cas d'une alimentation continue, l'huile peut être amenée :

- par gravité c'est le cas d'un graisseur compte-gouttes par exemple (fig. 34)

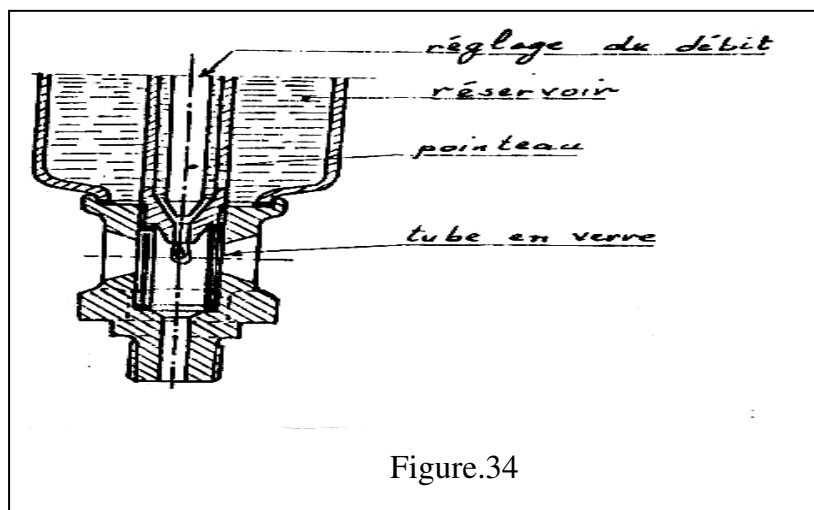


Figure.34

- par capillarité (graisseur à mèche). (fig. 31) :

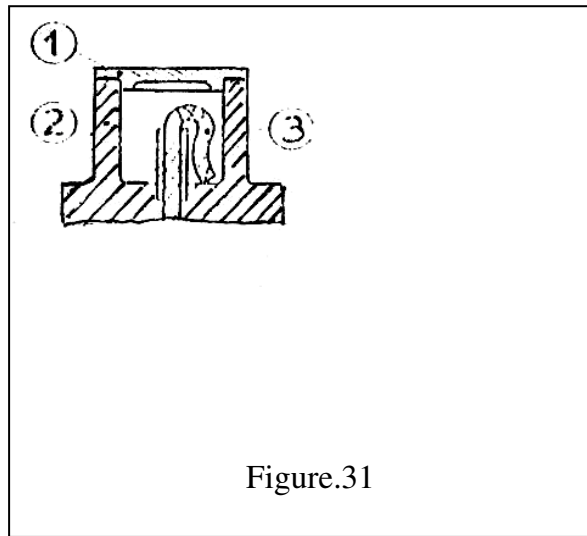


Figure.31

- par ressorts (graisseur Stauffer à ressort). (fig. 32) :

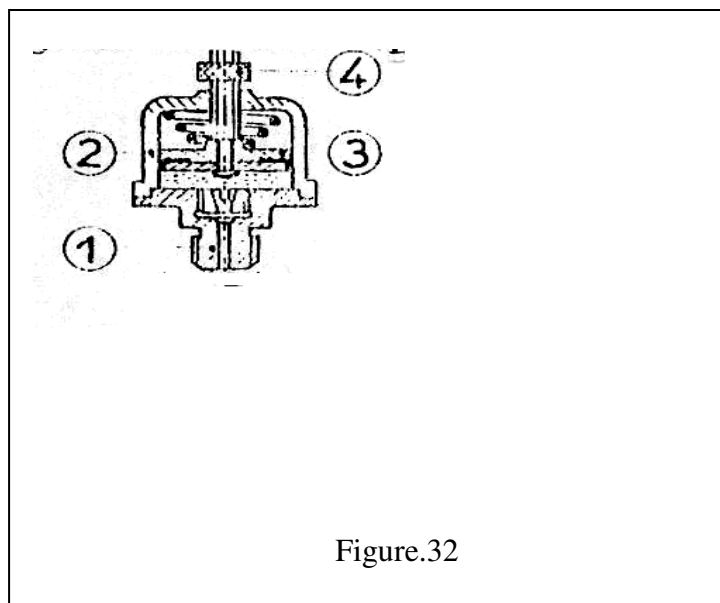


Figure.32

- par commande mécanique (fig. 37) :

Une pompe P, à commande manuelle ou mécanique, envoie le lubrifiant par l'une des deux canalisations L_1 et L_2 vers les distributeurs D placés au voisinage des points P_1 et P_2 à lubrifier. Un robinet inverseur permet de faire débiter la pompe alternativement dans L_1 et L_2 . Chaque distributeur est donc alimenté alternativement par L_1 et L_2 .

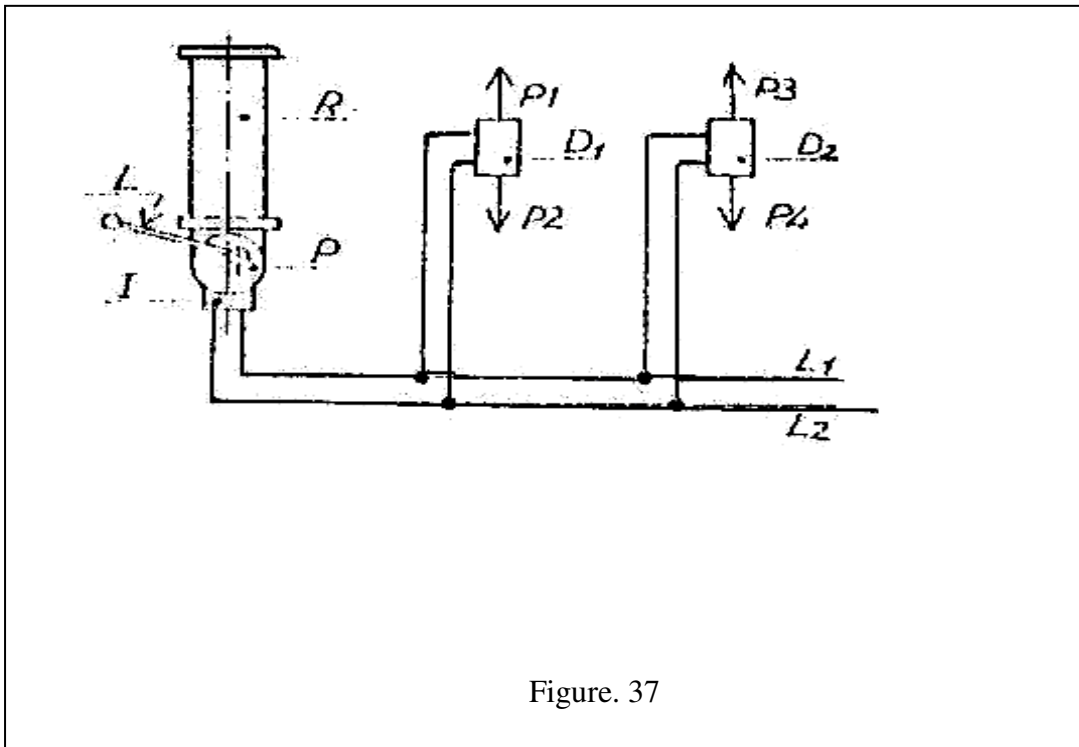


Figure. 37

2.2.7.2. Dispositifs à récupération d'huile

a. Graissage par barbotage, (fig. 35)

L'huile est entraînée vers les surfaces à lubrifier par l'organe mobile lui même qui baigne dans une réserve d'huile (engrenages de boite à vitesses par exemple), soit par un organe auxiliaire (graisseur à bague). On doit prévoir un renouvellement périodique de l'huile, pour cela il faut un réservoir avec trou de remplissage et de vidange et éventuellement un indicateur du niveau d'huile.

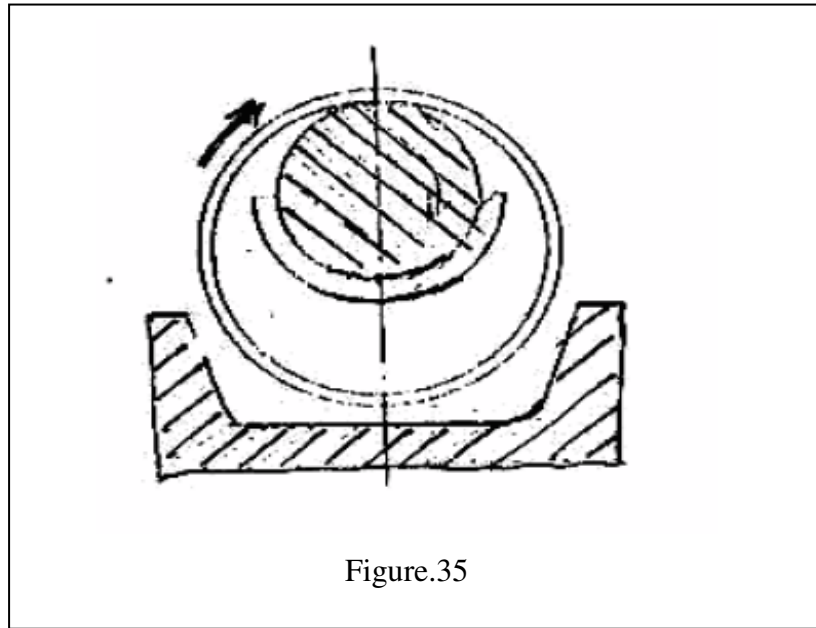


Figure.35

b. Par circulation d'huile (graissage sous pression) , (fig. 36) :

L'huile est envoyée sous pression vers les différents points à lubrifier, puis elle est ramenée au réservoir après sa réfrigération (fig. 36), l'installation comprend :

- un groupe de commande (réservoir, pompe, refroidisseur, filtres, etc.),
- des organes de distribution (canalisations, distributeur, appareil de contrôle de débit et du niveau en chaque point),
- Des organes de contrôle (manomètre, thermomètre, débitmètre, etc.).

Ce type de graissage est employé sur les machines importantes où le débit est de 2 à 24 m³/24 h (laminoir, turbines à vapeur, gros réducteurs etc.).

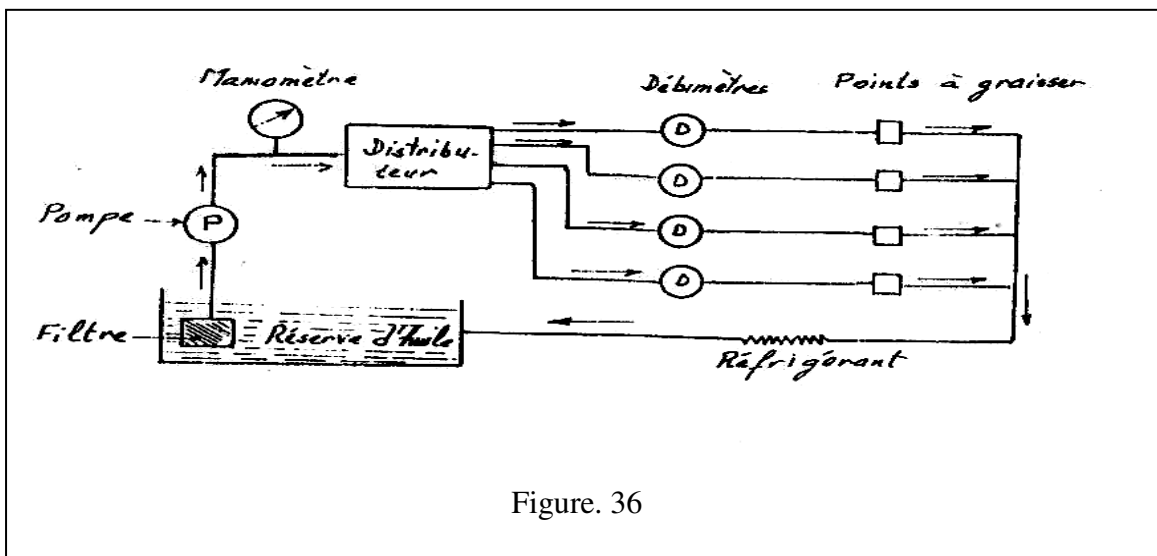


Figure. 36

3. USURE ET PROPRIETES DES MATERIAUX

3.1. Introduction

En technologie, on différencie entre l'usure morale et l'usure physique. On caractérise les machines, appareils, équipements, etc., comme usure morale, si elles sont posées extérieurement des ateliers de fabrication, elles peuvent être encore fonctionnelles à cause :

- Du développement technique, et par suite, elles seront remplacées.
- De manque de productivité.
- Par manque de maintenance technique.

L'usure physique dans le sens technique, est défini comme un processus caractérisé par une attaque mécanique, en première ligne par un frottement conduisant à une perte progressive de matière en surface d'un corps solide par séparation de petites particules, donc c'est un changement de forme non voulue de la surface. L'usure peut avoir lieu dans un mouvement relatif entre un objet et son milieu gazeux liquide ou solide. Le plus souvent l'usure est accompagnée par des phénomènes de corrosion où ces derniers ne sont pas clairs à séparer de l'usure. Même les connaissances et résultats obtenus pour les phénomènes d'usure n'ont pas une validité générale pour simplifier le danger de ce phénomène. Les pertes occasionnées par l'usure dans l'industrie mondiale s'élèvent annuellement à plusieurs millions de tonnes de métaux. A cause de l'usure, beaucoup de machines et équipements sont remplacés, le plus souvent, avec d'énormes dépenses. Par exemple, aux Etats Unis, on estime ces pertes à 2,3 kg d'acier pour chaque tonne de minerais traitée. Il n'est pas possible d'indiquer par l'intermédiaire d'une certaine valeur caractéristique la tenue à l'usure d'un métal vis-à-vis des différentes contraintes ou sollicitations d'usure. L'utilisation économique d'un métal est défini seulement par les différents essais d'usure et pour des sollicitations bien déterminées.

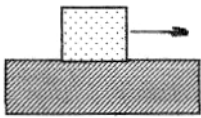
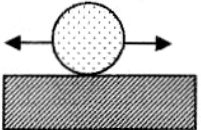
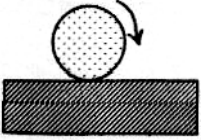
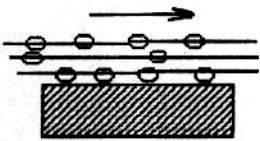
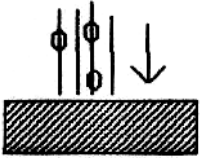
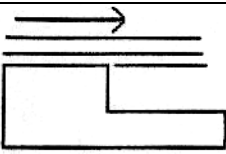
Une analyse du processus indique que la tenue à l'usure ou le phénomène d'usure sont influencés par :

- Les métaux accouplés.
- La rugosité des couches limites (surface, lubrification).
- Le type de mouvement (glissement, roulement, écoulement, chocs, etc.).
- La vitesse du mouvement.
- L'enlèvement des particules solides.

Les principaux types d'usure sont classés d'après les phases de contact, les interactions mécaniques et l'importance relative des effets mécaniques et chimiques.

On distingue deux catégories principales d'usure :

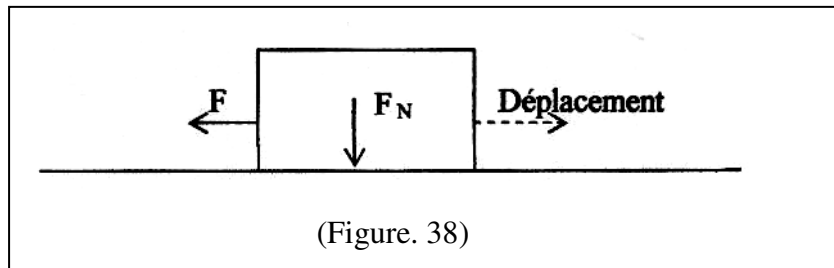
- L'usure due aux frottements entre corps solides.
- L'usure due aux impacts et aux fluides (érosion)

Type d'usure	Type de contact	Mécanismes Prédominants	Nom
Usure due au frottement entre solides.		Mécanique Chimique	Usure par glissement Usure par corrosion
		Mécanique Chimique	Usure par frottement Usure-Frottement
		Mécanique Chimique	Usure par roulement Usure par corrosion
Usure due aux impacts et aux fluides		Mécanique Chimique	Usure par érosion Corrosion - Erosion
		Mécanique Chimique	Usure par impact Corrosion impact
		Mécanique Chimique	Usure par cavitation Corrosion - Cavitation

3.2. Le frottement

3.2.1. Contacts non lubrifiés

Pour faire glisser un solide sur une surface plane, il faut appliquer une force égale ou supérieure à la force de frottement F qui agit parallèlement à la surface dans le sens opposé au mouvement, (fg. 38).



Son intensité est proportionnelle à la force normale F_N , appelée aussi charge, qui agit perpendiculairement à la surface de contact. Le facteur de proportionnalité f porte le nom de coefficient de frottement.

$$F = f \cdot F_N$$

Le coefficient de frottement est une propriété du système, formant le contact, sa valeur dépend entre autres de :

- Facteurs mécaniques : force normale, vitesse de déplacement, viscosité du lubrifiant.
- Facteurs chimiques : humidité, oxydants, additifs.
- Propriétés des matériaux : dureté, plasticité, énergie de surface.

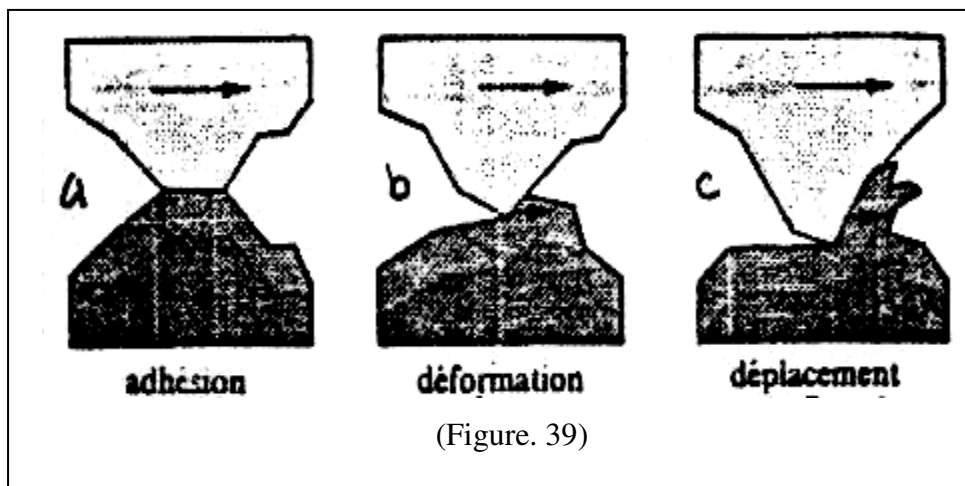
Dans les systèmes à mouvement, on cherche le plus souvent à minimiser les frottements, pour cela, on utilise normalement des lubrifiants. Ces derniers permettent de réduire le coefficient de frottement jusqu'à des valeurs inférieures à 0,1.

De nombreuses situations requièrent, cependant, un coefficient de frottement élevé, par exemple le contact entre un pneu de voiture et le sol. Dans ce cas, l'usure doit rester faible, malgré un coefficient de frottement élevé. Le tableau ci-dessous indique quelques valeurs typiques du coefficient de frottement suivant les matériaux en contact et la nature du milieu.

Contact	Milieu	F (dynamique)
Métal - métal	Vide	0,1
	Air	0,2 à 1
	Huile lubrifiante	0,02 à 0,1

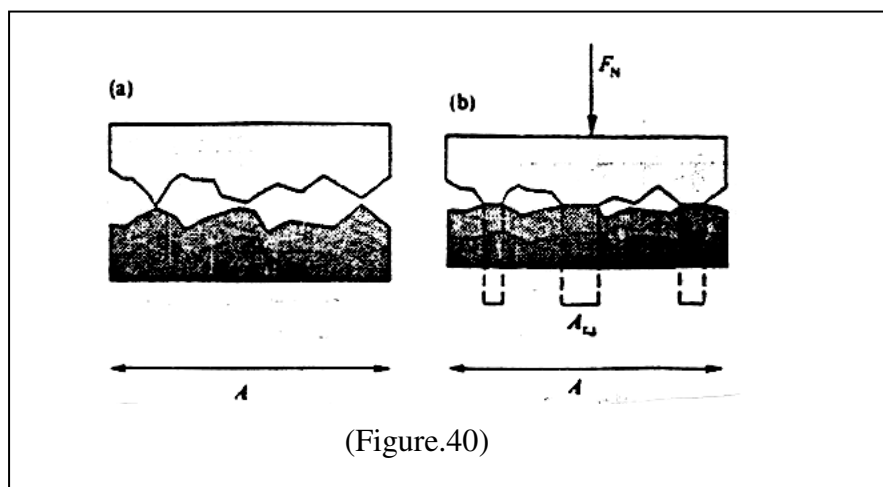
Trois phénomènes physiques bien distincts, provoquent des pertes d'énergie lors du frottement entre deux solides rugueux et influencent aussi sur la valeur du coefficient de frottement.

- Formation et rupture des jonctions d'adhésion aux lieux de contact (fig. 39 a).
- Déformation élasto-plastique des aspérités (fig. 39 b).
- Déplacement de matière par labourage (fig. 39 c)



3.2.1.1. Formation et rupture des jonctions d'adhésion

La figure 40 représente le contact entre deux surfaces rugueuses de métaux ductiles.



En raison de la rugosité, seules les aspérités se touchent. La vraie surface de contact A est égale à la somme de toutes les surfaces de contact entre les aspérités.

$$A_r = \sum A_{rj}$$

Généralement A_i est inférieure à la surface de contact géométrique A . Sa valeur dépend de la force normale F_N et de la dureté du matériau. La pression agissant sur les aspérités en contact vaut :

$$P_{asp} = \frac{F_N}{A_r}$$

Si P_{asp} , dépasse la limite élastique du matériau, les aspérités subissent une déformation plastique et la surface réelle de contact augmente. Par conséquent, la pression agissant sur les aspérités diminue jusqu'à ce qu'elle atteigne finalement, à l'équilibre, une valeur égale à la limite élastique du matériau. Un essai de densité correspond à un mécanisme similaire.

L'application d'une force normale connue induit une empreinte dont la taille (surface réelle de contact) caractérise la dureté H du matériau.

$$H = \frac{F_N}{A_r}$$

Lors du glissement relatif des deux surfaces, des jonctions se soudent et se défont constamment aux aspérités. Ces jonctions ont une résistance τ au cisaillement.

$$\tau = \frac{F}{A_r}$$

A partir des équations :

$$F = f \cdot F_N \quad H = \frac{F_N}{A_r} \quad \tau = \frac{F}{A_r}$$

On obtient une nouvelle expression pour le coefficient de frottement :

$$A_r \frac{F_N}{H} = \frac{F}{\tau} \Rightarrow \tau = \frac{F}{H} = \frac{F_N}{f} \Rightarrow f = \frac{\tau}{H} = \frac{F}{F_N}$$

τ : Résistance au cisaillement du moins dur des deux matériaux formant la jonction.

H : sa dureté.

Ce modèle de frottement entre deux surfaces métalliques non lubrifiées suppose que le matériau le plus dur ne se déforme pas. Il admet également que la rupture de la jonction ne se produit pas au lieu de contact mais dans le matériau le moins dur. Cette théorie classique explique que le coefficient de frottement varie peu d'un métal à l'autre et ne dépend que du rapport τ / H et non pas des quantités prises séparément, or ce rapport ne varie que peu entre différents métaux.

Cependant d'autres observations ne concordent pas avec la théorie décrite ci-dessus. Tout d'abord l'expression τ / H donne une valeur de f trop faible. En effet la dureté H des métaux vaut approximativement le triple de la limite en traction uni-axiale ($H = 3 \sigma_c$) et la résistance au cisaillement en vaut environ la moitié ($\tau \approx 0,5 \sigma_c$) et avec l'équation $f = \tau / H$, on obtient un coefficient de frottement avoisinant ($f \approx 0,17$), ce qui est nettement inférieur aux valeurs expérimentales mesurées sur des contacts lubrifiés, formés entre deux métaux non oxydés.

Dans cette théorie classique le milieu n'a pas été pris en considération. En effet, les surfaces métalliques pures ne peuvent pas exister au contact avec l'atmosphère, en raison des phénomènes d'adsorption et d'oxydation, or les atomes adsorbés ou les couches d'oxydes superficiels empêchent la formation des liaisons métal-métal entre les surfaces de contact.

La résistance au cisaillement des jonctions se rapporte donc au contact entre deux surfaces oxydées contenant en plus, différentes espèces adsorbées, plutôt qu'aux jonctions métal-métal. La valeur de la résistance au cisaillement τ et par conséquent, celle du coefficient de frottement, dépendent de l'état chimique de la surface. La figure 41a montre la variation du recouvrement de la surface en fonction de la dose d'O₂, et la figure 41 b montre l'influence de l'O₂ adsorbé sur le coefficient de frottement entre deux surfaces de Tungstène.

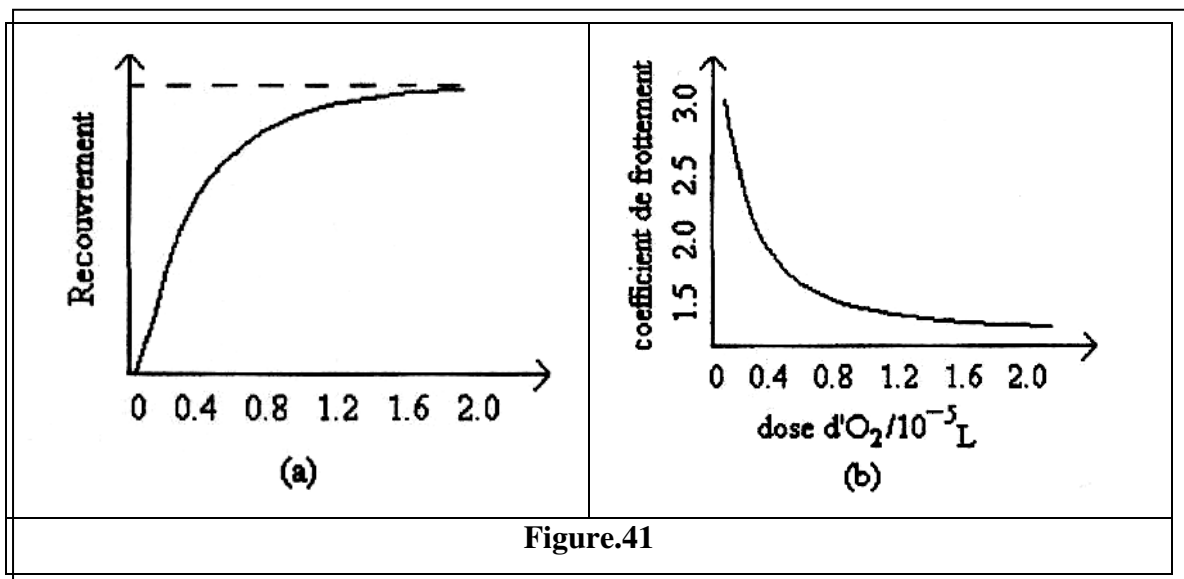


Figure.41

Les graphes (fig.41), montrent que la présence d'oxygène absorbé modifie le coefficient de frottement entre deux surfaces de Tungstène. En l'absence d'oxygène sous condition d'ultravide, le coefficient de frottement vaut approximativement $f = 3$ et dès qu'on introduit de l'oxygène dans le système, le coefficient de frottement diminue fortement. Il atteint une valeur constante avant même que toute la surface soit recouverte d'oxygène.

3.2.1.2. Déformation élasto-plastique des aspérités

En théorie classique du frottement, la rugosité initiale des surfaces ne devrait pas influencer la valeur du coefficient de frottement, car en raison de la déformation des aspérités, la vraie surface de contact ne dépend que de la force normale et de la dureté.

En réalité, dans les systèmes en mouvement, on constate normalement une période de rodage durant laquelle le coefficient de frottement est lié à la rugosité initiale. Cette observation en contradiction avec la théorie classique s'explique par la figure 63 précédemment exposée.

Le mouvement relatif de deux surfaces rugueuses, provoque une déformation élastique et plastique des aspérités dans le sens du mouvement, l'énergie de déformation correspondante participe à l'énergie mécanique totale dissipée par le frottement.

3.2.1.3. Déplacement de matière par labourage

Lorsqu'une aspérité d'un matériau dur, ou une particule d'abrasif, glisse sur un matériau moins dur, on observe un déplacement de matière par labourage et par conséquent, ça conduit à la formation de rainures, ce processus requière de l'énergie et contribue donc au frottement.

Donc les trois processus précédemment décrits, permettent de considérer le coefficient de frottement, comme la somme de trois contributions :

$$f = f_{ad} + f_{def} + f_{p1}$$

f_{ad} : dû aux phénomènes d'adhésion.

f_{def} : dû aux déformations élastiques et plastiques des aspérités.

f_{p1} : dû au déplacement de matière par labourage.

Mais l'état actuel des recherches ne permet pas de quantifier la contribution de chaque mécanisme participant au frottement. f dépend des propriétés des matériaux, des paramètres mécaniques et des conditions chimiques dans le contact, formation de particules d'usure, changement de la rugosité par déformation plastiques des aspérités, durcissement par écrouissage du métal près de la surface.

En général la force tangentielle nécessaire pour faire glisser une surface solide au repos sur une autre est normalement plus élevée que celle nécessaire pour maintenir le glissement. On différencie entre le coefficient de frottement statique qui caractérise le frottement entre deux surfaces au repos et le coefficient de frottement dynamique qui caractérise le frottement entre deux surfaces en mouvement relatif.

3.2.1.4. Température de contact

Le frottement entre deux surfaces conduit à la transformation de l'énergie mécanique en énergie thermique. Durant la phase initiale, la température augmente; elle atteint ensuite un état stationnaire lorsque la chaleur produite équivaut à la chaleur dissipée par conduction. La quantité d'énergie thermique produite Q_f ($J/m^2 \text{ s}$) lors du glissement d'un matériau sur la surface d'un autre est proportionnelle à la force de frottement F ainsi qu'à la vitesse de déplacement v .

$$Q_f = \frac{f \cdot F_N \cdot v}{A}$$

A l'état stationnaire, la conduction thermique a lieu à travers les deux matériaux formant le contact, le flux thermique Q_1 dans le matériau 1 vaut :

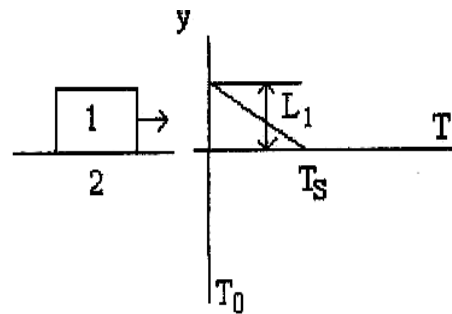
$$Q_1 \approx K_1 \frac{T_S - T_0}{L_1}$$

K_1 : conductivité thermique du matériau 1.

T_S : température à la surface de contact.

T_0 : température à une distance caractéristique.

L_1 : appelée distance de conduction thermique, épaisseur du matériau 1.



Le flux thermique Q_1 ne représente qu'une fraction θ_1 de la chaleur totale Q_f dissipée.

$$Q_1 = \theta_1 \cdot Q_f$$

$$k_1 = \frac{T_S - T_0}{L_1} = \frac{\theta_1 f F_N v}{A}$$

$$T_S = T_0 + \frac{\theta_1 f F_N v L_1}{k_1 A}$$

La température moyenne de la surface est donc proportionnelle au coefficient de frottement f , à la force normale F_N et à la vitesse de déplacement v . La valeur de θ_1 , dépend du rapport des conductivités thermiques des matériaux en contact, pour des matériaux identiques $\theta_1 \approx 0,5$.

Dans certains cas extrêmes de frottement, la température de l'interface peut atteindre des valeurs très élevées, pouvant conduire à des transformations de phases dans une zone adjacente à la surface de contact. En présence de métaux à basse température de fusion comme le plomb, l'étain ou le zinc; l'échauffement local suffit à fondre le métal.

En raison de leur rugosité, les surfaces ne se touchent généralement qu'aux aspérités. Lorsqu'un mouvement relatif les anime, le contact entre deux aspérités n'a lieu qu'un court instant, cependant, la pression de contact devient très élevée. Une quantité importante d'énergie

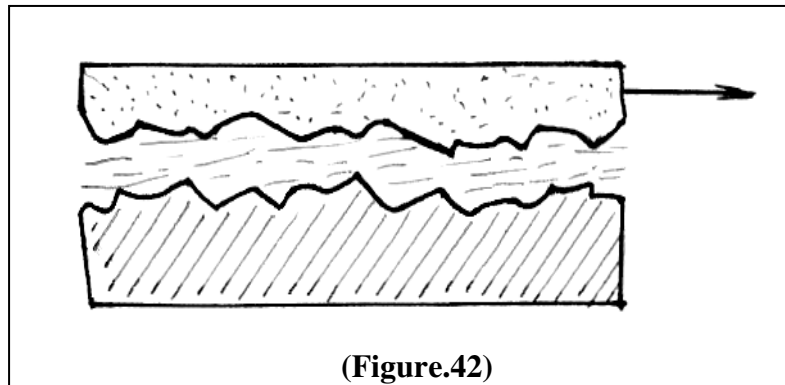
mécanique se transforme alors en chaleur, ce qui augmente localement la température temporairement. La température à la surface d'une aspérité peut aussi dépasser de beaucoup la température moyenne T_s , on parle alors d'une pointe de température. Ces pointes de température modifient localement les propriétés du matériau et accélèrent les réactions chimiques.

3.2.2. Contacts lubrifiés

La présence d'un film de lubrifiant réduit considérablement le coefficient de frottement, dont la valeur se situe alors typiquement entre 0,2 et 0,1. Il existe trois régimes de lubrification :

- Hydrodynamique.
- Mixte.
- Limite.

3.2.2.1. Le régime de lubrification hydrodynamique



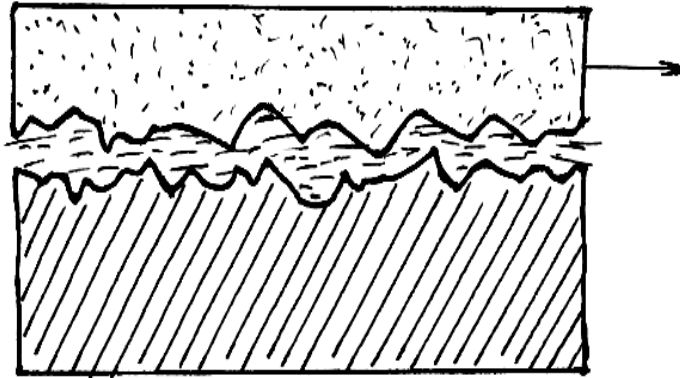
Appelé aussi élastohydrodynamique et signifie que les propriétés du film continu, séparant les deux solides, dont notamment la viscosité, déterminent le coefficient de frottement. L'épaisseur moyenne du film liquide h dépasse largement la rugosité moyenne Ra des surfaces de contact.

Ce régime s'établit lorsque la force normale est relativement faible et que la viscosité du lubrifiant est élevée. Les contacts lubrifiés travaillent normalement dans ce régime parce que l'usure y est plus faible.

$$\frac{h}{Ra} > 1$$

3.2.2.2. Régime de lubrification mixte

Si la force normale augmente, ou si la viscosité du lubrifiant devient insuffisante, le contact entre deux surfaces se fait dans un régime de lubrification mixte. Le film liquide possède alors une épaisseur comparable à la rugosité moyenne de la surface et certaines aspérités entrent en contact (fig. 43)



$$\frac{h}{Ra} \approx 1$$

(Figure.43)

6.2.2.3. Régime de lubrification limite

Dans ce régime les deux surfaces en mouvement relatif se touchent directement, formant ainsi une surface de contact importante. Le lubrifiant perd alors toute son efficacité, parce que l'épaisseur moyenne du film est nettement inférieure à la rugosité (fig. 44).



$$\frac{h}{Ra} < 1$$

(Figure.44)

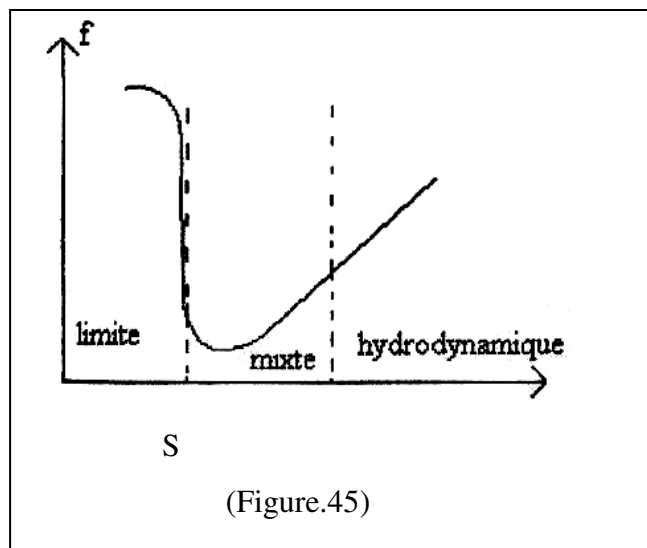
On atteint le régime de lubrification limite lorsque la force normale devient trop élevée ou lorsque la viscosité du lubrifiant est particulièrement faible. Le coefficient de frottement peut alors devenir très élevé, amenant à une destruction du contact par grippage.

3.3. Diagramme de Stribeck

Dans le cas du contact lubrifié, le coefficient de frottement est fonction d'un paramètre S qui a la dimension d'une longueur (fig.45).

$$S = \frac{v_{gl} \cdot \eta}{F_N}$$

η : Viscosité du lubrifiant, v_{gl} : Vitesse de glissement, F_N : Force normale.



Le diagramme de Stribeck indique la variation de f en fonction de S pour les trois régimes de lubrification. Dans le régime de lubrification mixte, f prend le minimum. Pour des valeurs de S, faibles correspondants au régime de lubrification limite, le coefficient de frottement f augmente rapidement, par contre dans le régime de lubrification hydrodynamique, le coefficient de frottement suit la relation :

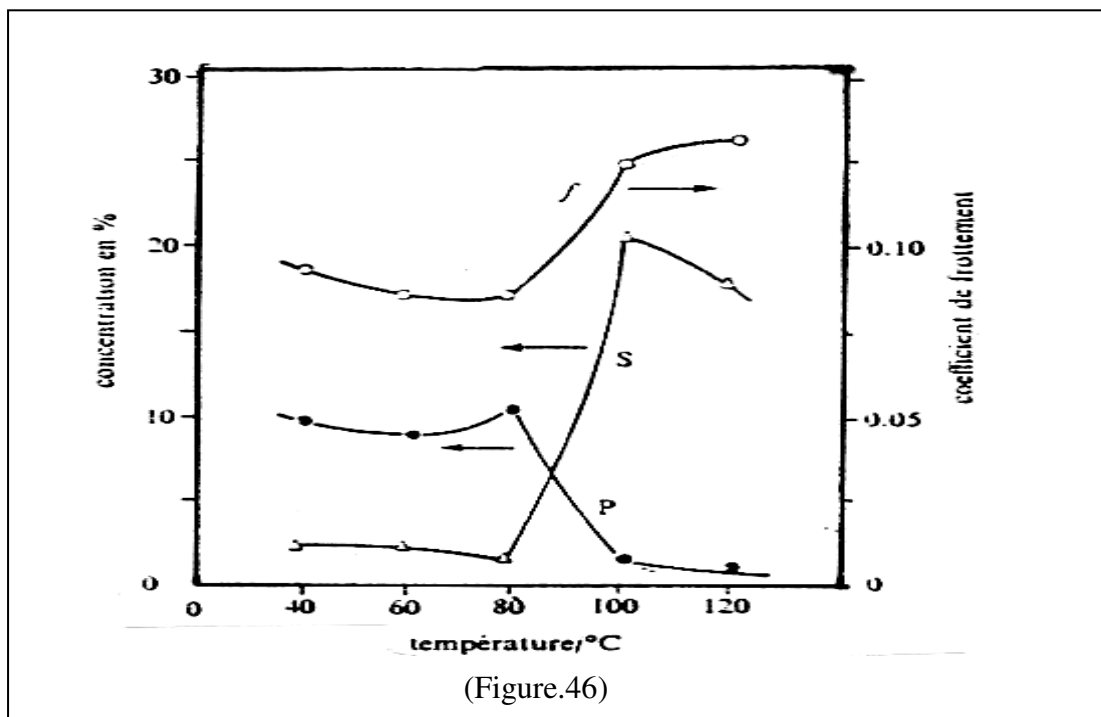
$$F = k_f \cdot S^n$$

K : facteur de proportionnalité.

n : coefficient variant de 0,5 à 1.

L'utilisation d'huiles lubrifiantes contenant des additifs, permet de diminuer le frottement et l'usure. La plupart des additifs agissent dans le régime de lubrification mixte. Grâce à leurs réactions chimiques avec les surfaces métalliques, ils forment des couches superficielles minces (10 à 20 μm), qui évitent que les métaux ne se touchent aux points de contact et forment une liaison chimique. En plus, la présence des additifs empêchent une oxydation de la surface. Les couches formées par les additifs ont en quelque sorte le même effet qu'un film extrêmement mince de lubrifiant solide.

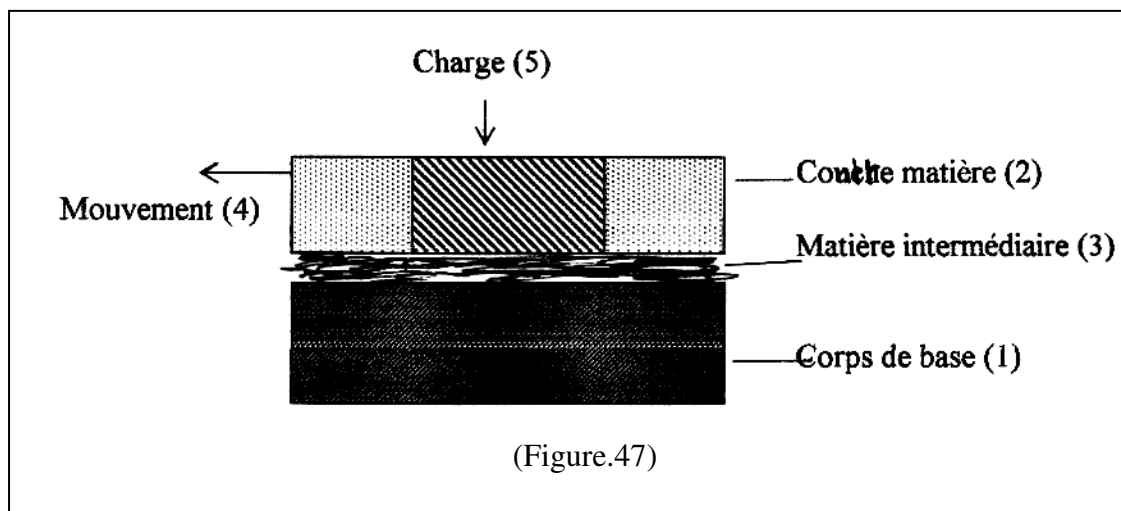
Les additifs utilisés sont dits anti-frottements ou anti-usures et correspondent, généralement, à des groupes d'esters phosphoriques ou de sulfure. La figure 46 représente la variation de coefficient de frottement d'un contact lubrifié avec la température en présence d'un additif et d'une concentration en % de phosphore (P) et de soufre (S) mesurés par spectroscopie Auger à une profondeur de 4,3 μm de la surface.



L'influence du P, S et de la température sur le coefficient de frottement est illustrée par la figure 70. L'augmentation de la température réduit progressivement la viscosité du lubrifiant. Le coefficient de frottement diminue par conséquent jusqu'à ce que le film superficiel ne sépare plus les métaux. On observe alors une brusque augmentation du coefficient de frottement à 80°C.

3.4. Usure due aux frottements entre corps solides

Le frottement entre corps solides, dissipe de l'énergie et use les surfaces en contact. L'étude de ces phénomènes appartient au domaine de la tribologie qui étudie les aspects scientifiques et technologiques liés au frottement, à la lubrification et à l'usure des matériaux. Actuellement il n'existe aucune relation claire entre le coefficient de frottement déterminé expérimentalement et la tenue à l'usure. Le processus d'usure peut, en effet, être introduit si seulement les cinq éléments de base, désignés ci-dessous, agissent l'un avec l'autre (fig. 47).



1. Le corps de base : c'est un corps solide (corps de frottement) caractérisé par son type, la teneur en éléments alliés, la rugosité, la dureté de la surface, la profondeur de dureté, la résistance, la structure et la température.

2. La contre-matière : c'est un corps de frottement pouvant se présenter à l'état solide, liquide et gazeux. La contre matière solide est caractérisée par les mêmes caractéristiques que le corps de base, tandis que liquide et gazeux, sont caractérisés par le type, la pression, la température et les impuretés.

3. Matière intermédiaire : peut être solide (corps d'usure), liquide (lubrifiant) et gazeux (air). Dans le cas de l'usure de corps de base métalliques sous l'action de matières minérales, il est important de différencier, si ces minéraux agissent comme contre-matière, comme c'est le cas de broyeur à mâchoire (concasseur) ou si ces minéraux agissent comme matière intermédiaire comme, par exemple dans le cas des points encrassés de paliers.

4. La charge : c'est un facteur important dont dépend le processus d'usure. La charge peut être constante, oscillante ou par chocs. Elle peut être uniforme ou non uniforme.

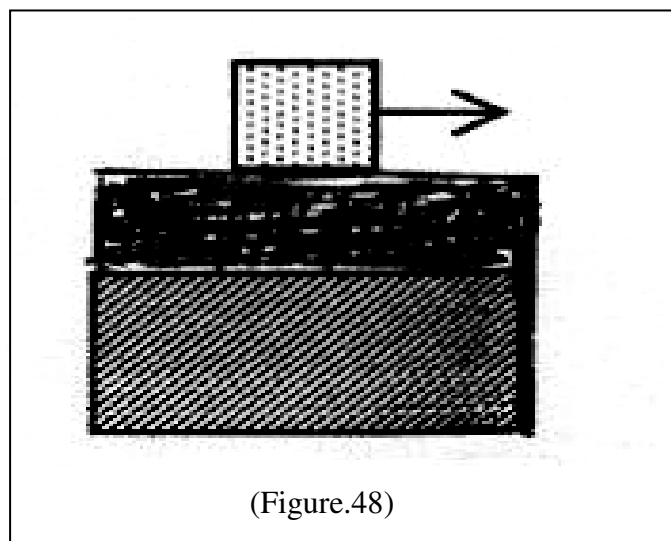
5. Le mouvement : on différencie généralement trois types de mouvement relatifs entre les forces en contact.

- Le glissement.
- Le roulement.
- Le frottement en petits débattements.

Comme la charge et le mouvement sont liés, l'un avec l'autre, on peut citer l'exemple suivant. Dans les chaînes des auto-chenilles ou excavateurs, l'on se pose la question, si on doit choisir des boulons avec un grand ou petit diamètre afin d'éviter une grande usure entre les boulons et les maillons de la chaîne. Si on considère la charge appliquée, on doit choisir un grand diamètre, afin de maintenir la pression de la surface petite, mais des essais pratiques ont démontrés qu'avec l'utilisation d'un grand diamètre l'usure est très grande à cause de la distance de glissement qui est grande. Dans ce cas l'influence du mouvement prédomine sur l'influence de la charge.

3.4.1. L'usure par glissement

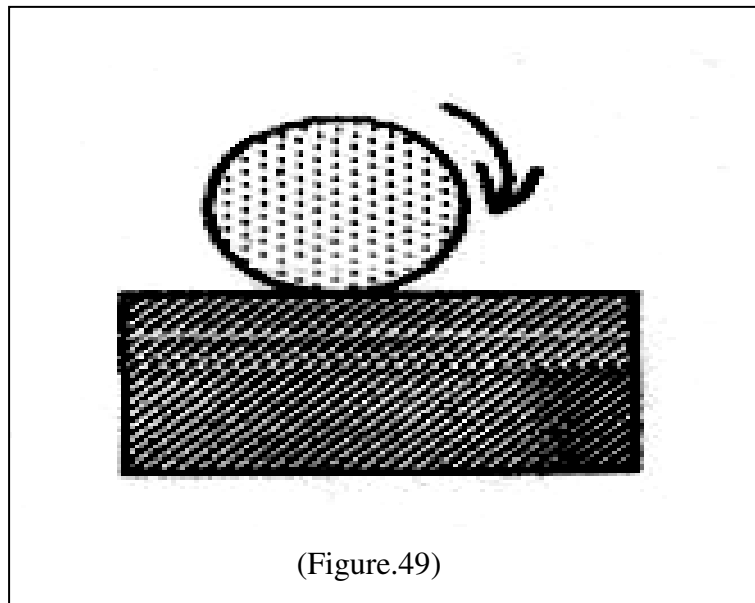
Elle se produit lorsque les surfaces de deux solides glissent l'une sur l'autre (fig. 48), qu'il y ait ou non de particules abrasives ou un lubrifiant entre elles. Ce type d'usure a fréquemment lieu dans les machines et les appareils dont certaines parties sont en mouvement. Dans un moteur à explosion, par exemple, le glissement des segments d'un piston sur la paroi du cylindre provoque une usure. Lorsque les effets chimiques prédominent, on parle d'usure-corrosion.



(Figure.48)

3.4.2. L'usure par roulement

Elle correspond au roulement d'une bille ou cylindre sur une surface solide (fig.49), ce phénomène est responsable de la dégradation des paliers et roulements à billes de toutes sortes. Comme dans le cas précédent, on parle d'usure-corrosion, si les effets chimiques prédominent.



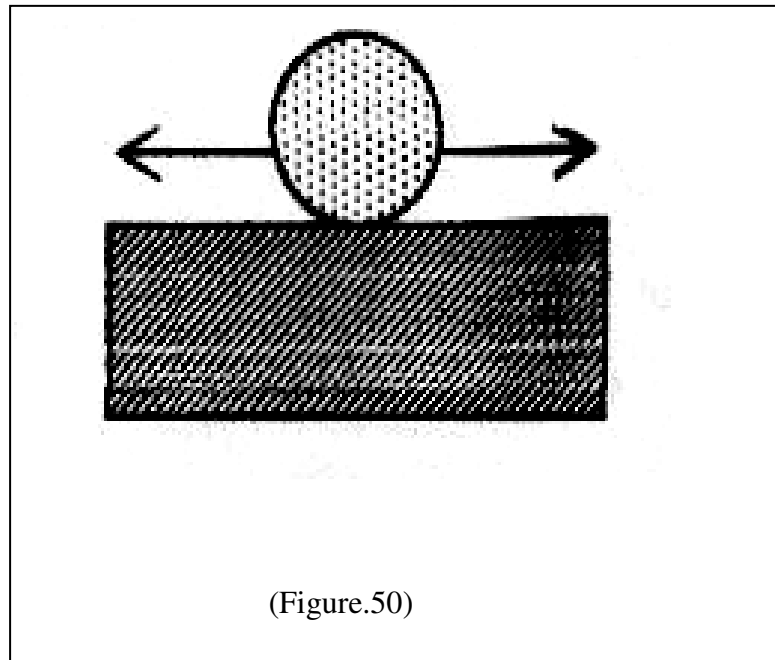
(Figure.49)

3.4.3. L'usure par frottement en petits débattements

Elle désigne une altération due à des mouvements alternatifs de hautes fréquences et de faibles amplitudes, (fig.50). De tels mouvements proviennent notamment des vibrations émises par une machine ou une installation.

Il n'existe pas de limites bien définies entre l'usure par frottement en petits débattements et l'usure par glissement. Dans les deux cas, les surfaces glissent l'une sur l'autre. Cependant, lors du frottement en petits débattements, les débris d'usure ne sont pas évacués du contact. Ils peuvent donc agir comme abrasif. En plus la chaleur ne se dissipe que difficilement, et la déformation plastique des aspérités de surface subit une inversion à chaque demi-cycle, ce qui peut provoquer une dégradation par fatigue. Toutes ces différences peuvent influencer la vitesse d'usure, justifiant ainsi la distinction entre l'usure par glissement et l'usure par

frottement en petits débattements. Si les effets chimiques sont importants, on parle de corrosion-frottement.



La grande importance technique se trouve dans l'usure de glissement et de roulement.

3.5. Procédés d'examen de l'usure

Le principal but de l'exécution des essais d'usure en laboratoire ou avec des machines d'essai d'usure, consiste en la détermination de la quantité d'usure, qui donne des indications quantitatives sur le changement de la forme et de la masse d'un corps ayant subi le phénomène d'usure.

Les termes usures et quantité d'usure sont utilisés avec le même sens, à cet effet, on doit différencier entre l'usure (processus) et quantité d'usure (résultat). La quantité d'usure peut être déterminée directement ou indirectement.

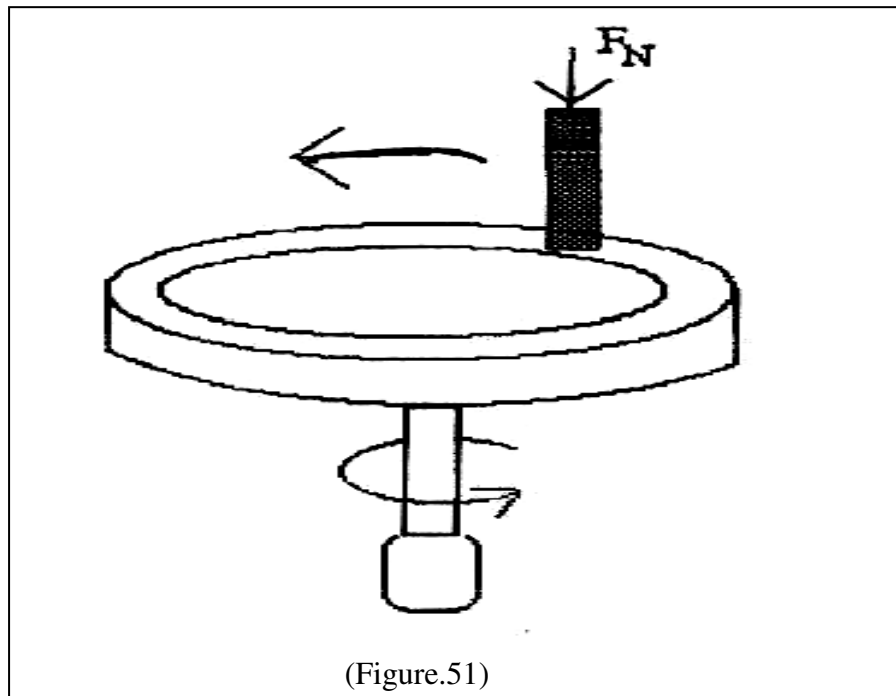
Dans les méthodes directes, on peut avoir :

- La détermination de la quantité d'usure absolue linéaire Δl (μm , mm).
- La détermination de la quantité d'usure absolue volumétrique ΔV (μm^3 , mm^3 ou cm^3).
- La détermination de la quantité d'usure absolue massive (mg , g , ...).

A partir de ces valeurs caractéristiques de l'usure, on peut encore calculer la vitesse d'usure linéaire ($\mu\text{m}/\text{h}$), la quantité d'usure linéaire spéciale (mm/kg) et le rapport de quantité d'usure linéaire (%).

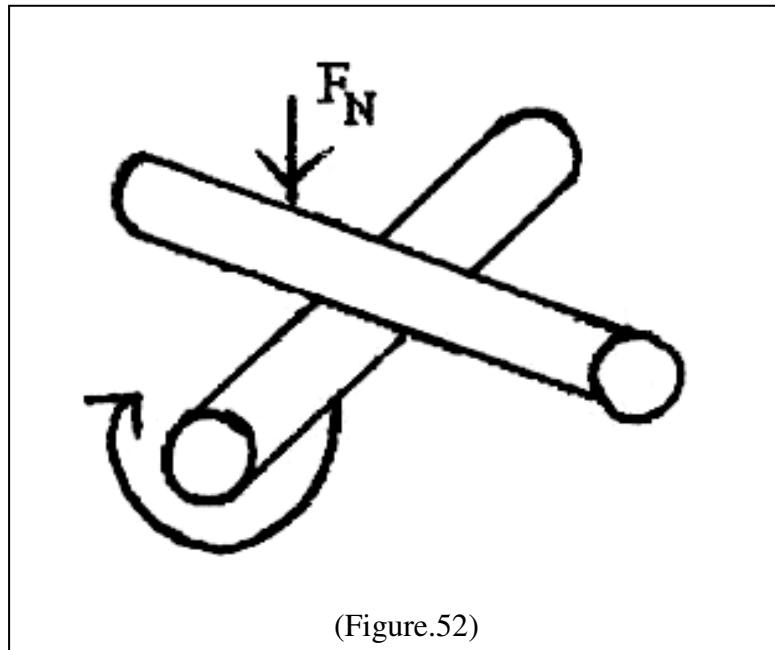
Comme valeurs caractéristiques indirectes, peuvent être déterminées la durée de vie totale ou d'usure (heures), la quantité d'apport d'usure (kg, m^3) ou encore, des grandeurs mesurées indirectement, par exemple la température. Les résultats des essais d'usure ne peuvent pas être généralisés à cause de l'influence des différents facteurs sur l'usure. Il existe un grand nombre d'essais d'usure, mais ils correspondent généralement, à des situations spécifiques et présentent un caractère fortement empirique. La comptabilité entre les différents résultats reste, de ce fait, limitée.

a. L'essai au crayon sur disque :



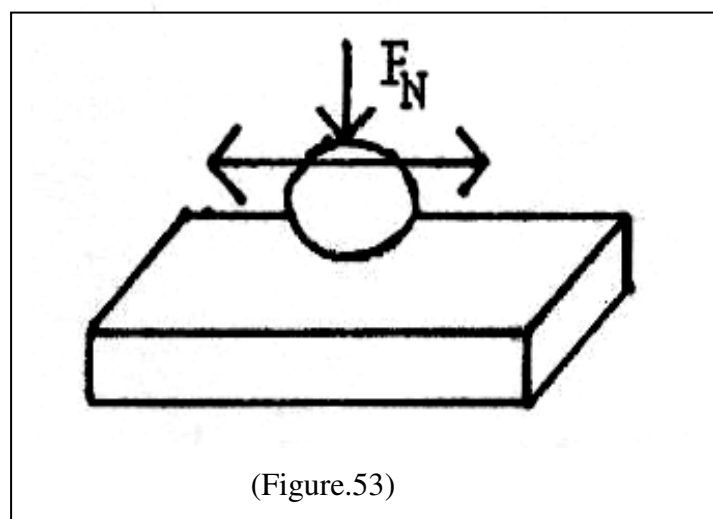
Cet essai comprend un disque tournant sur lequel s'applique un crayon ou une bille fixe avec une force constante. La force normale appliquée et le moment angulaire nécessaire à la rotation du disque permettent d'obtenir le coefficient de frottement comme le montre la figure 52.

b. L'essai à cylindres croisés :



Deux cylindres perpendiculaires sont utilisés, l'un fixe et l'autre en rotation. Comme précédemment, la force normale et le mouvement angulaire renseignent sur le coefficient de frottement.

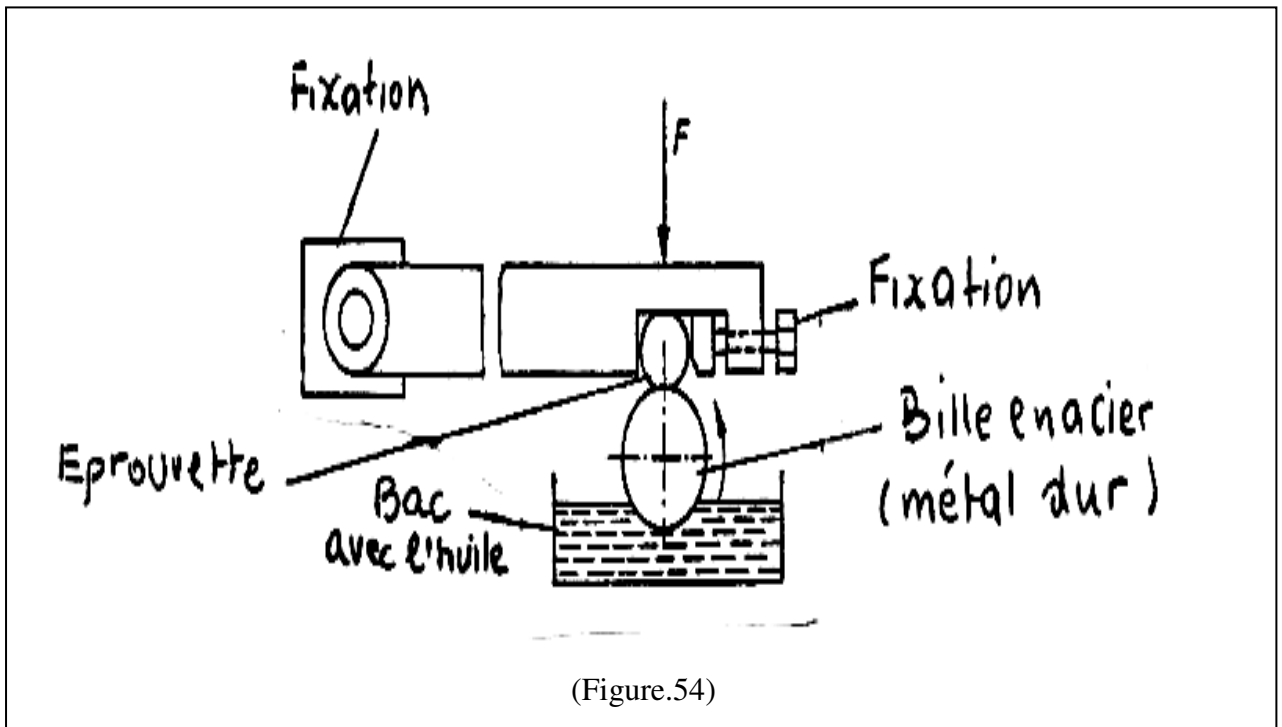
c. L'essai à mouvement alternatif :



Cet essai correspond à un mouvement de va et vient d'une bille ou d'un crayon sur une plaque fixe. La force normale et la force tangentielle permettent alors de calculer le coefficient de frottement.

3.5.1. Essai d'usure de glissement

Avec l'appareil, ci-dessous (fig.54), on peut déterminer l'usure de glissement avec ou sans lubrifiant.



La charge et la vitesse de glissement peuvent être variés. La quantité d'usure peut être déterminée soit par :

- L'utilisation d'une entaille (empreinte de diamant, calotte sphérique). Durant ou après l'essai, on peut déterminer la quantité d'usure à partir de la diminution du diamètre de la calotte sphérique.
- Détermination de la profondeur ou largeur du sillon formé.
- Détermination de la perte de masse.

3.5.2. Vitesse d'usure

la vitesse d'usure v_w (m^3/m) est exprimée par le rapport du volume enlevé V_w sur la distance de glissement L_{gl} .

$$v_w = \frac{dV_w}{dL_{gl}}$$

Selon la loi d'Archard, établie de façon empirique, le volume de matière enlevée par usure V_w est proportionnel à la force normale F_N et la distance de glissement L_{gl} . De plus, il est inversement proportionnel à la dureté H du matériau.

$$V_w = K_w \frac{F_N \cdot L_{gl}}{H}$$

K_w : coefficient d'usure.

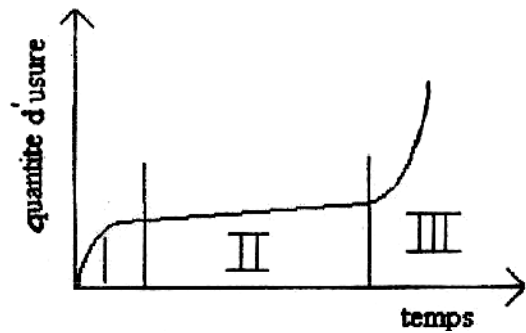
Cette loi garde sa validité tant que les variations de températures dues aux frottements restent négligeables.

$$v_w = K_w \frac{F_N}{H}$$

Il existe des méthodes qui permettent de mesurer la vitesse d'usure en continu pendant l'essai, par exemple, en suivant le déplacement du crayon ou la quantité de matière enlevée, mais le plus souvent, on détermine le volume usé en fin d'essai seulement. En divisant par la durée de l'essai, on obtient alors la vitesse d'usure moyenne. Les mesures suivantes permettent de quantifier le volume usé.

- Pesage de l'échantillon usé.
- Déplacement du crayon par rapport à la surface de départ.
- Etendu de la zone usée (surface, section).
- Quantité de produit d'usure (par pesage, par analyse chimique du lubrifiant, à l'aide de traceurs radioactif etc.).

La courbe d'usure ci-contre, (fig. 55) montre que dans le domaine I, se produit une diminution de la vitesse avec une augmentation de la quantité d'usure. Au début de cette phase, il y a inégalité des aspérités de surface, ce qui conduit au polissage de toute la surface. A la fin de cette phase débute la phase II ou la vitesse d'usure reste presque constante.



Courbe d'usure

(Figure.55)

Dans le domaine III, il y a dégénération du processus d'usure, car la vitesse d'usure augmente exponentiellement, ce phénomène est désigné comme grippage et conduit, en un temps très court, à une incapacité de fonctionnement surtout dans le cas d'absence ou défaut de lubrification.

3.5.3. Mécanismes d'usure

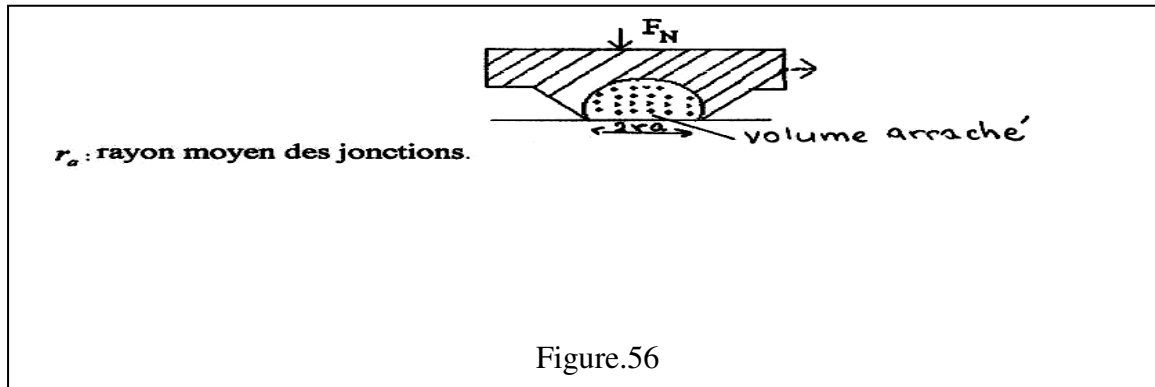
On distingue généralement quatre mécanismes d'usure.

- Adhésion, formation de jonctions adhésives puis arrachement de métal.
- Abrasion ou labourage par des aspérités ou des particules abrasives.
- Délaminage, croissance de fissures sous la surface suivie d'une rupture par fatigue.
- Oxydation ou enlèvement de matière oxydée

3.5.3.1. Usure par adhésion

Les deux surfaces, en mouvement relatif, ne se louchent, qu'aux aspérités. Lorsqu'on applique une force normale F_N , les zones de contact subissent une déformation plastique, il se forme alors des micro-soudures, appelées jonctions adhésives, (frottement par adhésion). S'il existe à chaque instant, n_j jonctions de surface identique, la vraie surface vaut :

$$A_r = n_j \cdot \Pi \cdot r_a^2$$



Avec une approximation, on peut relier A_r , à H .

$$A_r = \frac{F_N}{H}$$

Le nombre de jonctions correspond donc à :

$$n_j = \frac{F_N}{H \cdot \Pi \cdot r_a^2}$$

La durée de vie t_j d'une jonction s'élève à ::

$$t_j = 2 \frac{r_a}{V_{gl}}$$

V_{gl} : vitesse de glissement.

Le nombre de jonctions formées par mètre parcouru :

$$N_1 = \frac{n_j}{2 \cdot r_a} = \frac{n_j}{t_j \cdot V_{gl}}$$

Certaines jonctions peuvent, toutefois, se défaire sans qu'il ne reste d'effet permanent, ainsi, seule une fraction des jonctions, conduit à l'arrachement de particules d'usure.

Le paramètre K_{WA} désigne la probabilité qu'une jonction donne naissance à une particule d'usure. Pour simplifier, on suppose que le volume arraché équivaut à une hémisphère de rayon r_a .

La vitesse d'usure v_W s'obtient en multipliant le nombre de jonctions avec leur volume et avec K_{WA} .

$$v_W = K_{WA} \cdot N_j \frac{4 \cdot \Pi \cdot r_a^3}{6}$$

En substituant N_j par $n_j / 2 r_a$.

$$v_W = K_{WA} \frac{n_j}{2 r_a} \frac{4 \cdot \Pi \cdot r_a^3}{6} = K_{WA} \frac{n_j \cdot r_a^2 \cdot \Pi}{3}$$

$$v_W = \frac{dV_W}{dL_{gl}}$$

En intégrant l'expression :

$$dV_W = v_W \cdot dL_{gl}$$

$$V_W = \frac{K_{WA}}{3} \cdot \frac{F_N \cdot L_{gl}}{H}$$

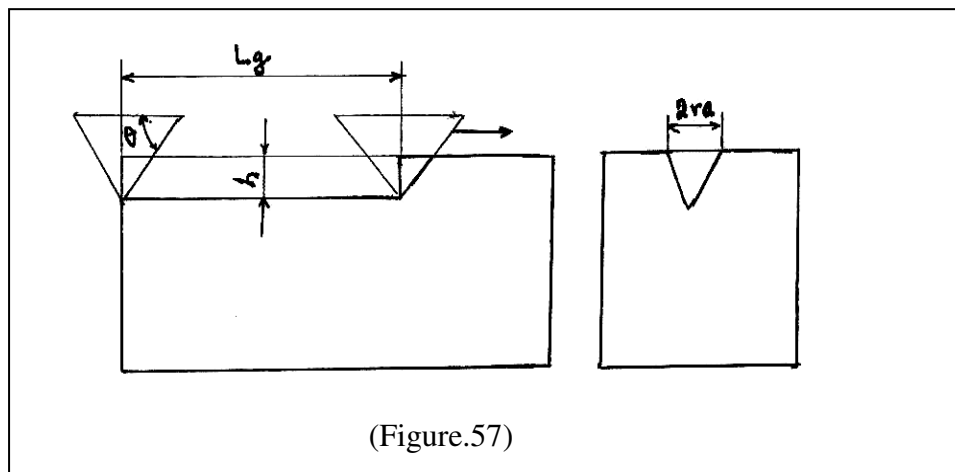
Avec :

$$\frac{K_{WA}}{3} = K_W$$

3.5.3.2. Usure par abrasion

Elle implique un déplacement de matière par labourage, autrement dit, une déformation plastique formant des bourrelets ou des copeaux. Parfois ceux-ci se cassent et constituent alors des particules d'usure. Ce mécanisme est important lorsqu'un matériau dur glisse sur un matériau relativement mou, notamment en présence d'abrasif. Lors d'un polissage mécanique, l'abrasion à l'aide de poudres très fines (diamant), permet d'obtenir des surfaces métalliques lisses et brillantes. Les moteurs, engrenages et roulements à billes subissent, en service, une usure par abrasion souvent liée à la présence de particules d'usure durcies par écrouissage ou oxydation. La formation de rainures démontre l'action de ces particules.

La figure 57 présente un modèle d'usure par abrasion où une aspérité conique en matériau dur se déplace sur une surface mole sous l'effet d'une force normale F_N , elle pénètre dans la dite surface, à une profondeur h .



$h = r \cdot \text{tg } \theta$. Lorsque l'aspérité se déplace sur une distance L_{gl} , elle déplace un volume de :

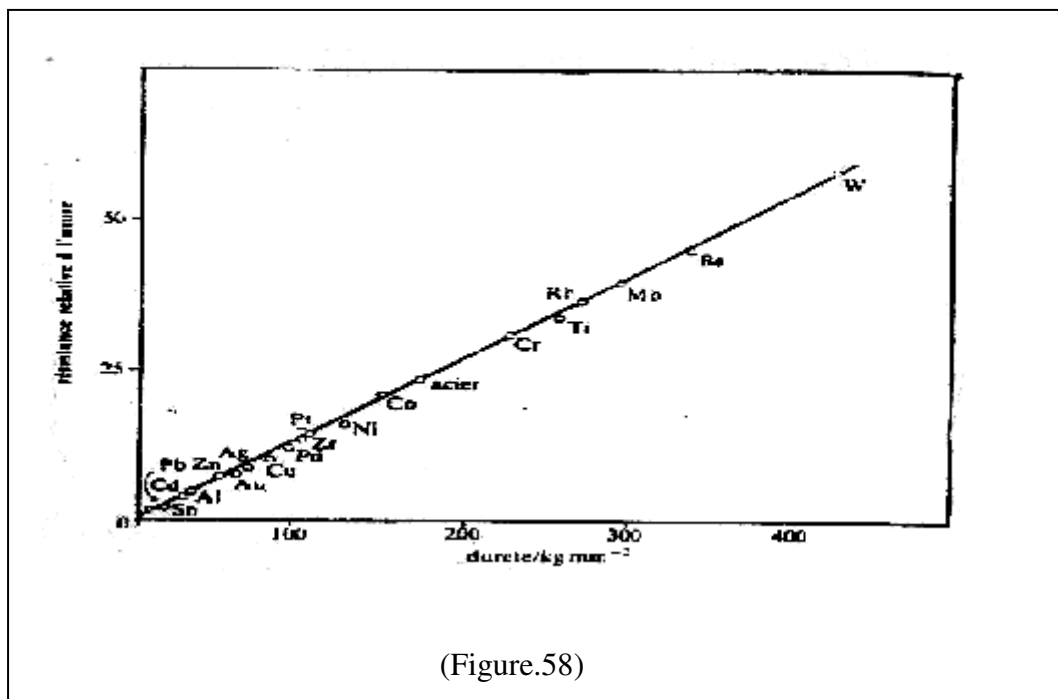
$$V_W = L_{gl} \cdot h \cdot \pi \cdot r_a$$

$$H = \frac{F_N}{A_r} = \frac{F_N}{\pi \cdot r_a^2} \Rightarrow r_a^2 = \frac{F_N}{\pi \cdot H}$$

Comme : $h = r_a \cdot \text{tg } \theta$, donc $V_M = L_{gl} \cdot h \cdot \pi \cdot r_a = L_{gl} \cdot r_a^2 \cdot \text{tg } \theta$

$$V_M = L_{gl} \frac{F_N}{\Pi \cdot H} \quad \text{tg } \theta = \frac{\text{tg } \theta}{\Pi} \frac{F_N \cdot L_{gl}}{H} \Rightarrow \frac{\text{tg } \theta}{\Pi} = K_W$$

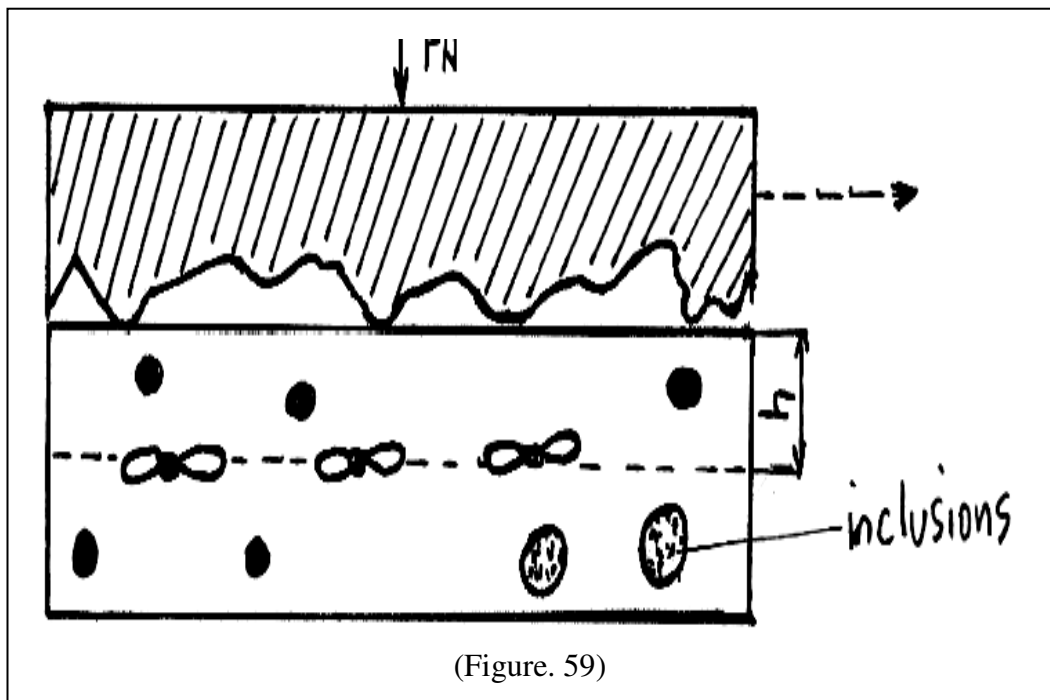
Dans ce modèle, le coefficient d'usure dépend surtout de l'angle d'attaque de l'abrasif. La vitesse d'usure d'abrasion est inversement proportionnelle à la dureté du matériau usé. L'équation ci-dessus, contient seulement la dureté du métal usé, celle de l'abrasif n'apparaît pas. La dureté de l'abrasif n'a pas d'importance lorsqu'elle est au moins 1,3 fois supérieure à celle du métal usé. La figure 58 montre l'influence de la dureté sur la résistance relative à l'usure de différents métaux.



(Figure.58)

3.5.3.3. Usure par délaminage

Sous certaines conditions, des fissures de fatigue se forment dans un plan parallèle à la surface de contact, à quelques micromètres de profondeurs. Dès qu'une telle fissure atteint une taille critique, une rupture donne naissance à une particule d'usure. Les fissures se forment en dessous de la surface de contact, car la contrainte de cisaillement y est maximale.



(Figure. 59)

Différents mécanismes peuvent contribuer à la création de fissures. Une hypothèse plausible, postule que les fissures partent de cavités qui se forment au voisinage d'inclusions non métalliques.

La figure 88 indique schématiquement ce modèle où une surface rugueuse et dure glisse sur un métal contenant des inclusions non métalliques rigides. Une distance moyenne λ sépare les aspérités avec l'échantillon mou, provoque un incrément de déformation y_0 par cisaillement.

Le cisaillement atteint un maximum dans un plan parallèle à la surface située à une profondeur h , du même ordre de grandeur (quelques micromètres) que la dimension des aspérités, donnée par leur rayon r_a .

Des fissures naissent aux cavités situées dans ce plan. Leur taille s'accroît à chaque cycle de déformation. Après un certain nombre de contacts n_{crit} , la surface occupée par les fissures dépasse une valeur critique. Une rupture a lieu et un volume de matière égal à $A.h$ se détache, représentant la surface géométrique. Au nombre critique de contacts correspond une distance parcourue $n_{crit} \cdot \lambda$.

La vitesse d'usure vaut ainsi :

$$v_W = \frac{dV_W}{dL_{gl}}$$

$$v_W = \frac{A \cdot h}{n_{crit} \cdot \lambda}$$

Avec $h \approx r_a$

$$v_W = \frac{A \cdot r_a}{n_{crit} \cdot \lambda}$$

$$\frac{1}{A_r} \approx \frac{\lambda}{r_a}$$

A_r : surface réelle de contact.

$$v_W = \frac{A_r \cdot \lambda \cdot r_a}{n_{crit} \cdot \lambda \cdot r_a} = \frac{A_r}{n_{crit}}$$

Le volume enlevé correspond à : $V_M = v_W \cdot L_{gl}$

$$H = \frac{F_N}{A_r} \Rightarrow A_r = \frac{F_N}{H} \Rightarrow V_W = \frac{1}{N_{crit}} \cdot \frac{F_N \cdot L_{gl}}{H}$$

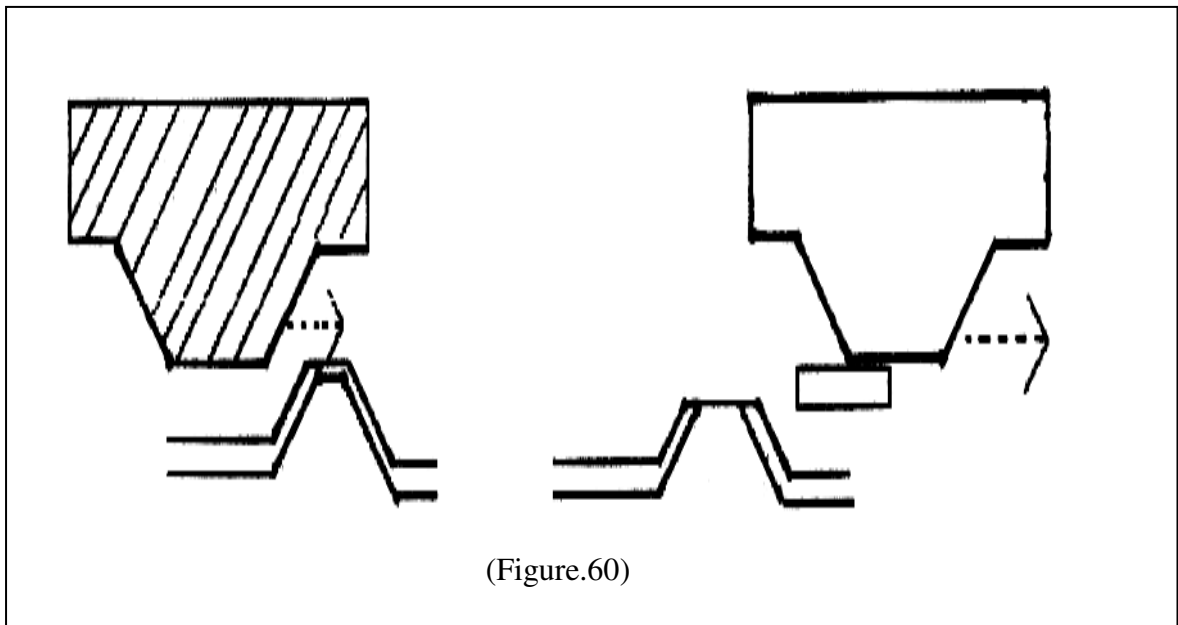
$$K_W = \frac{1}{n_{crit}}$$

Le coefficient d'usure, dans ce cas, correspond donc à l'inverse du nombre critique de contact provoquant la rupture. La valeur de n_{crit} , dépend du nombre d'inclusions, donc de la micro structure du matériau.

3.5.3.4. Usure par oxydation

L'usure par oxydation se produit en présence d'oxygène, lorsque le frottement provoque un échauffement important du contact. La température élevée accélère la croissance des couches d'oxyde. Quand celles-ci atteignent une épaisseur critique, des frottements s'en détachent sous l'effet de cisaillement, une nouvelle couche d'oxyde se forme alors sur la surface mise à nu et ainsi de suite. L'usure par oxydation est donc un enlèvement mécanique de matériau oxydé.

Ce processus est décrit schématiquement par la figure 60. Une aspérité dure se déplace par rapport à une surface rugueuse recouverte d'une couche d'oxyde. Le frottement détache l'oxyde au lieu de contact.



Pour estimer la vitesse d'usure, on admet que la croissance de l'oxyde suit une loi parabolique :

$$L^2 = K_p \cdot t$$

L : épaisseur d'oxyde.

t: le temps.

K_p : constante d'oxydation parabolique.

La couche atteint une épaisseur critique L_{crit} après un temps t_{crit} .

$$t_{\text{crit}} = \frac{L_{\text{crit}}^2}{Kp}$$

Au temps t_{crit} , on a une longueur parcourue de :

$$l_{\text{crit}} = t_{\text{crit}} \cdot v_{\text{gl}}$$

Un volume d'oxyde $A_t \cdot L_{\text{crit}}$ se détache de la surface.

v_{gl} : vitesse de glissement.

A_t : surface réelle de contact.

$$v_W = \frac{dV_W}{dL_{\text{gl}}} \approx \frac{A_t \cdot L_{\text{crit}}}{t_{\text{crit}} \cdot v_{\text{gl}}}$$

En posant :

$$K_{\text{crit}} = \frac{L_{\text{crit}}^2}{Kp}$$

$$A_t = \frac{F_N}{H}$$

$$v_W = \frac{F_N L_{\text{crit}} Kp}{H v_{\text{gl}} L_{\text{crit}}^2} = \frac{Kp F_N}{v_{\text{gl}} L_{\text{crit}} H}$$

$$K_W = \frac{Kp}{v_{\text{gl}} L_{\text{crit}}}$$

Le coefficient d'usure dépend donc de la vitesse de glissement v_{gl} , et de la constante d'oxydation K_p .

3.6. Grippage

Les conditions d'usure et de frottement déjà envisagées, sont des conditions normales. Cependant, il existe des conditions d'usure catastrophiques qui provoquent une destruction rapide du contact. La transition se manifeste normalement par une augmentation brusque du coefficient de frottement. Ce phénomène est appelé grippage.

Dans la plupart des cas, le grippage apparaît après une certaine durée de service seulement car l'usure dégrade peu à peu le contact, augmentant progressivement le frottement. Dès que la dégradation du contact atteint une valeur critique, il y a grippage, c'est à dire, formation de jonctions soudées de section importante entre les matériaux de contact.

L'échauffement local du contact favorise en général l'établissement des conditions de grippage. Dans certains cas extrêmes, il peut même provoquer la fusion de l'une ou des deux surfaces.

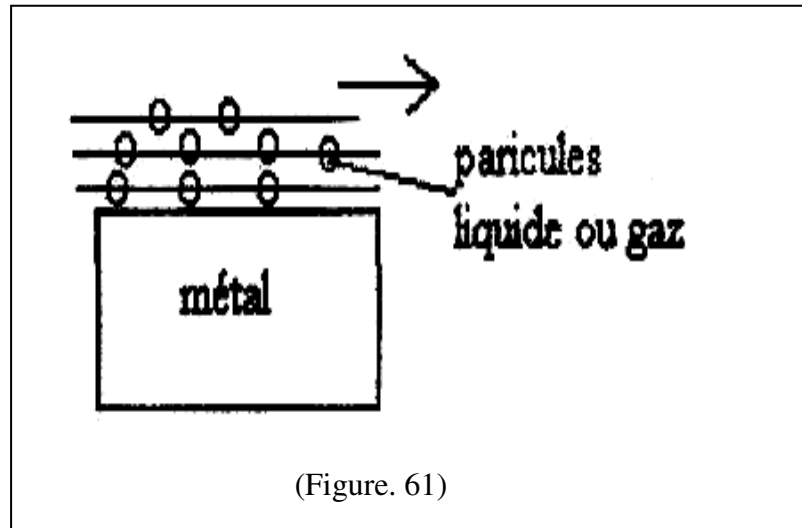
3.7. Usure due aux impacts et aux fluides

L'écoulement turbulent, parallèle à une paroi, d'un fluide contenant ou non des particules en suspension, ou l'impact d'un jet de liquide, de gouttelettes ou de particules entraînées par un gaz, peut provoquer, le plus souvent, une usure par érosion. La corrosion s'ajoute généralement, à ce type d'altération. On distingue trois phénomènes d'usure dues aux impacts et aux fluides, notamment par :

- **Erosion.**
- **Cavitation.**
- Impact

3.7.1. Usure par érosion

Elle correspond à une dégradation de la surface sous l'effet d'impacts de particules, de gouttelettes, d'un jet ou de l'action d'un écoulement turbulent, (fig. 61).



Les particules solides entraînées par un liquide ou un gaz et qui heurtent la surface provoquent une usure par érosion. Elle est normalement due à des particules solides, entraînées par un liquide ou un gaz, qui heurtent la surface. Le sablage, méthode de nettoyage de surfaces métalliques avant l'application d'une peinture représente un cas particulier où l'érosion provoquée devient une fonction utile. L'action simultanée de la corrosion et de l'usure par érosion porte le nom de corrosion-érosion. Ainsi à la sortie des fours d'incinération de déchets, par exemple, l'usure due aux particules de cendres entraînées par les gaz de combustion, accélère la corrosion. Autre exemple, lorsque l'écoulement de l'eau dans un tuyau en cuivre dépasse une vitesse critique, on observe une forte accélération de la corrosion. Dans ce cas un phénomène de corrosion-érosion se produit même en l'absence de particules, par la seule action mécanique du fluide sur la paroi.

3.7.2. Corrosion-érosion due à l'écoulement turbulent d'un fluide

Certains métaux se corrodent beaucoup plus rapidement en présence d'un fluide, dont la Vitesse d'écoulement turbulent dépasse une valeur critique. La corrosion-érosion se manifeste notamment dans les systèmes d'eau chaude, en cuivre, mal dimensionnés et dans les condenseurs en alliage de cuivre.

L'écoulement d'un fluide provoque une contrainte de cisaillement τ_0 , sur la paroi.

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot f'$$

ρ : densité du fluide.

v : vitesse moyenne dans le direction de l'écoulement.

f' : coefficient de frottement additionnel représentant le rapport entre la force de frottement F agissant sur la surface A et l'énergie cinétique du fluide par unité de volume.

$$E_{\text{Kin}} = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2$$

$$f' = \frac{F \cdot I \cdot A}{E_{\text{Kin}}}$$

f' dépend de la vitesse d'écoulement du fluide, de la rugosité des parois et de la géométrie de l'installation. Selon la relation :

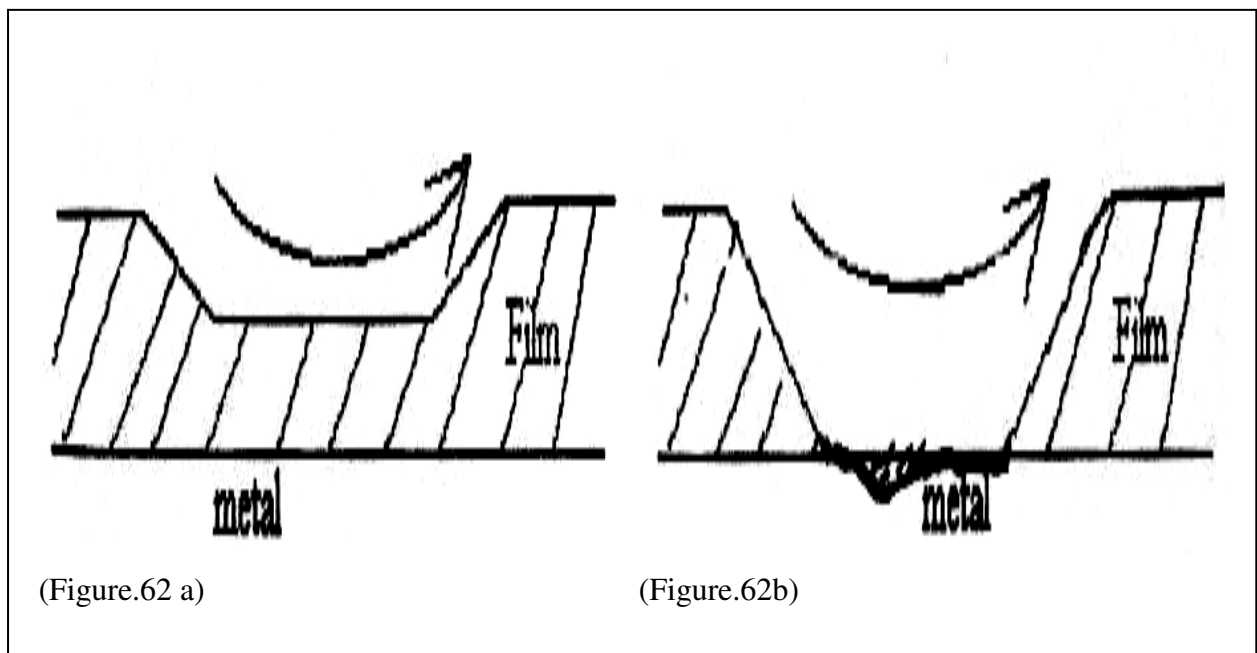
$$\tau_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot f'$$

La vitesse critique de corrosion-érosion v_{crit} , s'élève à :

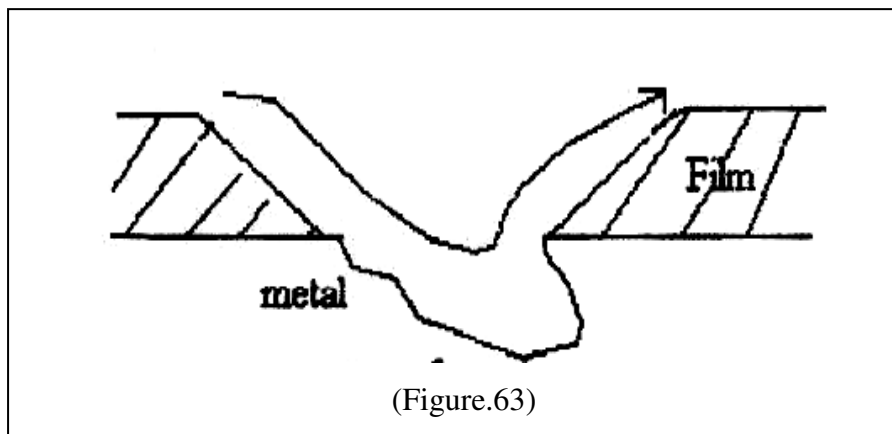
$$\tau_0 = \left[\frac{2 \cdot \tau_{\text{crit}}}{\rho} \cdot f' \right]^{1/2}$$

τ_{crit} : représente la contrainte de cisaillement critique qui provoque une détérioration de la surface par érosion. La corrosion-érosion du cuivre et de ses alliages est un phénomène bien connu, lorsqu'ils se corrodent dans l'eau. Ces métaux considérés comme non passivables, forment des films superficiels relativement friables contenant des oxydes, des carbonates ou des chlorures, ce qui les rend particulièrement sensibles aux processus d'altération par corrosion-érosion.

L'influence de la rugosité de surface sur le processus de corrosion-érosion est importante. Une paroi rugueuse subit une corrosion-érosion plus importante qu'une paroi lisse. La corrosion-érosion augmente la rugosité d'une paroi métallique au cours du temps, la vitesse d'attaque varie donc avec la durée d'exposition au milieu corrosif. Les mécanismes responsables de ce phénomène sont données sur la figure 62 a et b. un exemple de la corrosion-érosion du cuivre en milieu aéré. Le fluide provoque une abrasion locale de la couche superficielle mettant progressivement le métal à nu.



L'oxygène accède alors plus facilement à la surface métallique et la corrosion s'accélère en ces lieux. Le transport de l'oxygène contrôle la vitesse de corrosion, qui dépend donc des conditions hydrodynamiques. Les turbulences locales, qui accélèrent le transport de l'oxygène, peuvent ainsi causer des cavités de formes caractéristiques.



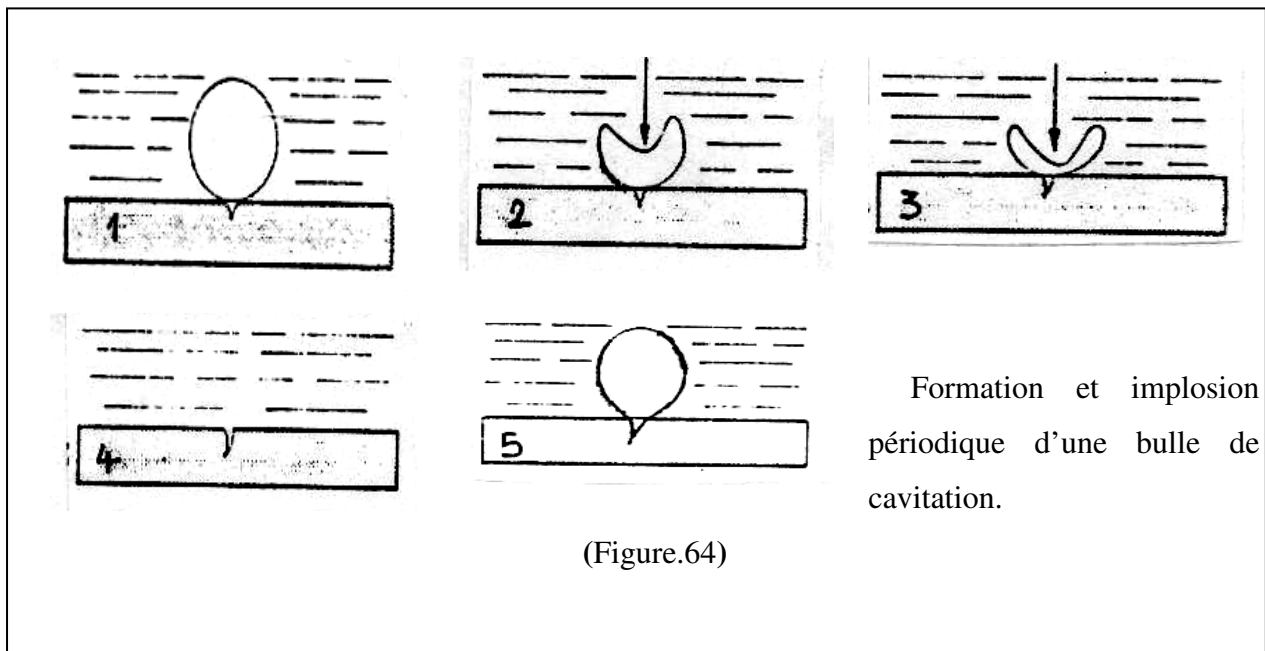
Les alliages passivables, tels que les aciers inoxydables et le titane, sont généralement peu sensibles à la corrosion-érosion due aux fluides, pour autant que ceux-ci ne contiennent pas de particules solides. Pour ces métaux, une vitesse critique n'existe pas.

3.7.3. Usure par cavitation ou corrosion-cavitation

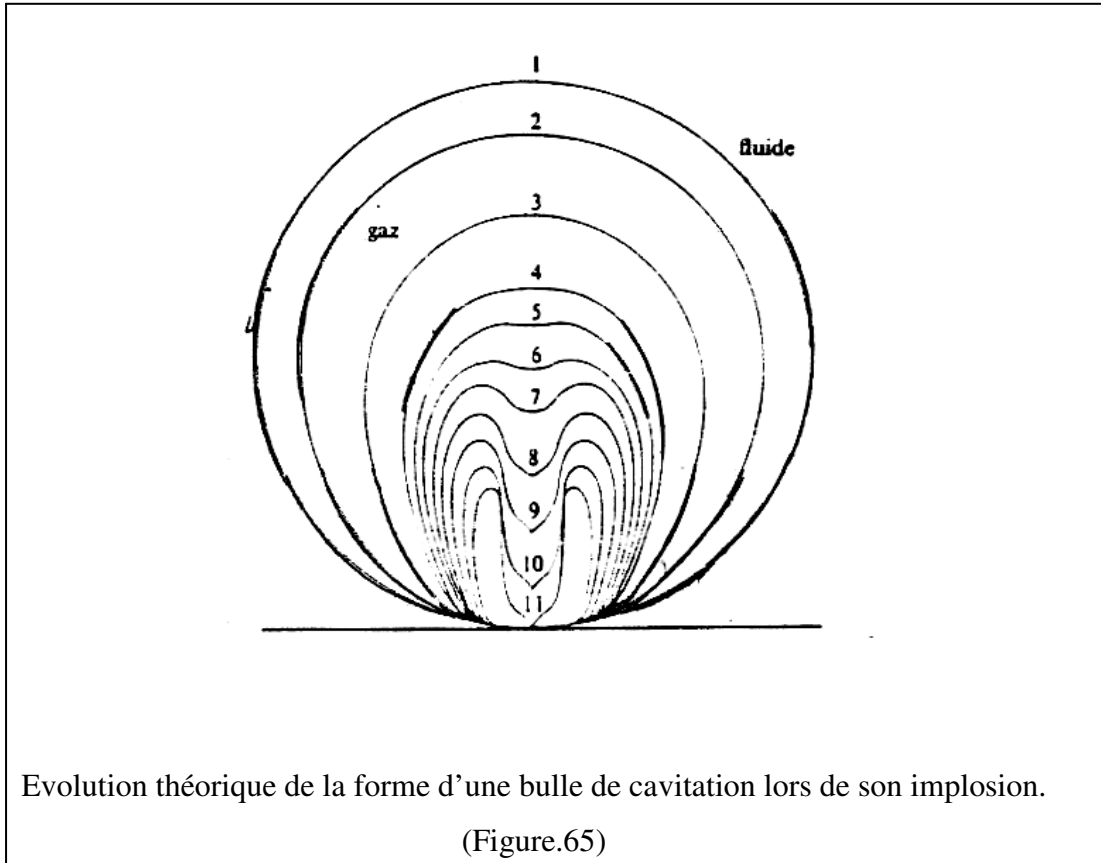
La corrosion-cavitation désigne la dégradation progressive d'une surface sous l'action combinée de la corrosion et de l'implosion de bulles de cavitation. Ces bulles se forment dans les fluides en écoulement turbulent, lorsqu'il existe localement une sous pression en aval d'un orifice dans une conduite, sur certaines parties d'une hélice de bateau ou d'une turbine hydraulique, c'est à dire, lorsque la pression dans les fluides en écoulement turbulent devient temporairement inférieure à la pression de vapeur du liquide, le phénomène de cavitation peut se produire.

Une fraction de liquide se transforme en bulles de gaz. L'implosion de ces bulles entraîne une usure par cavitation ou une corrosion-érosion. Ces bulles possèdent un diamètre variant entre quelques micromètres et un millimètre.

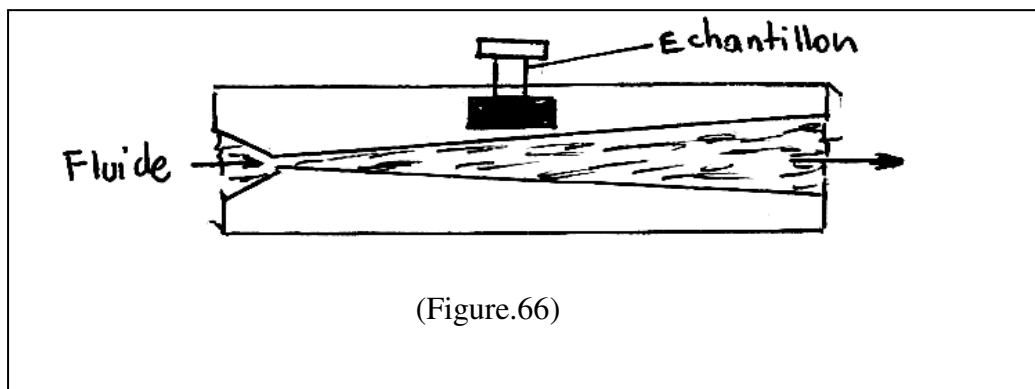
En raison des fluctuations de pression, les bulles de cavitation implosent lorsque la pression augmente localement. Ce phénomène produit une onde de choc pendant un temps très court (quelques microsecondes). La pression à la surface du métal peut donc atteindre une valeur très élevée jusqu'à 1000 Mpa comme le montre les figures 64 / 1, 2, 3,4 et 5.



La répartition de ce mécanisme induit une fatigue de la surface métallique, pouvant créer des dommages irréversibles. Des figures d'attaques de formes caractéristiques apparaissent en ces lieux altérés.



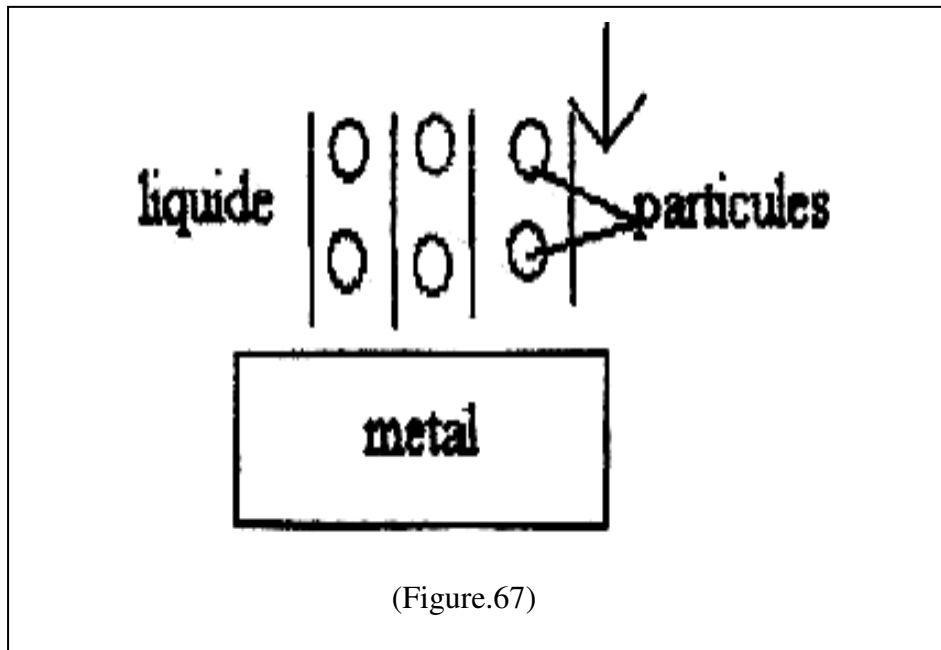
Le phénomène d'implosion est représenté par la figure 65, qui montre le changement de la forme de la bulle de cavitation qui implose. Elle se rétrécit au centre, puis un jet de liquide se forme et vient heurter perpendiculairement la surface métallique. Pour les études expérimentales de la corrosion-cavitation, on utilise, plus fréquemment, le système venturi, figure 66. Le système venturi existe sous différentes formes, mais son principe reste identique.



Un fluide s'écoule en régime turbulent dans une conduite. Il passe par un rétrécissement qui provoque la formation de bulles de cavitation. Celles-ci sont entraînées par le fluide et implosent plus loin, là où se trouve l'échantillon. C'est une augmentation de la section qui, par le ralentissement du fluide qu'elle provoque, accroît la pression locale et induit ainsi l'implosion.

3.7.4. Usure par impact ou corrosion-impact

L'impact de gouttelettes d'eau ou d'un jet de liquide sur une paroi est à l'origine de l'usure par impact, (fig. 67).



Les effets mécaniques, plutôt que chimiques, dominent généralement lors de l'érosion provoquée par l'impact de particules ou de gouttelettes entraînées dans un liquide ou un gaz. Les exemples sont nombreux comme, l'enlèvement de la rouille par sablage, l'érosion des zones exposées sur les avions volant à grande vitesse par l'impact de gouttelettes de pluie et l'érosion d'une paroi métallique par jet de vapeur.

L'impact d'une particule ou d'une gouttelette produit momentanément des contraintes élevées à la surface du matériau heurté, pouvant provoquer des déformations locales et des microfissures. Ce phénomène possède une application intéressante dans le découpage par jet d'eau des matériaux plastiques et composites.

3.7.5. Facteurs d'usure et influence de l'état du traitement thermique

Les facteurs d'usure des différents métaux et structure indiqués sur le tableau ci-dessous, sont déterminés selon le rapport de la perte de masse de l'éprouvette d'essai à la perte de masse d'une éprouvette standard.

Matériaux ou structure	Dureté HB	Facteur d'usure
Ferrite	90	1,40
Fonte grise	200	1,00 à 1,50
SAE 1020 recuit	107	1,00
Fonte blanche	400	0,90 à 1,00
Perlite	220 à 350	0,75 à 0,85
Austénite (12 % Mn)	200	0,75 à 0,85
Rainite	515	0,75
Martensite	715	0,60

L'état de traitement thermique de l'acier influe aussi sur les propriétés d'usure. Pour différents traitements thermiques, on a différentes pertes de masse.

Les valeurs indiquées sur le tableau ci-dessous, sont données pour un acier au carbone non allié.

C (%)	Recuit		Normalisation		Trempe	
	HB	Perte de masse (g)	HB	Perte de masse (g)	HB	Perte de masse (g)
0,10	55	0,15	65	0,13	50	0,135
0,20	60	0,14	75	0,125	60	0,12
0,40	75	0,13	90	0,115	105	0,08
0,60	90	0,12	98	0,105	110	0,075
0,80	90	0,11	105	0,10	115	0,07
1,00	90	0,11	107	0,10	115	0,07
1,20	90	0,11	108	0,095	115	0,065
1,30	90	0,11	110	0,090	115	

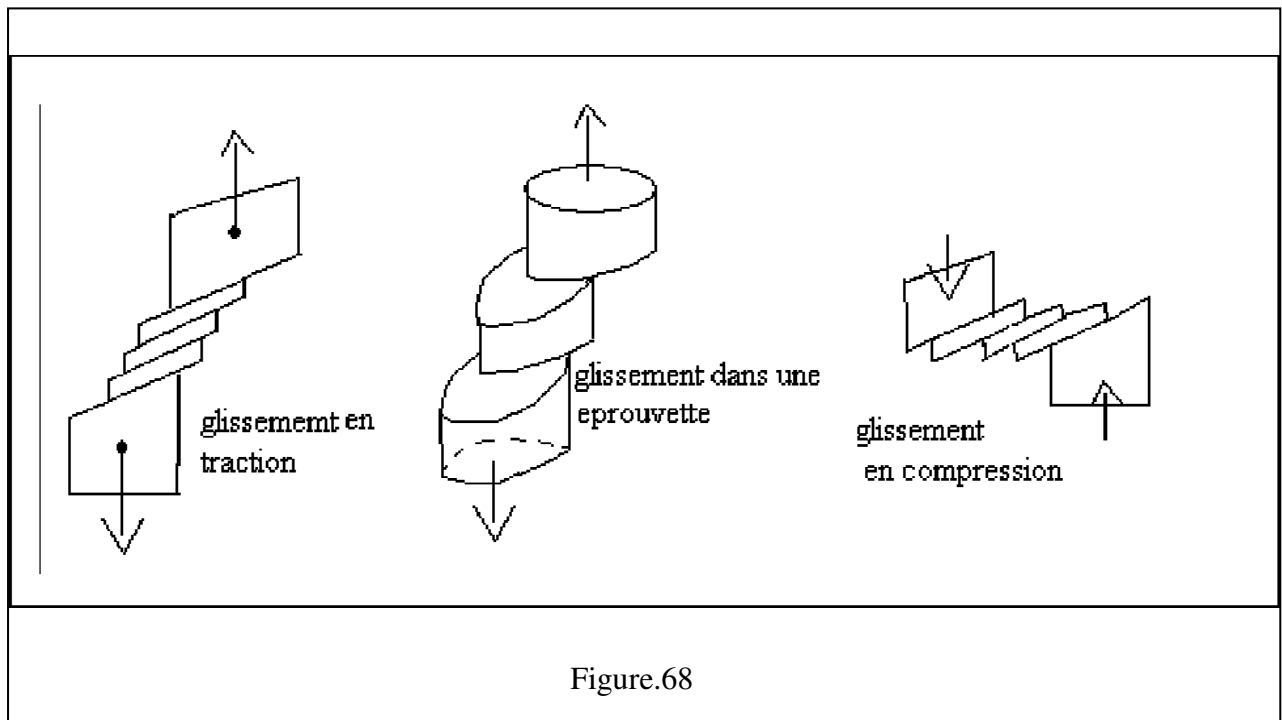
4. ELASTICITE

4.1. La déformation plastique

L'étude des propriétés mécaniques des métaux et en particulier leurs propriétés plastiques a un intérêt pratique considérable. Une grande partie de la recherche en métallurgie a pour but la mise au point d'alliages à résistance mécanique et à tonalité de plus en plus élevée. L'effort de traction à vitesse constante d'allongement permet l'étude détaillée des propriétés mécaniques de base, mais cette étude peut être complétée par des observations micrographiques, qui peuvent mettre en évidence les modes de déformation plastique, l'étape de perfection de la structure cristalline (présence de défauts cristallins).

Dans ce contexte, la théorie des dislocations joue un rôle important, car elle nous permet de prévoir quelques données essentielles de la déformation plastique. Considérons un monocristal soumis à un effort de traction (fig.68). Diverses familles de plans de glissements sont possibles pour les dislocations, les plans (111) par exemple dans la structure CFC.

Lorsque la charge de traction est assez élevée, on aura une contrainte de cisaillement maximum, qui provoquera le déplacement et la multiplication des dislocations, ce qui conduit au glissement des diverses tranches parallèles du cristal les unes par rapport aux autres (fig.69).



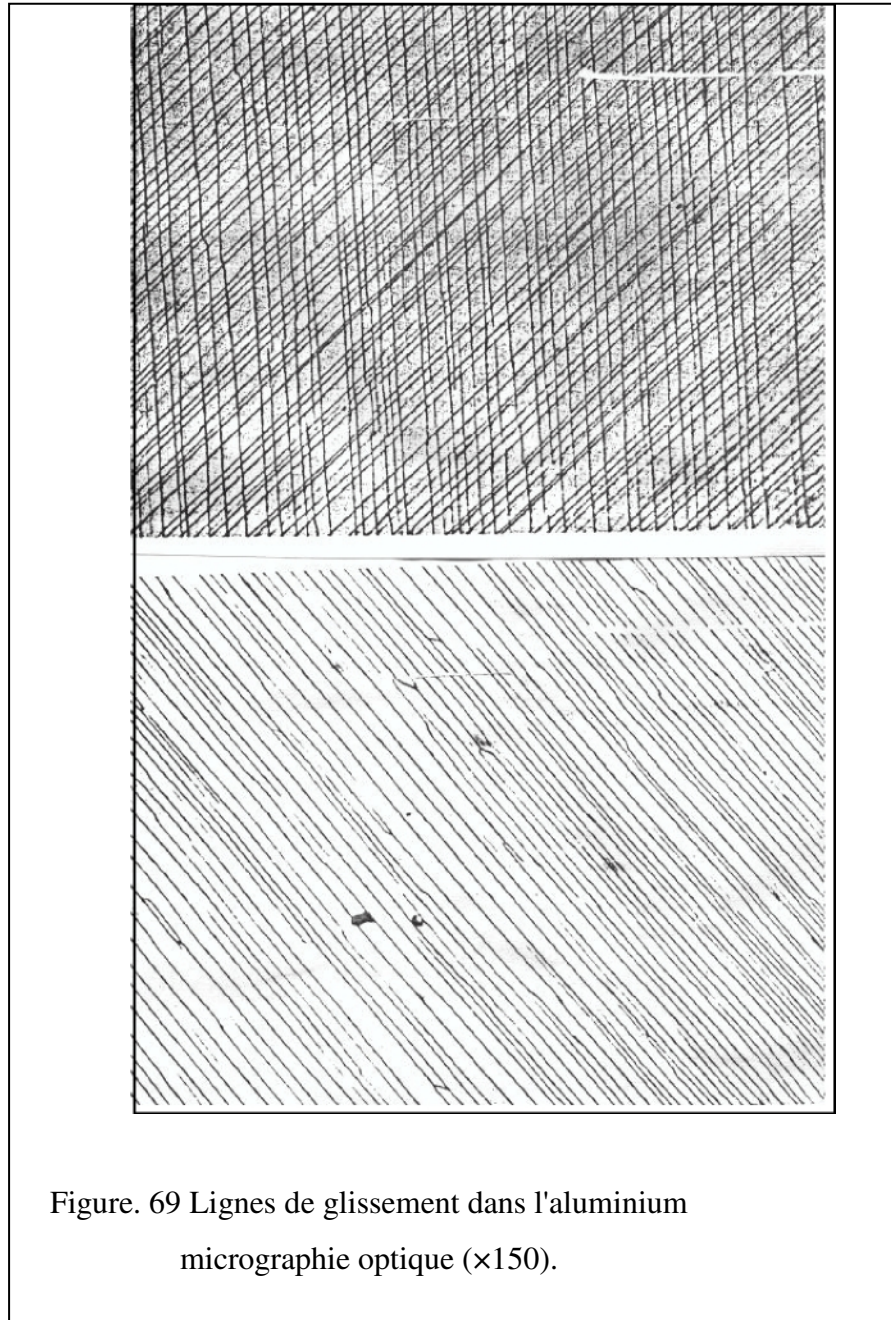


Figure. 69 Lignes de glissement dans l'aluminium
micrographie optique ($\times 150$).

4.2 Aspects micrographiques de la déformation plastique

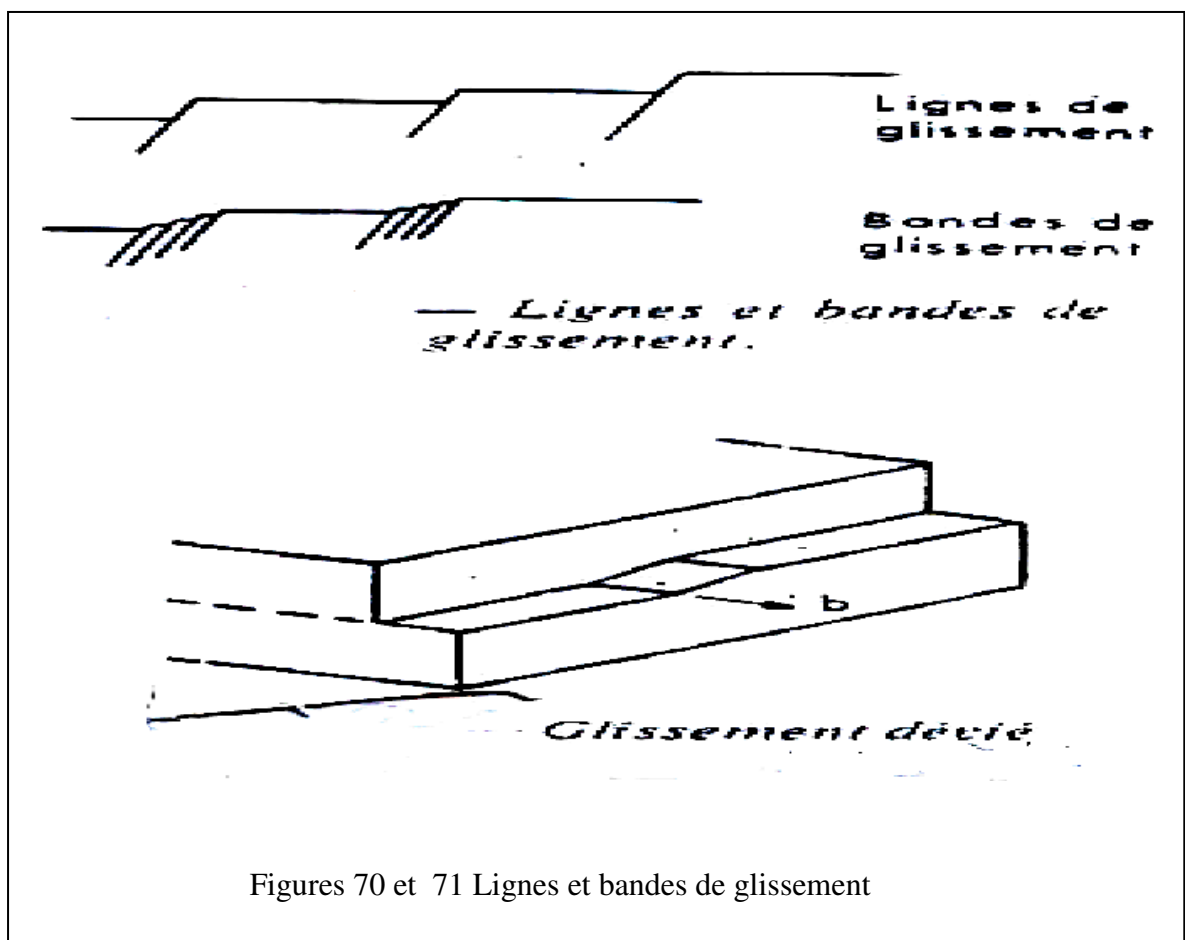
4.2.1 Glissement

La déformation plastique s'effectue essentiellement par glissement suivant le schéma de la figure 1 et plus rarement (basse température, forte vitesse) par maclage.

4.2.1.1 lignes de glissement

L'observation au microscope optique montre d'une manière générale des faisceaux de lignes parallèles sur la surface, dont le nombre croît avec la déformation plastique. Ces lignes sont en fait des marches dues au processus de glissement des dislocations. La figure 2 montre

l'aspect de ces lignes sur un monocristal d'aluminium initialement poli électrolytiquement, puis déformé de 5%. Connaissant l'orientation du cristal, le système de glissement peut être déterminé. Cependant, l'observation micrographique normale est parfois trompeuse, et des "bandes" de glissement assez larges, étudiées au microscope électronique grâce à la technique des répliques, apparaissent formées de petits segments de lignes de glissement fines et droites (fig. 70). La distance entre lignes de glissement est de l'ordre de 0.01 à 1 μm et la valeur du glissement (hauteur de la marche): 10 à 1000 A. Dans les métaux CC, (le fer (X en particulier), les lignes de glissement ne sont généralement pas rectilignes, elles sont sinueuses (sauf à basse température). En effet, le fer n'a pas un système de glissement simple, et, pour une direction de glissement, plusieurs plans de glissement sont actifs qui appartiennent tous à une même zone $\langle 111 \rangle$. Ce phénomène peut s'interpréter en termes de glissement dévié fig.71.



Figures 70 et 71 Lignes et bandes de glissement

La composante vis de la dislocation pouvant changer de plan de glissement, quand il en existe plusieurs pour une même direction de glissement b' . Le glissement peut être observé également dans la masse du métal, en attaquant une section polie par un réactif mettant en évidence les points d'émergences des dislocations, les figures d'attaque sont alignés suivant l'intersection du plan de glissement avec la surface observée. La topographie des rayons X se prête bien à l'observation des débuts du glissement dans un cristal de haute perfection.

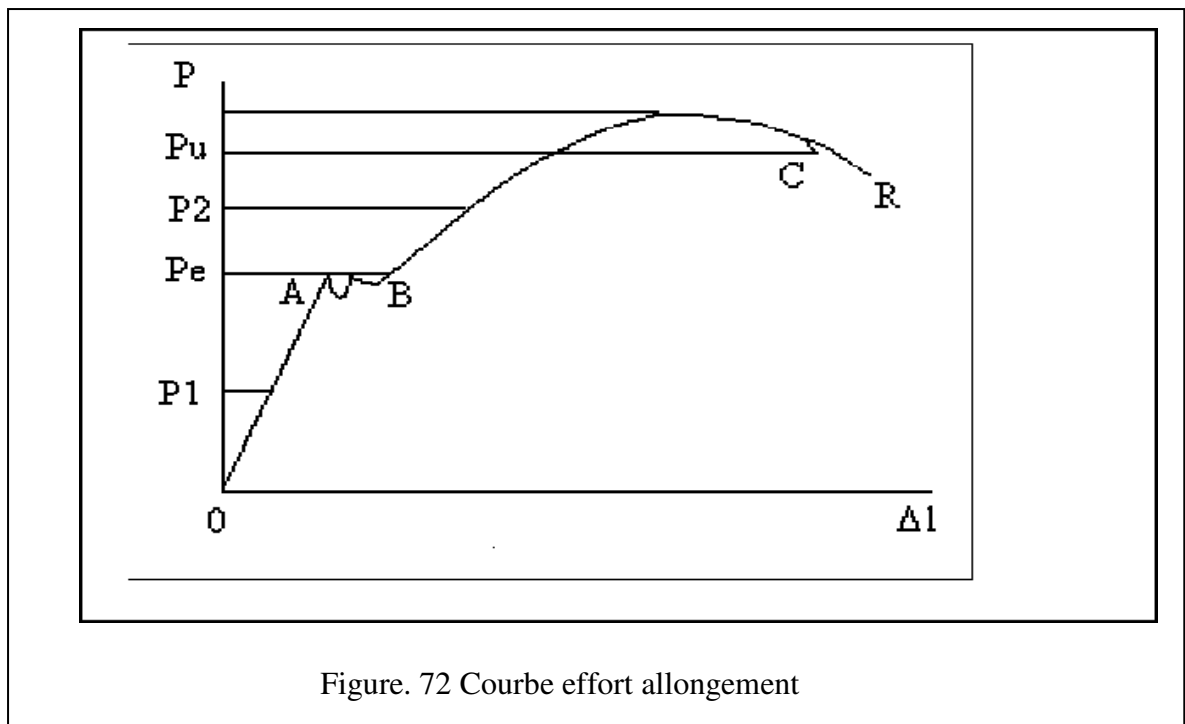
4.3. Polycristaux

Les courbes ont généralement un aspect simple et comprennent un domaine linéaire où la déformation est élastique, un domaine plastique d'allure parabolique, suivi éventuellement d'une décroissance de la charge (striction). Les courbes se terminent au point correspondant à la rupture de l'éprouvette.

Les diverses caractéristiques mécaniques à partir de la courbe de traction sont données ci dessous

4.3.1. Propriétés élastiques

Lorsqu'on exerce une contrainte (force) sur un cristal, celui-ci se déforme. Si le cristal reprend sa forme initiale lorsque la contrainte est relâchée, la déformation est dite élastique (absence de déformation permanente ou plastique). Dans le domaine élastique la déformation est proportionnelle à la contrainte, c'est la loi de Hooke (fig.72)



La courbe relevée au cours de l'essai de traction est connue sous le nom de diagramme d'essai de traction.

- la partie OB correspond à une déformation élastique, les allongements sont proportionnels aux charges.
- Le point B correspond à la fin de l'élasticité ou P_e est la charge de limite élastique.
- La partie BC correspond aux déformations permanentes (plastiques), les allongements croissent très vite avec la charge.
- Le point R correspond au moment de l'apparition de la rupture avec P_R charge de la rupture.

En général la contrainte normale est déterminée par: $\sigma = F / S_0$ (N / mm²)

F: la charge instantanée

S_0 : section initiale de l'éprouvette.

L'allongement s'écrit alors:

$$\varepsilon = \Delta l / l_0 = (l - l_0) / l_0$$

l_0 = longueur initiale

l = longueur après allongement.

$\text{Tang}\beta = E$.

$\delta = \varepsilon \times E$.

E : module d'élasticité.

ε : Allongement e x.100%

δ_e : contrainte limité d'élasticité.

Les contraintes inférieures à δ_e produisent pratiquement que des déformations élastiques. La limite élastique $\delta_{0.2}$ correspond à la contrainte provoquant une déformation élastique et durant la quelle on peut observer une chute de la charge lors de l'essai. Il existe la limite élastique supérieure et inférieure. Pour les matériaux sans variation de limite élastique, on détermine la limite élastique équivalente $\delta_{0.2}$, il est fréquent que la limite élastique est choisie comme une caractéristique de la résistance. La contrainte à laquelle est effectuée la rupture s'appelle résistance à la rupture δ_r , donc: $\delta_r = F_{\max} / A_0$ (N/mm²)

Dans ce cas la rupture s'effectue dans la partie ascendante du diagramme, dans le cas où la rupture s'effectue dans la partie descendante du diagramme ou:

$$\delta_r = F_r / A_0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Dans le cas des métaux plastiques, une fois les contraintes atteignent la valeur de rupture, la déformation se concentre en un secteur déterminé de l'éprouvette où apparaît un rétrécissement de la section appelée Striction (fig. 73).

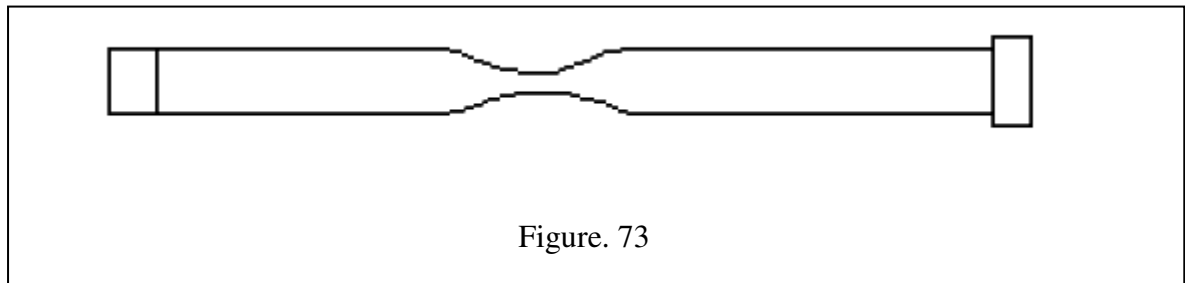


Figure. 73

La charge diminue brusquement et en certain moment l'éprouvette se rompt à la valeur σ_R

La striction $\Psi = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100\%$

Les diagrammes contraintes- allongements diffèrent d'un métal à un autre (fig.75).

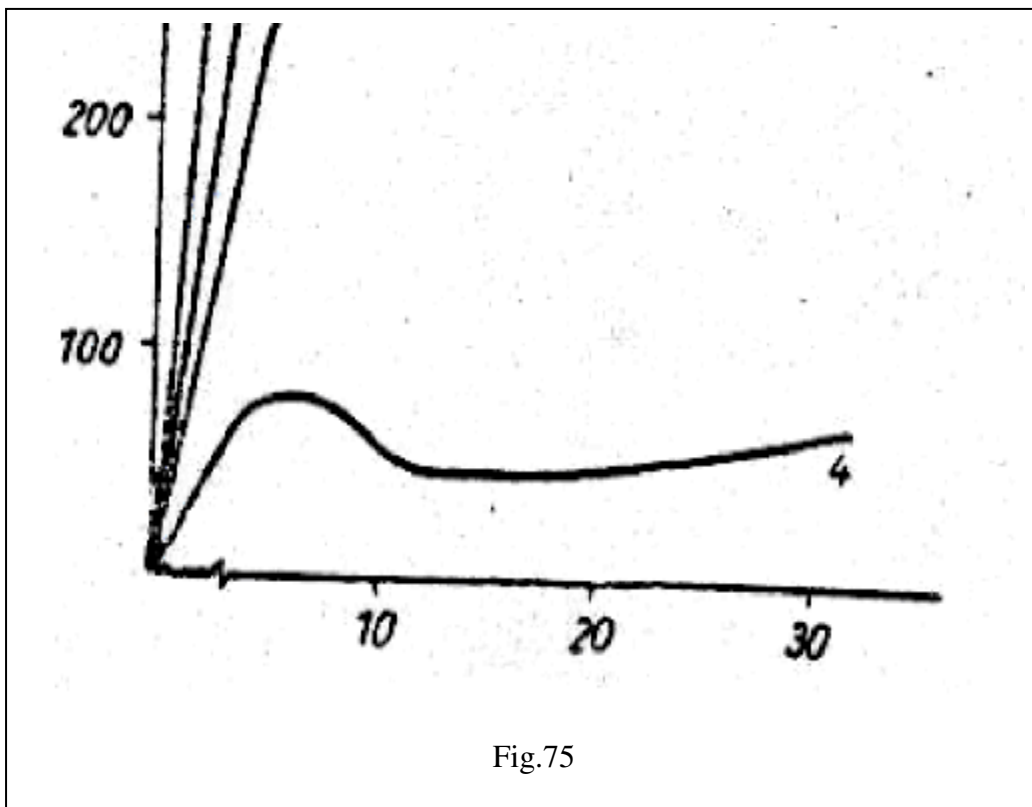


Fig.75

Modules d'élasticité E (n/mm²)

Diamant :	120.10⁴
Wolfram :	35.10⁴
Acier :	20.10⁴
FGL :	5.10⁴
Porcelaine :	55.10³
Alliage Al	70.10³
Caoutchouc :	<10²
Résine :	120-140.10²

4.4 Structure de déformation en microscopie électronique

La microscopie électronique sur lames minces conduit à une connaissance plus profonde de la structure et des mécanismes de déformation plastique, puisqu'elle permet l'observation directe de certains défauts, les dislocations en particulier.

Dans un métal bien recuit on n'observe qu'un petit nombre de dislocations qui sont les traces du réseau du Frank. Dans un métal déformé la densité de dislocations croît avec la déformation, plus vite dans les monocristaux que dans les polycristaux. Dans le cuivre et l'argent polycristallins on trouve ainsi $\sigma / \varepsilon \sim 2.10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

Une relation tout à fait générale (poly- et monocristaux) a été établie entre la contrainte d'écoulement et la densité de dislocations δ .

4.4.1 modules d'élasticité

Différents modules peuvent être définis pour un corps solide isotrope, c'est-à-dire un solide élastique idéal auquel s'applique par définition la loi de Hooke. Voyons brièvement les cas de quelques sollicitations simples.

Traction: la contrainte σ est la force appliquée par unité d'aire. La déformation ε est l'allongement relatif $(l - l_0) / l_0$. La loi de Hooke s'écrit:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Où E est le module d'Young. Il vaut environ 200GPa pour l'acier, 100 pour le cuivre, 10 pour le plomb. La même définition s'applique au cas de la compression. L'allongement est accompagnée d'une contraction latérale égale à $\Delta r / r_0 = -\nu \varepsilon$ où ν est le coefficient de poisson.

La variation relative de section est donc:

$$\Delta S / S_0 = 2 \Delta r / r_0 = -2 \nu \epsilon$$

et la variation relative de volume:

$$\Delta V / V_0 = \Delta L / L_0 + \Delta S / S_0 = \epsilon - 2 \nu \epsilon$$

L'expérience montre que ν n'est pas égal à $1/2$, mais plutôt voisin de $1/3$, il y a légère augmentation de volume au cours de la traction. Dans une éprouvette sollicitée en flexion plane, une face est en traction, l'autre en compression; il existe une région non déformée appelée fibre neutre.

Cisaillement : Dans la traction ou la compression, les contraintes sont normales aux faces sur lesquelles elles s'exercent; dans le cisaillement elles sont parallèles à ces faces, c'est-à-dire tangentielle.

La contrainte est toujours la force par unité d'aire (fig. 76): on l'appelle dans ce cas scission τ ; la déformation γ s'exprime en valeur relative par le déplacement par unité d'épaisseur, c'est-à-dire par l'angle indiqué sur la figure. La loi de Hooke s'écrit:

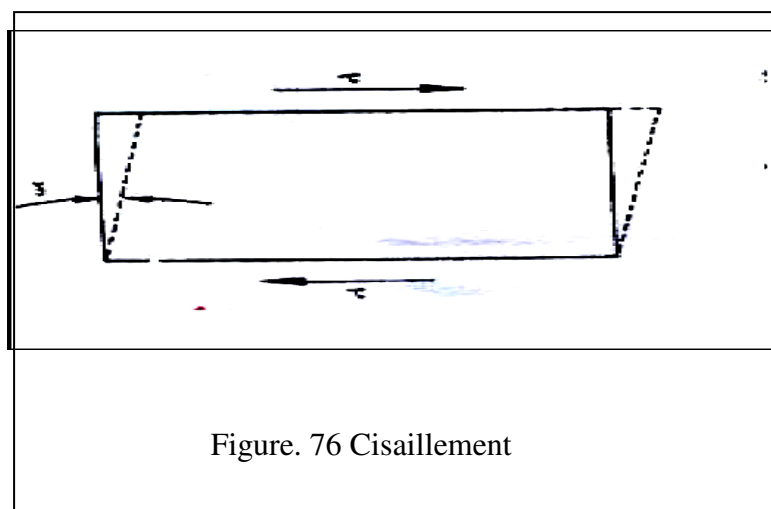
$$\tau = \gamma \mu$$

Où μ est le module de coulomb.

On démontre très facilement que E et μ sont reliés par l'équation:

$$\mu = E / 2 (1 + \nu)$$

Dans une éprouvette sollicitée en torsion, la déformation est un cisaillement pur.



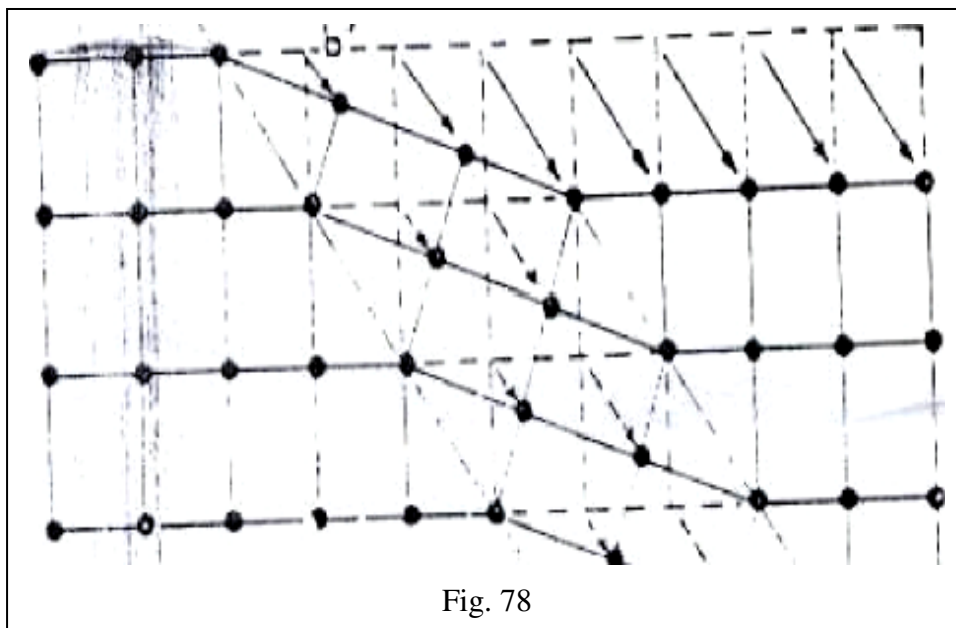
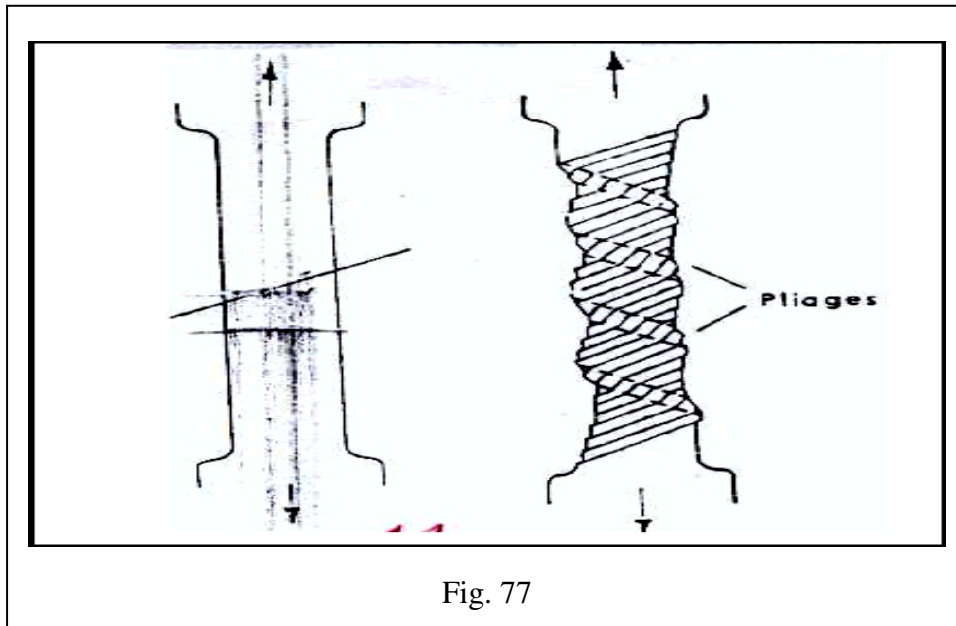
Où ξ est un facteur de l'ordre de l'unité et τ une contrainte qui est sensiblement nulle pour les cristaux CFC.

La distribution des dislocations n'est pas homogène. Pour de très faibles déformations, les configurations sont simples et correspondent à des schémas théoriques classiques: dipôles, multipôles, supercrans, intersections et jonctions, boucles...

Si l'énergie de défaut d'empilement est faible, les dislocations s'accumulent dans leur plan de glissement, et leur densité augmente continûment avec la déformation. Par contre, pour les métaux de forte énergie de défaut, le glissement dévié est possible: dès 1 ou 2% de déformation, les dislocations ont tendance à former des écheveaux. Les annihilations mutuelles, qui constituent un véritable processus de restauration dynamique, conduisent à un équilibre partiel entre dislocations créées, en nombre fonction de la vitesse de déformation, et dislocations annihilées, en nombre fonction de la température. Les écheveaux forment des parois qui délimitent des cellules plus ou moins parfaites (fig. 77 et 78). Pour $E=10\%$, elles ont un diamètre d'environ $1\mu\text{m}$. Au fur et à mesure que la déformation progresse, les parois se densifient et la taille des cellules diminue légèrement. Pour l'aluminium et le cuivre, après écrouissage élevé, une structure cellulaire est observée, analogue à celle qui serait visible dans d'autres métaux écrouis après un recuit de restauration. Dans les métaux à plus faible énergie de défaut d'empilement, les parois sont plus floues. Dans les alliages à très faible énergie de défaut ($\sim 20\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$) comme les aciers inoxydables austénitiques, on n'observe pratiquement jamais de cellules.

Pour observer le mouvement des dislocations et leurs configurations sous contrainte. On effectue des observations dynamiques, en tractionnant et en chauffant ou refroidissant l'échantillon dans le microscope électronique. La réalisation des appareils à très haute tension (1MeV ou plus) permet de telles observations in situ.

Sur des micro éprouvettes de quelques microns d'épaisseur: le glissement des dislocations, le glissement dévié, des sources actives, des réactions de jonction, etc... ont pu être observés et filmés, et de nombreux modèles théoriques examinés.



4.5. Durcissement par précipitation discontinue

4.5.1. Généralités sur les phénomènes de précipitation

Pour améliorer les propriétés mécaniques d'un métal pur, le métallurgiste dispose de plusieurs méthodes qui, toutes consiste à créer des obstacles à l'intérieur du métal qui s'opposent à la création de nouvelles dislocations ou au déplacement des dislocations existantes et dont les principales solutions sont :

- La mise à profit des joints de grains ; diminution du diamètre des grains (efficace dans les structures cubiques centrées).
- L'écrouissage par déformation plastique.
- L'addition d'éléments d'alliages en solution solide.
- La précipitation d'une deuxième phase dispersée.
- La précipitation d'un élément insoluble à basse température (durcissement structural).

Parmi ces solutions et celle que fera l'objet de notre étude est la précipitation d'une deuxième phase. Dans la plupart des solutions solides métalliques, la solubilité limite diminue avec la température. Il en résulte qu'un alliage, dont l'état d'équilibre correspond à un système monophasé à une température déterminée, peut devenir biphasé à des températures plus basses. Ce processus qui correspond à une transformation à l'état solide avec augmentation du nombre de phases, est habituellement désigné par le terme de précipitation. Les phénomènes de précipitation revêtent dans les solutions solides métalliques une importance pratique considérable, car ils modifient profondément les propriétés parfois dans un sens favorable. Les processus de précipitation à partir de solutions solides sursaturées ; qui font intervenir les phénomènes de diffusion, sont généralement classés en deux catégories principales, la précipitation hétérogène et la précipitation homogène.

La précipitation homogène (continue) résulte des mécanismes mettant en jeu simultanément, tout au long de la transformation, l'ensemble des atomes concernés ; une des caractéristiques de la transformation continue et la variation continue du paramètre de réseau de la phase mère durant le vieillissement. La précipitation continue est caractérisée par une croissance relativement lente des cristaux β individuels, les cristaux de la matrice conservent leur structure, mais leur concentration change continuellement. La précipitation est continue lorsque la saturation des cristaux mixtes métastables est faible (fig.79).

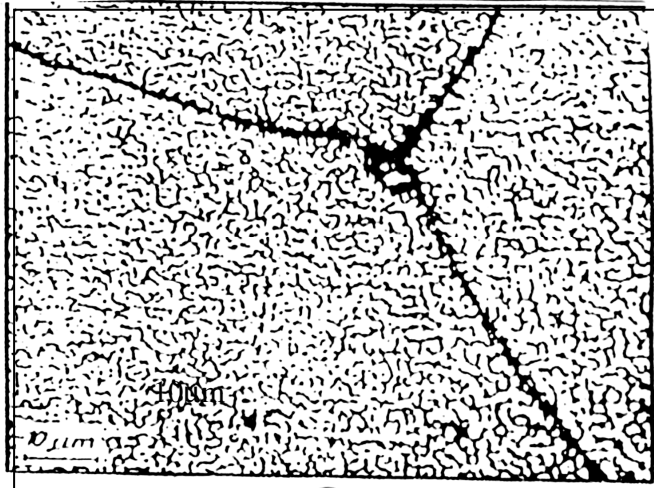


Figure 79. Précipitation continue dans l'alliage Cu-3%Ti

Dans le cas de la précipitation hétérogène, le produit de la réaction ne se forme qu'en certains sites ; parfois on confond la précipitation hétérogène et la précipitation discontinue qui n'en est en fait qu'un cas particulier. Donc en général le phénomène de précipitation consiste en la décomposition d'une solution solide sursaturée (phase homogène possédant au moins deux constituants) en un mélange de deux phases de composition différente, dont l'une à une structure proche de la phase initiale (la matrice, ou phase mère) et l'autre est généralement dispersée à l'intérieur de la matrice est appelée précipité. Elle est caractérisée par une germination et une croissance.

La figure 80 représente la précipitation discontinue dans l'alliage Cu-3%Ti.

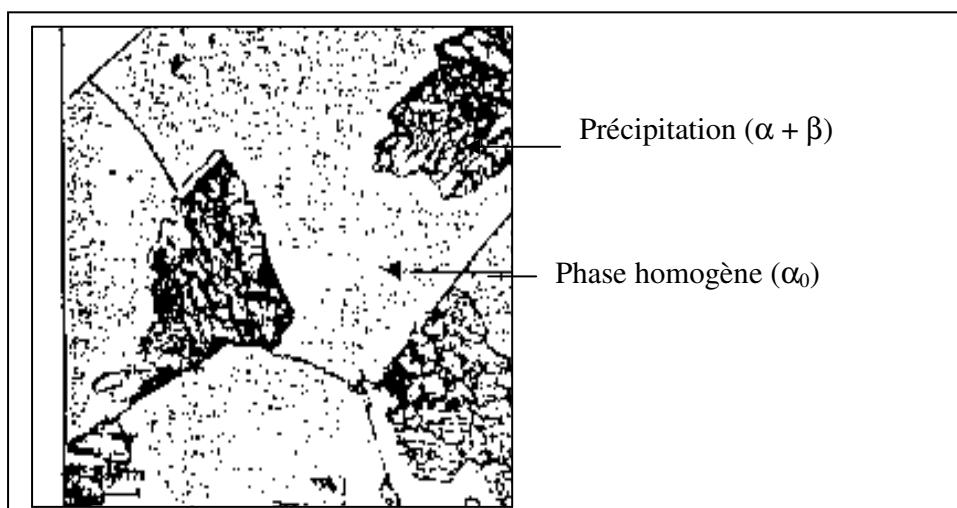


Figure 80. Précipitation discontinue dans l'alliage Cu-3%Ti

4.5.2. Types de précipitation

Le phénomène de précipitation peut-être illustré par l'exemple de la solution solide Aluminium-Cuivre (fig.81).

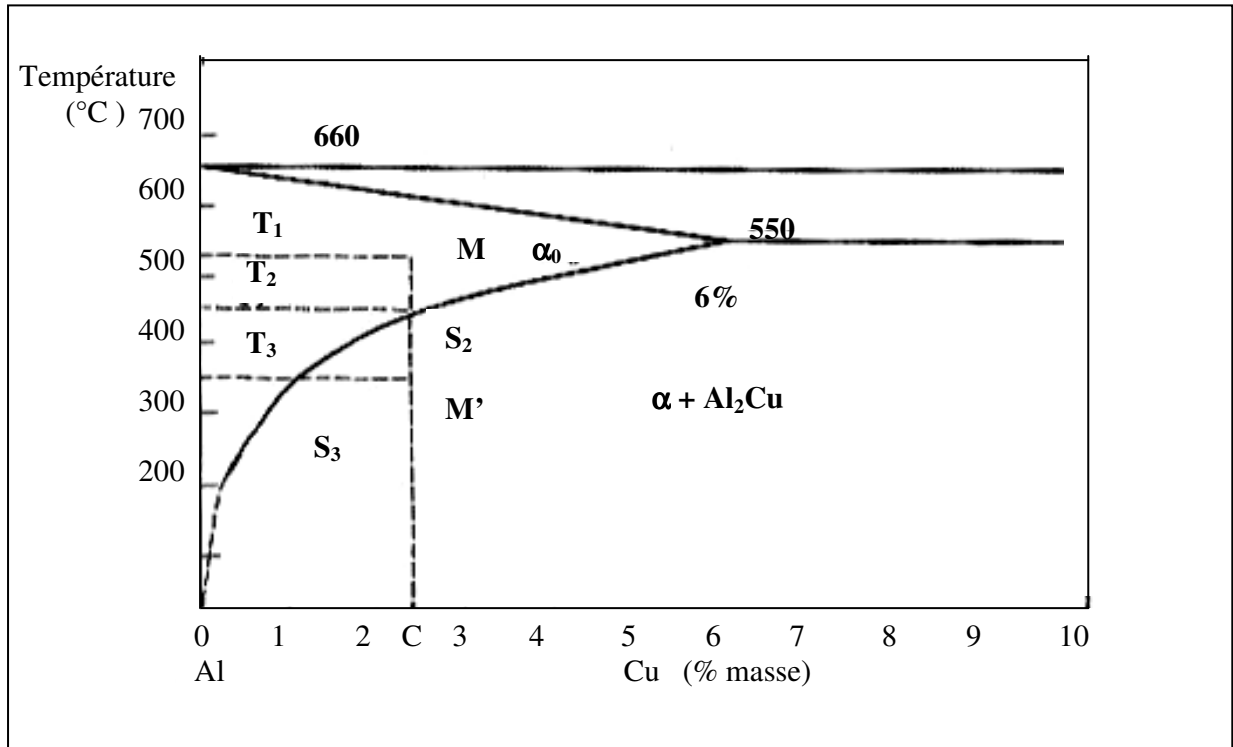


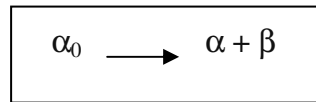
Figure 81. Diagramme d'équilibre du système d'alliages Al-Cu

Le diagramme comprend un domaine de phase α_0 (solution solide de cuivre dans l'aluminium) qui s'étend jusqu'à 6%. Considérons un alliage homogène de concentration C à une température T₁ (point M) dont l'état d'équilibre correspond à un système monophasé, si cet alliage est soumis à un refroidissement rapide de T₁ à la température ambiante, l'état stable à haute température deviendra hors d'équilibre. Le cuivre reste en sursaturation dans la solution homogène. Mais au contraire un revenu du même alliage à une température T₃ (point M') « refroidissement lent » doit le rendre comme siège d'une précipitation c'est-à-dire le transformer en un système d'équilibre biphasé ($\alpha + \beta$).

De la température T₁ à T₂ il n'y a aucune transformation, l'alliage reste homogène, au dessous de T₂ il y a transformation à l'état solide avec apparition d'une nouvelle phase β (Al₂Cu phase intermétallique) au sein de la solution solide. Ce phénomène est habituellement désigné par le terme de précipitation.

Le point représentatif de la solution solide mère se déplace le long de la courbe $S_2 S_3$, la solution solide s'enrichit en aluminium au fur et à mesure qu'elle rejette des quantités croissantes de précipités, beaucoup plus riches en cuivre.

La précipitation peut-être désignée par la réaction suivante :



α_0 - Solution solide sursaturée en élément d'alliage (phase mère).

α - La phase appauvrie en élément d'alliage ayant le même réseau de structure que la phase mère.

β - Phase précipitée riche en élément d'alliage (dans notre cas la phase intermétallique).

Donc la phase α a la même structure que la phase initiale α_0 , elle se différencie uniquement par la concentration.

La phase β peut-être :

- a) Un cristal mixte avec la même structure, le cas de la précipitation discontinue de l'alliage Au-Ni .
- b) Un cristal mixte avec une structure différente, le cas des alliages du système Pb-Sn .
- c) Phase intermétallique, le cas du système Cu-Zn .
- d) Phase liquide, le cas du système Pb-Bi .

Les phénomènes de précipitation prennent une place considérable dans les solutions métalliques, car elle modifie profondément les propriétés des alliages , parfois dans un sens favorable, ces modifications consistent le plus souvent à des élévations de la charge de la rupture et de la dureté , donc l'apparition de précipitation est le plus souvent accompagnée de changement de propriétés, la résistance est d'autant plus élevée que plus le précipité est finement reparti, même les propriétés magnétiques et électriques sont aussi influencées.

Les précipitations sont des sujets de recherches actuels, concernant surtout leurs mécanismes et leurs cinétiques. La première transformation est désignée par la précipitation continue, dite aussi homogène ou générale, c'est une transformation dans laquelle le transport des atomes se fait par diffusion, elle est caractérisée par une distribution uniforme des précipités dans la matrice .

L'appauvrissement de la phase mère en atomes de soluté permet de fournir les atomes nécessaires au développement du précipité. En pratique, la précipitation continue (homogène) ne

se produit qu'exceptionnellement et la germination démarre presque toujours sur des hétérogénéités de la phase mère qui abaissent l'enthalpie libre de formation des germes en réduisant, soit l'énergie superficielle, soit l'énergie de déformation, ou encore les deux. Ces hétérogénéités peuvent être des impuretés, des inclusions, des dislocations, des surfaces ou des joints de grains.

Il est établi que la présence des défauts de réseau favorise la germination du précipité, dans des conditions où celle-ci aurait peu de chance de se produire en l'absence de ces défauts. Pour cette raison les cristallites formées sur les défauts apparaissent fréquemment avant les cristallites résultant de la précipitation homogène.

Expérimentalement, il a été montré qu'une déformation plastique préalable, au traitement de vieillissement favorise l'évolution de la précipitation continue au détriment de la croissance des cellules dans les alliages Cu-In. D.Biwilliams et E.P.Buther affirment que sous l'influence de la déformation plastique la vitesse de la précipitation continue augmente. La déformation plastique introduit des défauts cristallographiques supplémentaires dans la matrice et la précipitation est activée sur ces défauts plans ou linéaires. Par conséquent, le degré de sursaturation de la matrice en atomes de soluté diminue, ce qui implique une diminution de la force motrice de la réaction de précipitation cellulaire.

Dans le cas d'autres alliages, la densité élevée de dislocation multiplie les sites favorables à la précipitation cellulaire, car les dislocations s'alignent pour former des joints de grains supplémentaires, ce qui favorise le type de décomposition.

La seconde connue sous le nom de précipitation discontinue ou encore connue auparavant sous l'appellation « le phénomène énigme », car ce n'est qu'en 1949 que Geisler donna des références concernant cette dernière, elle est appelée aussi transformation cellulaire, allusion faite à la morphologie du produit de réaction. Cette réaction est caractérisée le plus souvent par une coexistence de la phase sursaturée initiale (α_0), au sein de laquelle la concentration du soluté demeure inchangée et les produits de précipitation qui sont deux phases ($\alpha+\beta$) avec un front de réaction précis dans les cristaux mixtes sursaturés (α_0).

Les deux phases ($\alpha+\beta$) correspondent aux phases d'équilibre dont les compositions respectives sont celles d'équilibre à la température considérée. Les changements de structures et de composition se produisent seulement dans les régions adjacentes à l'interface mobile.

Ainsi, aux interfaces entre régions qui ont subi la réaction de décomposition et celles où cette dernière n'a pas encore lieu, il existe une discontinuité de concentration. Donc

la phase mère ne subit pas de changement jusqu'à ce qu'elle soit balayée par l'interface et la transformation est complète dans les régions sur lesquelles l'interface est passée. Donc il y a apparition de colonies formées d'un agrégat avec une phase mère appauvrie et d'un précipité tels qu'un gradient de concentration discontinue apparaît avec la phase mère.

Dans la précipitation discontinue, le front de réaction présente une limite de phase incohérente pour lequel la distance interlamellaire δ prend des valeurs de 0.5nm et dans des cas particuliers 1.0 nm (fig.82).

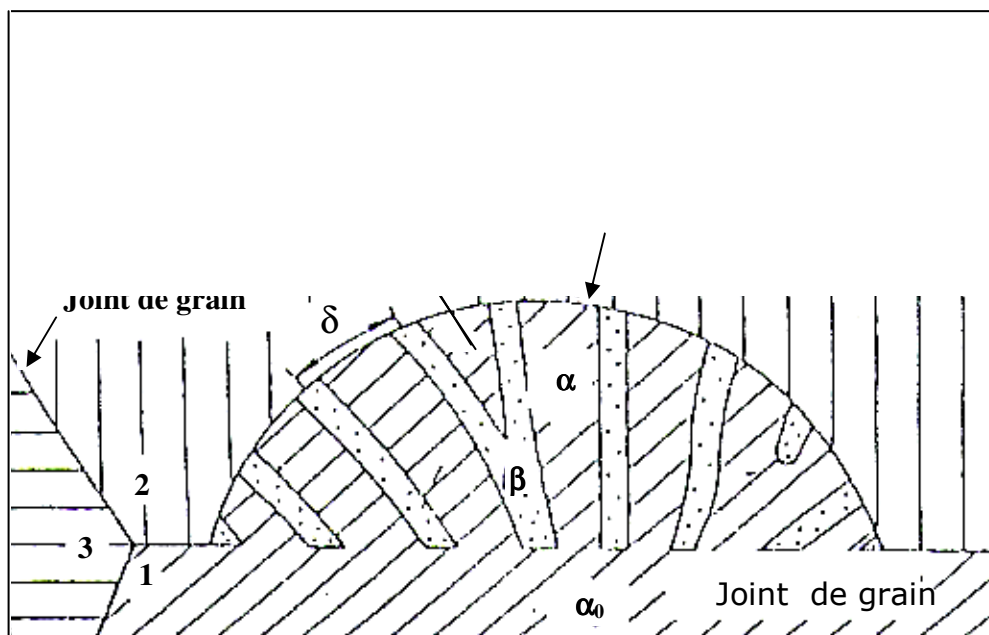


Figure 82. Schéma de la précipitation discontinue

La croissance coopérative des deux phases débute le plus souvent sur les joints de grains mais dans le cas particulier sur la surface libre et la croissance isotherme s'effectue avec une vitesse constante, dans la mesure où il n'y a pas de réactions concurrentielles.

Lorsqu'on a atteint un stade de précipitation le plus souvent par la formation d'ourlets de précipitation, la distance interlamellaire (δ) reste approximativement constante et dans lesquels les lamelles se ramifient ou se forment de nouveaux germes de la phase β dans le front de réaction.

La figure 82 indique une particularité de la précipitation discontinue ou la matrice (α) vidée de la cellule de précipitation à la même orientation que le grain 1 et la désorientation de la matrice dans le grain 2 est la particularité essentielle de la précipitation discontinue.

La figure 83 montre la précipitation discontinue dans l'alliage Mg -8,8at.%Al, obtenue par microscopie électronique, ou on peut distinguer clairement les phases α_0 , α et β .

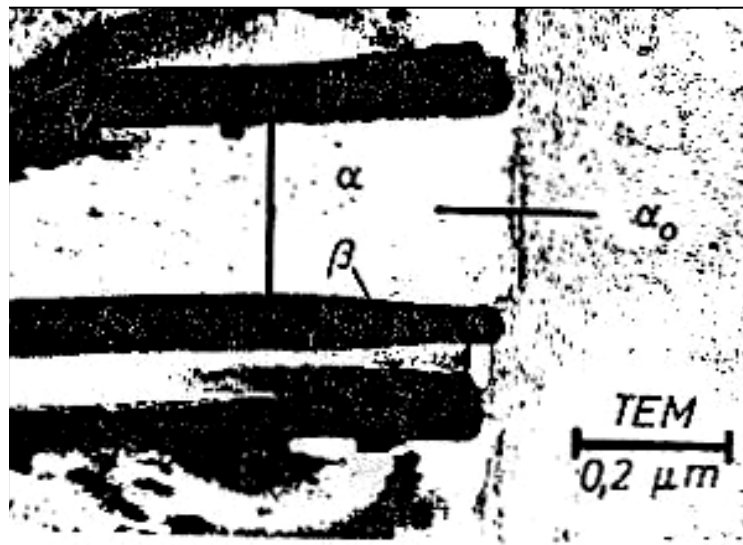


Figure 83. Précipitation discontinue dans l'alliage Mg-8At%Al

5. RESISTANCE DES MATERIAUX

5.1. Introduction

La conduite du choix d'un matériau pour un composant devant assurer une fonction donnée relève donc de l'analyse des propriétés que doit présenter ce matériau pour satisfaire le besoin. L'ingénieur définit ainsi un profil matériau.

5.2. Caractéristiques mécaniques

Parmi ces caractéristiques, la limite d'élasticité et la résistance à la traction sont sans nul doute celles auxquelles l'ingénieur pense en premier lorsqu'il conçoit. Rappelons que ces grandeurs sont des caractéristiques conventionnelles définies par la norme (norme A3-151 pour les aciers). Elles sont obtenues à partir de la courbe conventionnelle de traction. La dureté représente également une caractéristique très intéressante car très facile à mesurer. En outre, elle est étroitement liée à la limite d'élasticité du matériau et également à son comportement plastique (écrouissage). Toutes ces caractéristiques de résistance sont étroitement liées aux défauts de la structure cristalline sur lesquels on reviendra plus tard.

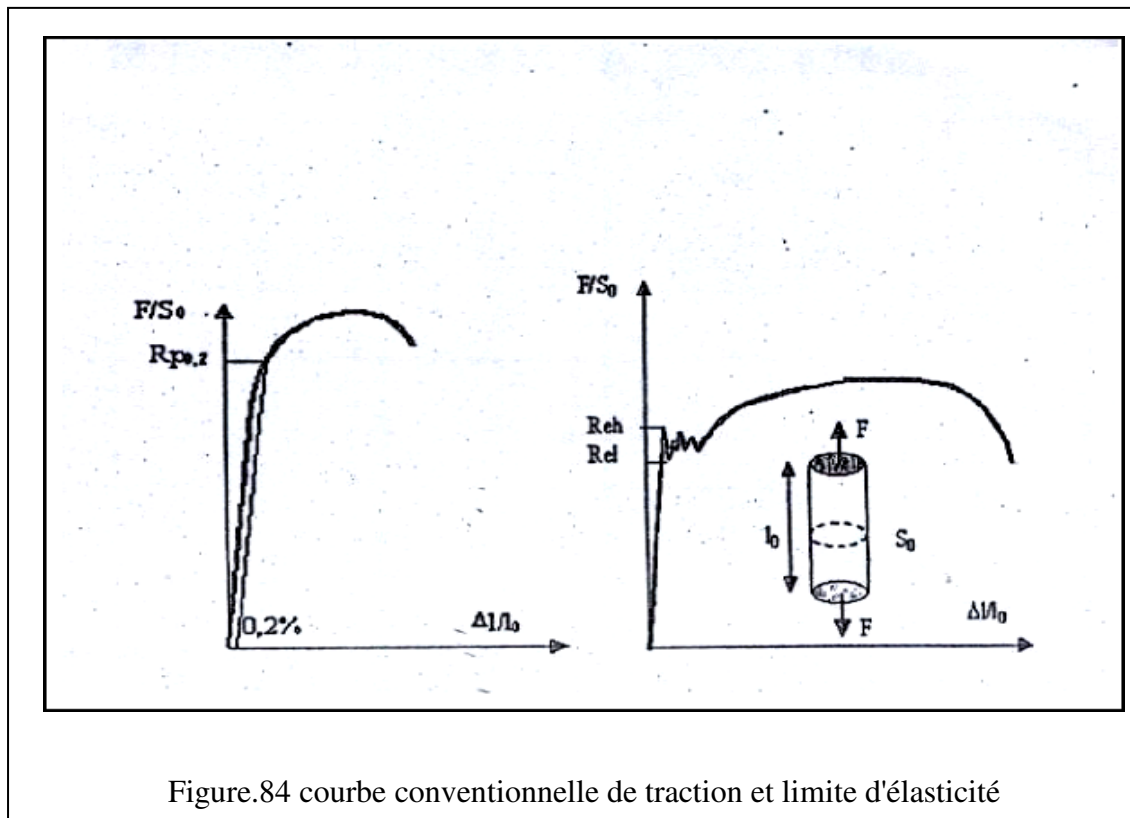
5.3. La limite d'élasticité en traction

Pour les métaux

A l'échelle microscopique, la limite d'élasticité correspond au niveau de contrainte qu'il faut appliquer pour activer les mouvements de dislocations, défauts de la structure cristalline, dans un nombre suffisamment important de grains. La limite d'élasticité d'un matériau polycristallin est en moyenne 1.5 fois supérieure à celle du matériau monocristallin. Ici apparaît l'intérêt des matériaux polycristallins vis à vis de cette caractéristique de résistance. Par définition, la limite d'élasticité (notée R_e) est la valeur de la contrainte conventionnelle F/S_0 correspondant à la transition élastique- plastique du comportement du matériau soumis à la traction uniaxiale. Dans le cas des aciers doux (à faible teneur en carbone), la déformation plastique débute par une plastification hétérogène. La courbe de traction présente alors un palier en dent de scie, appelé palier de Piobers-Luders. Il faut alors définir une limite d'élasticité haute, notée R_{eh} , qui correspond au pic de traction précédant le palier.

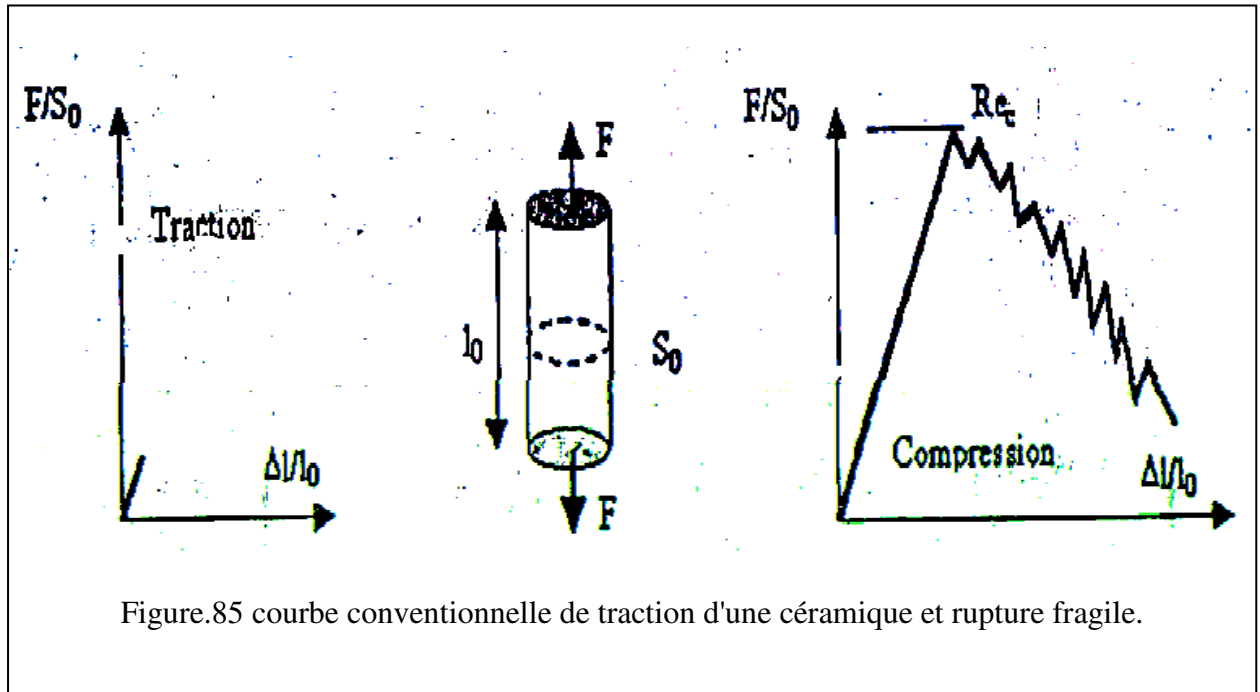
Ce pic de contrainte traduit la contrainte nécessaire pour amorcer le premier glissement plastique. On définit également une limite d'élasticité basse, notée R_{el} , et qui correspond à la contrainte la plus faible observée sur ce palier. Pour sa part, la longueur du palier de déformation plastique hétérogène est notée $A_p\%$. Pour beaucoup d'autres alliages, la transition élastique-

plastique est progressive: c'est le cas en outre pour les aciers de traitements thermiques, les alliages d'aluminium. La norme définit alors pour ces matériaux une limite d'élasticité conventionnelle correspondant à un certain taux de déformation plastique (déformation permanente), le plus souvent fixé à 0.2%. Cette valeur est notée $R_{p0.2}$ (exprimée en MPa). Dans certains domaines de la conception (construction aéronautique en autres), les ingénieurs retiennent la limite d'élasticité conventionnelle à 0.02% ($R_{p0.02}$). La figure ci-dessous illustre ces conventions.



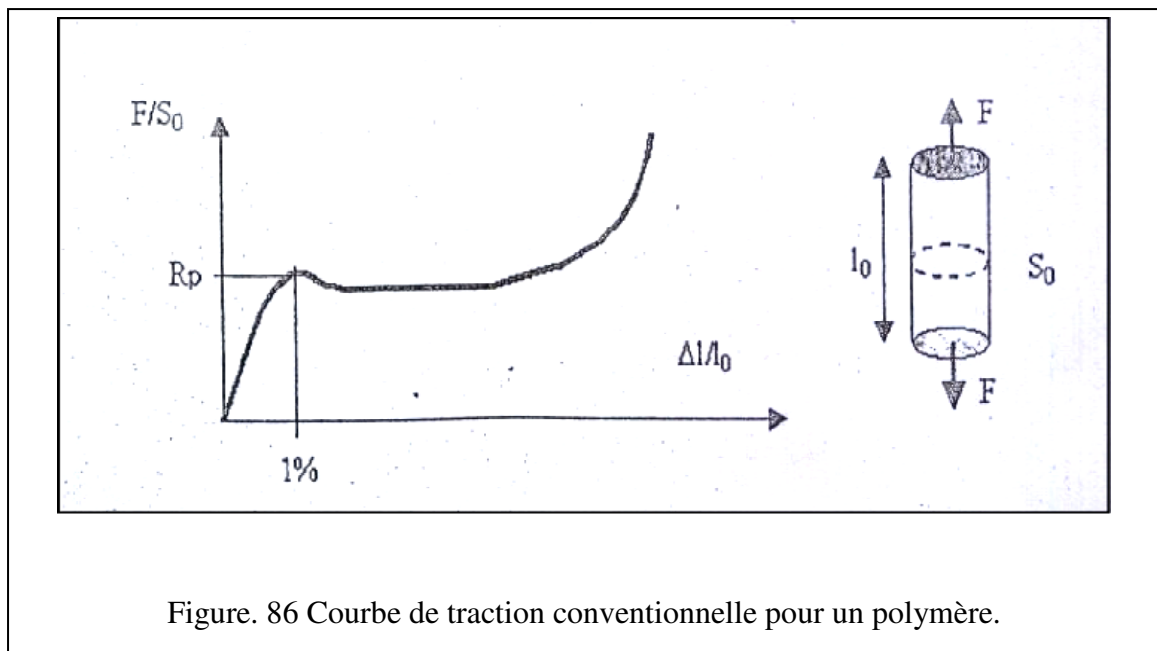
Pour les céramiques

Les céramiques et les verres sont peu résistants en traction et ils sont fragiles: aucune plasticité n'apparaît avant la rupture; la limite d'élasticité et la résistance à la traction sont confondues. Ils se comportent beaucoup mieux en compression. C'est donc cette caractéristique qui sera retenue pour caractériser le comportement de ces matériaux.



Pour les polymères

La limite d'élasticité correspond à la limite d'élasticité apparente, c'est-à-dire la contrainte à laquelle la courbe contrainte-déformation devient clairement non linéaire. Cela correspond typiquement à une déformation de l'ordre de 1%. A l'échelle microscopique, cette limite correspond au glissement irréversible des chaînes moléculaires (microfissuration) et à l'apparition de zones de faible densité qui diffusent la lumière, faisant apparaître le polymère blanc.



Pour les composites

Tout comme les céramiques, ces matériaux présentent un comportement purement élastique. Pour ces matériaux, la limite d'élasticité conventionnelle peut être définie comme étant la contrainte correspondant à un certain taux de déformation, fixé en général à 0.5%.

5.3.1. Modules d'élasticité

Les modules d'élasticité longitudinal E (ou module de Young) et transversal (G) (module de Coulomb) et de compressibilité (K) traduisent la raideur d'un matériau. Cette raideur est principalement liée à la nature des liaisons interatomiques assurant la cohésion du réseau cristallin ainsi qu'à la densité de ces liaisons en rapport avec la nature des liaisons. Ces liaisons ont un comportement élastique. La raideur du matériau est liée à son comportement élastique. Ainsi, les modules les plus élevés sont observés pour les matériaux métalliques caractérisés par des empilements atomiques (à la base de la structure cristalline) extrêmement denses (structure cubique faces centrées CFC ou hexagonale compacte HC) et des liaisons interatomiques covalentes de grande raideur. A l'opposé, les polymères présentent des modules faibles, en rapport avec la raideur des liaisons secondaires liant entre elles les chaînes carbonées. Pour un matériau isotrope, hypothèse retenue pour les alliages métalliques observés à l'échelle macroscopique (échelle de l'ingénieur), module longitudinal, transversal et de compressibilité sont liés entre deux par certaines relations. En ce qui concerne les matériaux métalliques, on a en général

$$G \sim E/8 \text{ et } K \gg E$$

Le module d'élasticité longitudinal correspond en pratique à la pente de la partie linéaire de la courbe conventionnelle de traction (contrainte F/S_0 - allongement relatif $\Delta L/L_0$ obtenue à partir d'un essai de traction uniaxial au cours duquel est enregistré le diagramme de traction classique (force F - allongement $\sim \Delta l$). Cependant, il est nécessaire d'instrumenter l'essai soit avec des jauges de déformations directement collées sur la partie calibrée de l'éprouvette (opération délicate sur éprouvette cylindrique) soit en utilisant un extensomètre, appareil annexe de très grande précision (extensomètre à jauges, extensomètre à visée LASER). L'analyse vibratoire ou l'analyse par ondes ultrasonores constituent d'autres moyens très précis de mesurer ce module.

5.4. La résistance à la traction

Même si cette caractéristique est beaucoup moins utile pour l'ingénieur (il est rare de dimensionner à la rupture statique) il n'est pas inutile de la rappeler ici.

Pour les métaux

Elle ne correspond pas à la contrainte appliquée au moment de la rupture, à partir de laquelle on voit apparaître localement un étranglement de la section. Au niveau de contrainte, la déformation plastique, qui jusque là était répartie uniformément, se concentre dans cette zone d'étranglement appelé zone de striction. Sur la courbe conventionnelle de traction, elle correspond à la valeur maximale de la contrainte conventionnelle F / S_0 .

A l'échelle microscopique, cela correspond à une stabilité plastique lié à un taux d'endommagement très important (densité de dislocation très importantes avec informations d'amas de dislocations pouvant constituer des microcavités). A partir de ce niveau de contrainte, un col de striction apparaît à la vitesse de déformation augmente. La contrainte réelle (effort ramené à la section réellement résistante) augmente considérablement jusqu'à ce que la section résistante soit insuffisante. Il y'a alors rupture fragile.

Pour les céramiques

Le comportement fragile des ces matériaux se traduit par le fait que limite d'élasticité et résistance à la traction sont identiques.

Pour les polymères

Il est rare de parler de cette caractéristique par les polymères. Elle correspondrait alors à la contrainte à rupture.

5.5. La dureté

Pour les métaux

La dureté caractérise la résistance que présente le matériau à la pénétration d'un indenteur sur lequel on exerce un effort. Au cours de l'essai de dureté, l'effort appliqué sur l'indenteur est suffisamment important pour laisser une trace à la surface de l'échantillon de matériau testé. Le rapport de l'effort à la surface de l'empreinte laissée par l'indenteur définit cette dureté. Bien qu'à priori, la dureté ait la dimension d'une contrainte, la norme spécifie des échelles de dureté correspondant aux différentes méthodes employées. Citons pour les principales, l'essai Brinell, l'essai Vickers ou l'essai Rockwell. Chaque technique présente un domaine d'utilisation et sur le domaine commun, il y a naturellement une certaine corrélation entre les valeurs fournies par chacune des méthodes. Il est donc important de bien spécifier l'échelle de dureté utilisée lorsque l'on veut comparer différents matériaux de ce point de vue.

La trace laissée par l'indenteur après décharge provient de la déformation plastique occasionnée par l'état de contrainte local créée par la charge appliquée sur l'indenteur. On comprend donc que la dureté soit extrêmement liée:

- d'une part, à la limite d'élasticité du matériau: la contrainte locale doit conduire à la plastification du matériau;
- d'autre part, à la capacité d'écroutissage du matériau: plus on déforme plastiquement, plus il faut augmenter la contrainte pour pouvoir poursuivre la déformation.

Il n'y a pas de règles simples reliant la dureté et les autres caractéristiques de résistance mécanique. Cependant certaines lois empiriques ont été proposées. On peut citer celle de Tabor qui relie la dureté de Vickers à la contrainte de traction provoquant une déformation totale de 8%; $H_v = 3 \sigma_{0,08}$ ou celle de proposée par l'IRSID pour les matériaux à faible coefficient d'écroutissage reliant la dureté de Brinell et la résistance à la traction: $HB = 3 R_m$.

4.6. La ténacité (résistance en rupture)

La ténacité est une caractéristique mécanique de résistance qui relève de la mécanique de la rupture, c'est-à-dire de la mécanique des pièces initialement fissurées. Elle exprime la résistance du matériau à la propagation d'une fissure. Elle est définie soit par le facteur d'intensité de contrainte critique K_c soit par l'énergie de rupture G_c .

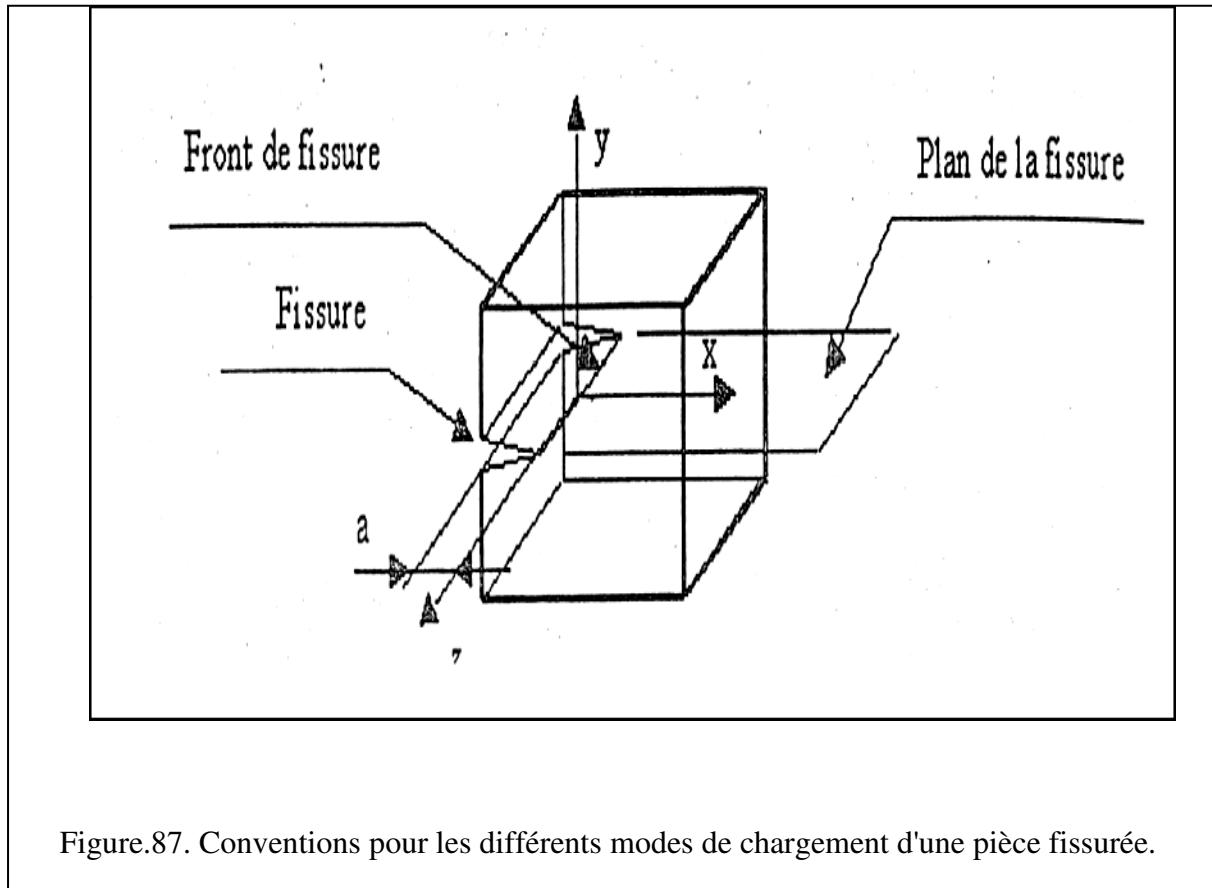
Le chargement d'une pièce fissurée induit une modification du champ de contrainte à fond d'entaille (cela rappelle la notion de concentration de contrainte pour les formes discontinues des pièces mécaniques). On définit alors le facteur d'intensité de contrainte K . Il caractérise l'intensité de la singularité du champ de contrainte à la pointe de la fissure. Ce facteur d'intensité de contrainte dépend:

du mode de sollicitation de la fissure.

Mode 1: en traction-sollicitation normale au plan de la fissure (direction y).

Mode 2: en cisaillement plan-cisaillement suivant x.

Mode 3: en cisaillement anti-plan-cisaillement suivant z. de la géométrie de la fissure et de la pièce.



Si l'on augmente le niveau de chargement, la fissure s'agrandit jusqu'à une taille critique à partir de laquelle elle se propage brutalement entraînant la rupture de la pièce. A cette taille critique correspond une valeur du facteur d'intensité de contrainte notée K_c appelée de ce fait facteur d'intensité de contrainte critique. Ce facteur dépend bien sûr du mode de chargement mais également du matériau. L'unité de cette caractéristique est le $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. la rupture d'une pièce fissurée peut être occasionnée par une augmentation statique du chargement. Elle peut également provenir du fait d'un chargement cyclique dont le niveau maximal n'aurait pas entraîné la rupture si le chargement avait été statique. Il 'agit là d'un phénomène de plastification locaux. La rupture des métaux n'est pas un phénomène simple. Elle dépend du matériau, de la température, du mode de sollicitation (traction, flexion, fatigue,...) et de la vitesse d'application des contraintes.

5.7. Types de ruptures

Différents critères sont utilisés pour différencier les types de rupture, ductile et fragile:

Un critère macroscopique ou mécanique: présence ou absence de déformation plastique avant la rupture; voir par exemple la figure 88 pour le cas de l'essai de traction.

Un critère microscopique, fondé sur l'observation du faciès de rupture, et qui peut dépendre de l'échelle à laquelle est observé la cassure.

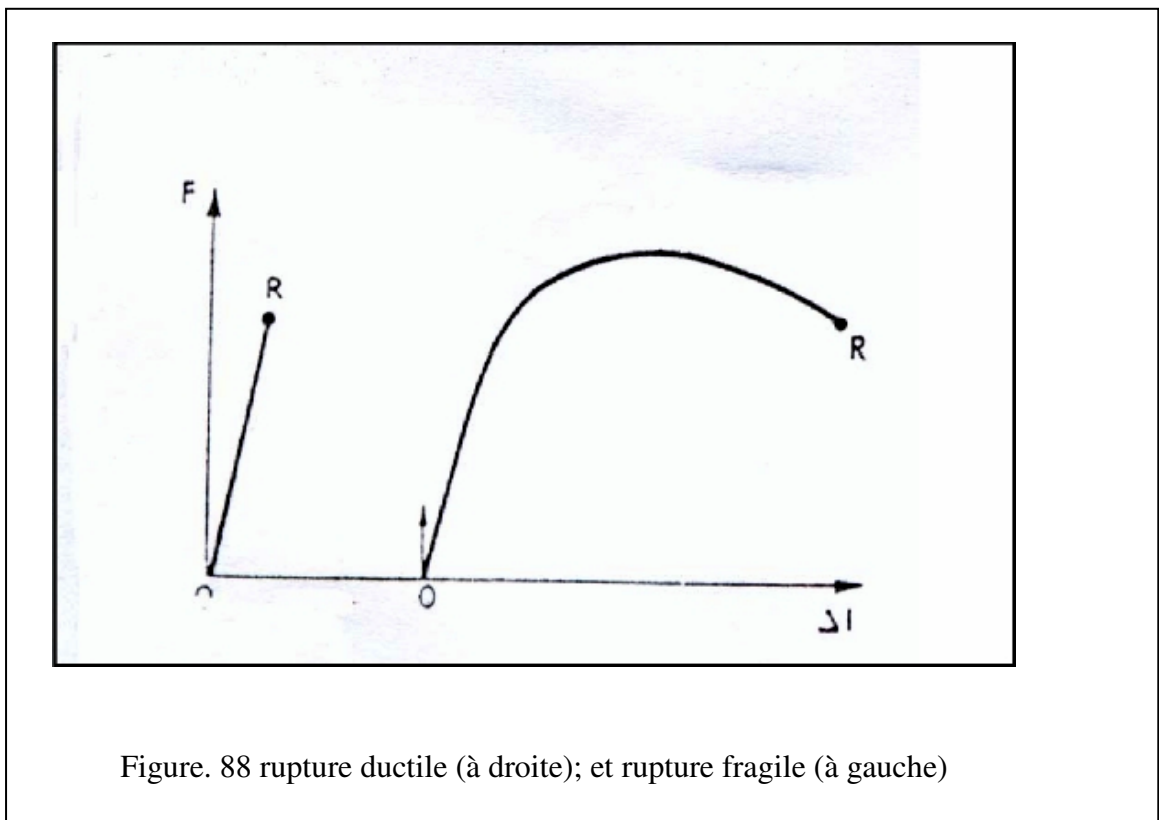


Figure. 88 rupture ductile (à droite); et rupture fragile (à gauche)

Aussi un faciès microfractographique ductile peut-il se rencontrer en général après une rupture ductile, mais aussi après des ruptures fragiles au sens de la mécanique de la rupture (par exemple alliages CFC à haute résistance). Inversement, il est possible d'observer des clivages sur des ruptures ductiles, c'est-à-dire précédées d'un allongement macroscopique appréciable.

Faciès fractographique

La rupture fragile peut correspondre soit à une décohésion intergranulaire (fragilité intergranulaire à froid de certains alliages), soit à une rupture des grains suivant des plans cristallo-graphique simples: c'est le clivage, la surface de rupture présente un aspect caractéristique de petites facettes (une par grain) qui réfléchissent la lumière, d'où le nom faciès à "grains" ou "cristallin".

Au contraire, une surface de rupture ductile présente généralement un aspect grisâtre et granuleux, dit "à nerf", dû à la forte irrégularité du profil à l'échelle microscopique. Sur des éprouvettes de traction, on observe la rupture en coupelle, qui se forme dans la zone de striction par déchirure interne perpendiculairement à l'axe de traction et s'achève par cisaillement oblique

dans les parties marginales. A température élevée, on peut aussi observer une rupture en pointe, sans surface de rupture proprement dite, par suite de striction complète. L'examen oculaire des surfaces de rupture peut être assez trompeur. Souvent il y a mélange de faciès de rupture ductile et fragile et le microscope électronique à transmission, par la technique des répliques, et le microscope électronique à balayage permettent un examen sérieux des cassures (microfractographie électronique (fig. 89). c'est cet examen qui permet de décider du caractère réellement fragile (fig. 90) ou (fig. 91) de la rupture, plutôt que le critère de la déformation plastique préalable. La rupture fragile en ce sens peut donc se produire après une certaine déformation plastique. Elle peut coexister dans un même échantillon avec des zones de rupture ductile.

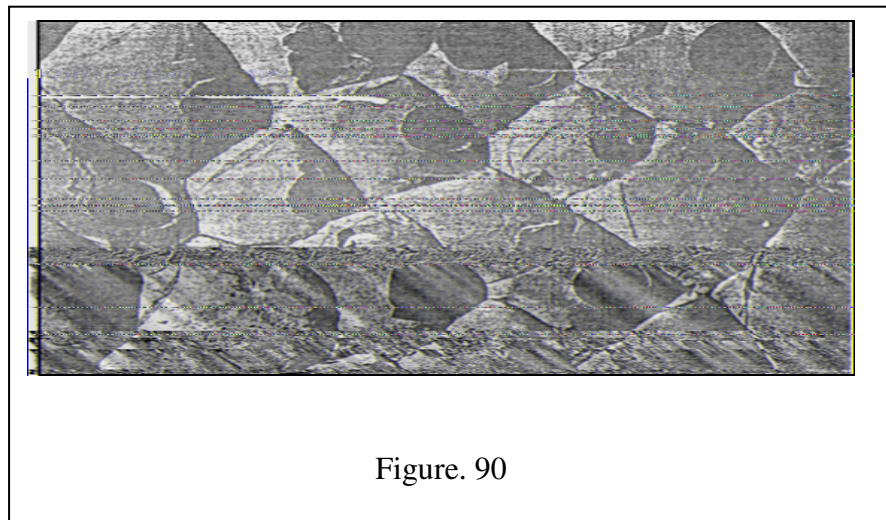
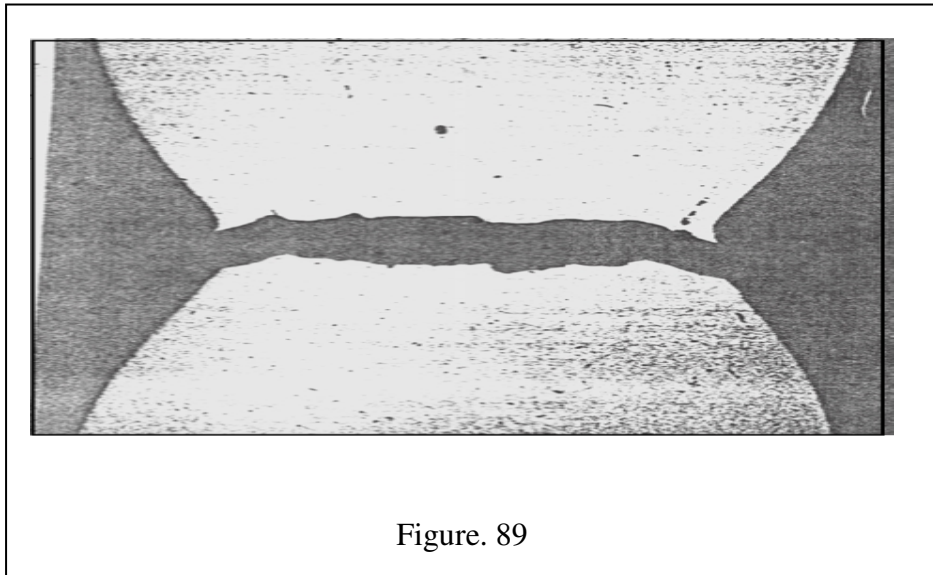




Figure. 91

5.7.1. Rupture ductile.

a) Métaux industriels.

- Dans les métaux industriels la surface d'une rupture se présente, quel que soit le côté de la cassure examiné, comme une juxtaposition de "cupules" au fond desquelles on observe souvent un précipité ou une inclusion. La rupture peut alors s'expliquer par la succession de trois stades (fig. 92).

- formation de fissures à l'interface des particules présentes dans le métal, car si celles-ci sont plus dures que la matrice, elles ne se déforment pas;

- croissance à partir de ces fissures de trous qui s'allongent dans le sens de la déformation;

- rupture des pédoncules de métal séparant les trous par striction complète ou par cisaillement.

C'est ce mécanisme qui joue dans la rupture en coupelle dont nous avons parlé plus haut. En fait le faciès en cupules, observé par micrographie électronique, est le faciès typique de la rupture ductile. La ductilité du métal, mesurée par exemple par la striction, dépend donc de la fraction en volume des particules. On a montré au moyen d'alliages synthétiques contenant de fines dispersions d'inclusion, que la ductilité varie à peu comme l'inverse de cette fraction.

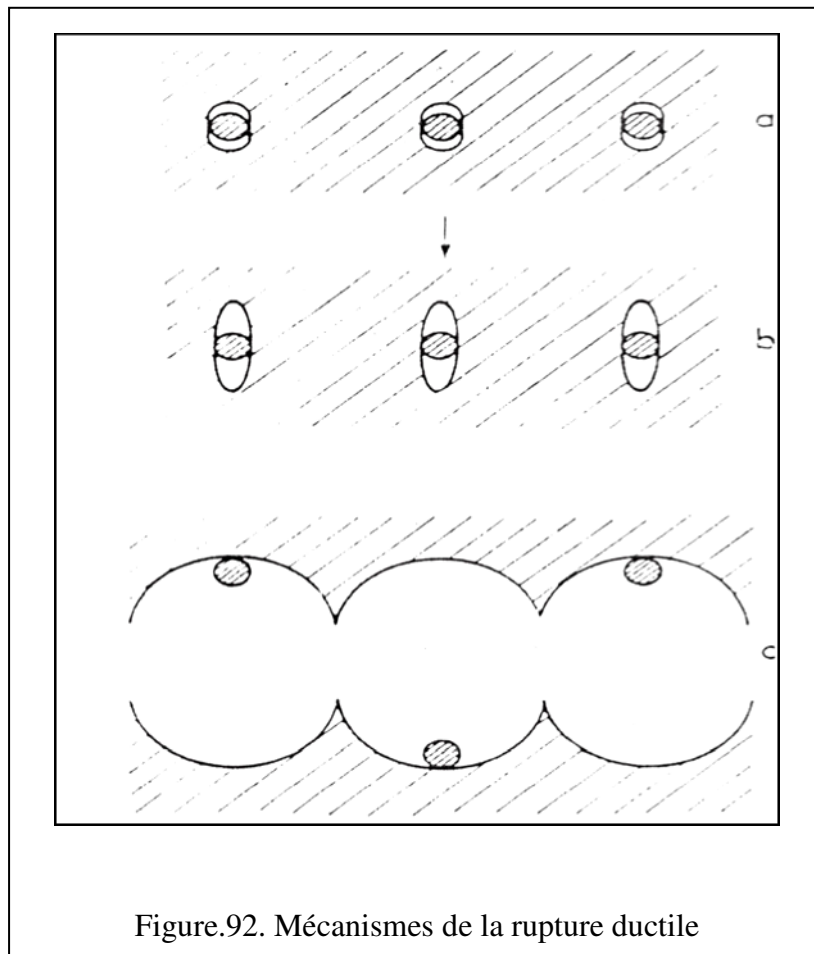


Figure.92. Mécanismes de la rupture ductile

b) Monocristaux.

Le mécanisme précédent n'agit généralement pas dans les monocristaux du fait de leur pureté. Dans les cristaux CC ou CFC, l'existence de plusieurs systèmes de glissement rend possible la striction, et l'éprouvette se rompt par striction complète (rupture en pointe ou en ciseau).

Dans les monocristaux HC ceci n'est pas possible si le glissement basal est seul actif. La rupture peut se produire alors par cisaillement complet de l'échantillon suivant un plan de glissement.

5.7.2 Rupture fragile par clivage.

Les métaux CC, contrairement aux CFC, sont sensibles à la rupture fragile. Il doit donc s'agir d'une propriété intrinsèque de cette structure. En fait, d'une manière générale, les métaux CC sont fragiles à basse température, et il existe une zone de température vers $0.27T_F$ où se fait

la transition d'un mode de rupture à l'autre. On la caractérise par une "température de transition" fondée plus ou moins arbitrairement sur la mesure d'une propriété mécanique (allongement de rupture, striction, résilience, etc.) ou sur le faciès de la cassure. Cette propriété des métaux CC a une importance technologique considérable, tout spécialement dans le cas des aciers où la température de transition peut se situer en voisinage de l'ambiante. Elle se trouve très sensible à la composition, aux traitements thermiques et à la vitesse de sollicitation (fig.93) Le risque de rupture fragile est particulièrement lié à la température. Aux défauts et aux concentrations locales de contrainte. Les essais classiques de rupture fragile sont effectués à vitesse de sollicitation élevée et sur des éprouvettes entaillées de manière à relever la température de transition

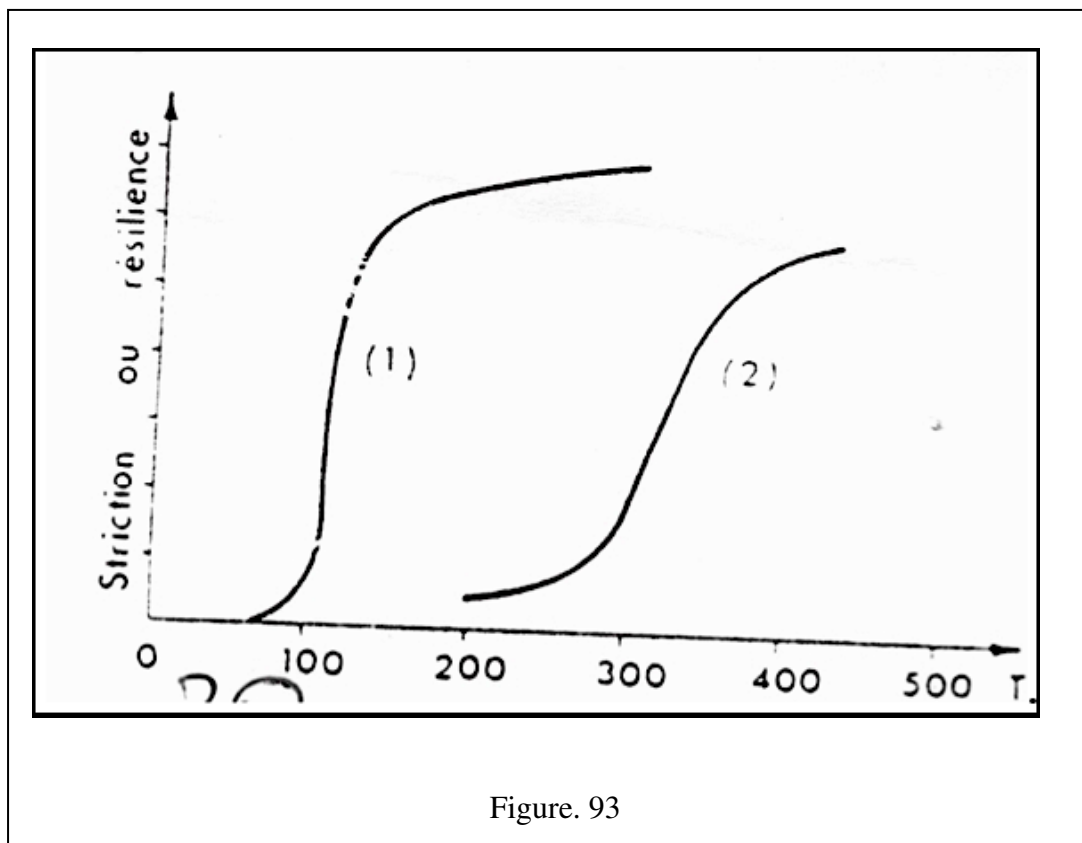


Figure. 93

Dans les cristaux HC à basse température, la rupture se produit également par clivage. Le zinc peut être clivé dès la température ambiante, plus ou moins facilement suivant son orientation, mais à -195°C sa rupture procède toujours par clivage. Le clivage se produit suivant des plans cristallographiques simples: (001) dans les métaux CC, (0001) dans le zinc.

Il est facile de calculer théoriquement la contrainte de traction critique σ_R pour produire la décohésion suivant le plan de clivage. En effet, la rupture fait apparaître deux surfaces libres et:

$$\sigma_R = (2E\gamma/a)^{1/2}$$

Où γ est énergie superficielle, E le module d'Young, a le paramètre. Avec $E=100$ GPa $\gamma=1$ J/m², $a=3$ Å, on trouve $\sigma_R \sim 10$ GPa. Or, la contrainte normale de décohésion par clivage dans les monocristaux est de quelques dizaines ou centaines de MPa (Fe(x) à -185°C, $\sigma_R=280$ MPa). On se retrouve devant une difficulté qui rappelle le problème de la limite d'élasticité théorique: un processus de propagation des fissures à partir de certains défauts, les microfissures présentes initialement ou formées au cours de la déformation. C'est le problème de la rupture fragile. Au sens microscopique du terme.

5.8. La résistance en fatigue

La résistance en fatigue d'un matériau traduit sa capacité à subir un cycle de chargement régulier ou aléatoire. Si l'on fait subir à une pièce mécanique un chargement non constant dans le temps dont le niveau maximal ne dépasse pas la résistance à la traction du matériau, on peut observer la rupture de la pièce au d'un nombre plus ou moins grand de cycles.

Pour les métaux

Ce comportement est lié aux déplacements des dislocations dans quelques grains, surtout, situés en surface de la pièce car c'est en surface que l'on observe les niveaux maxima des contraintes (chargement à gradient de contrainte, type flexion, et/ou zone de concentration de contrainte). Ces grains sont en fait favorablement orientés par rapport au chargement pour que l'état de contrainte qui y règne entraîne la plastification du grain. Le chargement changeant sans cesse de direction, ces mouvements de dislocations finissent par déboucher en surface et créent des microfissurations qui finiront par coalescer pour donner naissance à une macrofissure (sur plusieurs grains) qui se propagera jusqu'à atteindre une taille critique entraînant la rupture brutale de la pièce. Les principaux paramètres influant sur ce comportement sont la contrainte moyenne (moyenne des contraintes appliquées au cours du cycle) et la contrainte alternée (demi amplitude du cycle de contrainte).

Lorsqu'un métal est soumis à des sollicitations mécaniques qui varient avec le temps, la rupture peut se produire pour des valeurs de la contrainte maximale bien inférieures à la résistance à la rupture ou même à la limite d'élasticité du matériau: c'est la rupture en fatigue. En pratique il

s'agit de sollicitations périodiques à fréquence élevée (moteurs, véhicules) ou faibles (cellules d'avion, constructions métalliques soumises au vent...). On appelle fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés des matériaux constrictive à l'application de cycles de contrainte répétés et endurance la capacité de résistance à la fatigue.

5.8.1 Aspects macroscopiques

Les essais de fatigue se traduisent par la courbe de Wohler qui représente pour chaque valeur de la contrainte maximale appliquée le nombre de cycles à rupture. La courbe de Wohler permet de distinguer trois domaines:

1.- fatigue plastique oligocyclique

Sous forte contraintes supérieures à la limite d'élasticité macroscopique. Le nombre de cycles à rupture N_R (entre 1 et 10^5) est relié à la déformation plastique élémentaire $\Delta \epsilon_P$ accompagnant chaque cycle par la loi de Coffin:

$$N_R^{1/2} \cdot \Delta \epsilon_P = cte.$$

2.- fatigue ou endurance limitée

la rupture apparaît après un nombre limité de cycles, $\sim 10^5$ à 10^7 . Le nombre de cycles à rupture N_R croît lorsque l'amplitude de la contrainte périodique décroît:

$$N_R (\sigma - \sigma_D)^n \sim cte,$$

σ_D est la limite d'endurance.

3.- endurance limitée ou zone de sécurité, sous faible contrainte

La rupture ne se produit pas avant un nombre donné de cycles, 10^7 ou plus; les microfissures ne peuvent pas se former, ou encore ne peuvent pas atteindre un stade de développement critique. Pour certains métaux comme l'aluminium le passage entre les domaines de fatigue et de sécurité est très progressif, parfois il n'apparaît pas de limite d'endurance asymptotique. Pour les aciers ferritiques, la courbe présente un coude accentué qui permet la détermination d'une limite d'endurance.

Les courbes de Wohler sont en outre sensibles à la valeur de la contrainte moyenne appliquée, à la fréquence et à la nature de la sollicitation, à l'état de surface, au milieu ambiant (durée de vie beaucoup plus élevée sous vide qu'à l'air) et à la température.

5.8.2. Durée de vie et évolution structurale Au cours de la durée de vie d'une éprouvette on peut distinguer plusieurs stades: 1/ l'accommodation au cours duquel la microstructure évolue; 2/ l'endommagement qui recouvre des stades d'amorçage, puis de propagation de fissures; 3/ la rupture finale. L'importance de ces divers processus dépend évidemment du niveau de contrainte ou de déformation imposée. C'est ainsi que le nombre de cycles passés au stade d'amorçage est d'autant plus grand, que le nombre de cycles à rupture est lui-même plus grand.

a) accommodatio: Ce stade correspond au petit nombre de cycles. Il revêt une importance particulière, et se prête bien à l'étude, dans les cas de la fatigue plastique ou oligocyclique: il correspond à la partie la plus à gauche de la courbe de Wblher. En fatigue plastique, le matériau est soumis à une déformation plastique alternée \pm répétée; on observe des cycles d'hystérésis successifs c_r, c , au cours desquels la contrainte évolue (accommodation) avant de stabiliser au bout de quelques milliers de cycles: on atteint un état de régime où les cycles se superposent. Pour chaque valeur de la déformation c , ou mieux de la déformation plastique s_P , on obtient une contrainte de régime ou de saturation a_S . Le lien des points a_S, s_P définit une courbe de durcissement par écrouissage cyclique. Dans les polycristaux elle peut être représentée par une loi parabolique, comme la courbe de "durcissement monotone" (obtenue en traction simple). Par rapport à cette dernière, on observe suivant les matériaux, un durcissement ou un adoucissement. Dans les monocristaux, la courbe d'écrouissage cyclique présente un palier à partir d'une certaine déformation seuil: au dessous de celle-ci les dislocations réarrangent en écheveaux ou veines. Au début du palier apparaissent des bandes de déformation localisées, parallèles au plan de glissement, appelées "bandes persistantes" où la déformation est très élevée (10^{-5} à 10), alors qu'elle est cent fois plus faible dans le reste du métal (fig. 94). Si l'on accroît la déformation imposée, les bandes persistantes occupent progressivement toute l'éprouvette, s'agit de sollicitations périodiques à fréquence élevée (moteurs, véhicules) ou faibles (cellules d'avion, constructions métalliques soumises au vent...). On appelle fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés des matériaux constrictive à l'application de cycles de contrainte répétés et endurance la capacité de résistance à la fatigue.

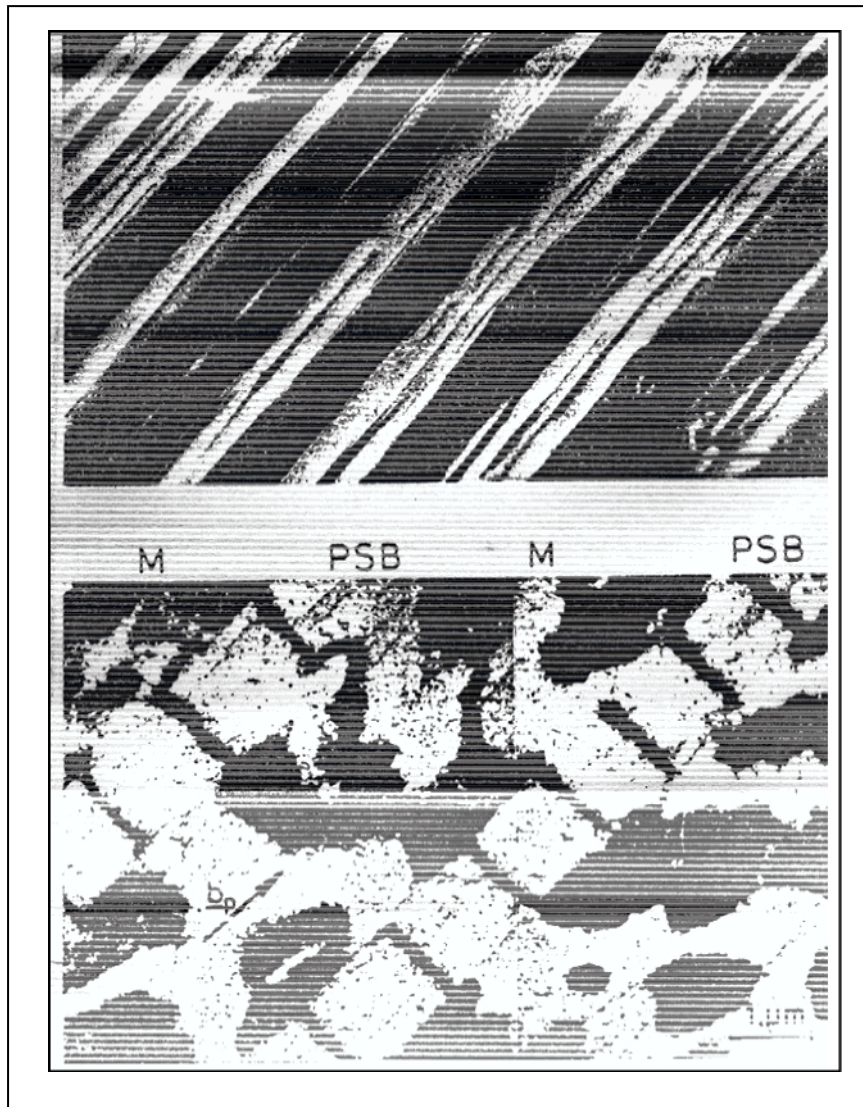


Figure. 94 Bandes de glissement persistantes dans un monocristal de cuivre soumis à une déformation plastique oligocyclique égale à $\pm 1.5.10^{-3}$. En haut, relief superficiel observé par microscopie électronique à balayage. En bas, micrographie électronique en transmission : M matrice écrouie, P.S.B bande de glissement persistante (le plan de glissement est perpendiculaire au plan de la micrographie). D'après H.Mughrabi (Max Planck Institut).

Ces bandes présentent une microstructure en canaux allongés dans le plan de glissement, séparés par des murs de dislocations, visibles par la tranche sur la micrographie de la figure 34. Les bandes persistantes sont très visibles dans les métaux CFC, où elles sont favorisées par une forte valeur de l'énergie de défaut d'empilement (facilité du glissement dévié). Elles sont plus diffuses dans les alliages CC. Dans les alliages, le cisaillement des précipités par les dislocations

favorise la formation des bandes persistantes. Dans les polycristaux, la fatigue oligocyclique produit une microstructure en cellules (diamètre $\sim 2e \mu\text{m}$), aux parois d'autant plus fines que la déformation est plus élevée, et d'autant mieux définies que l'énergie de défaut d'empilement est plus forte.

b) Amorçage et propagation des fissures

La figure 95 montre des courbes de propagation d'une fissure pour diverses valeurs de la contrainte et fait apparaître la limite d'endurance a_1 telle que la fissure ne se propage pas. Les observations macroscopiques et microscopiques permettent de distinguer 3 stades (diagramme de Forsyth, fig. 96).

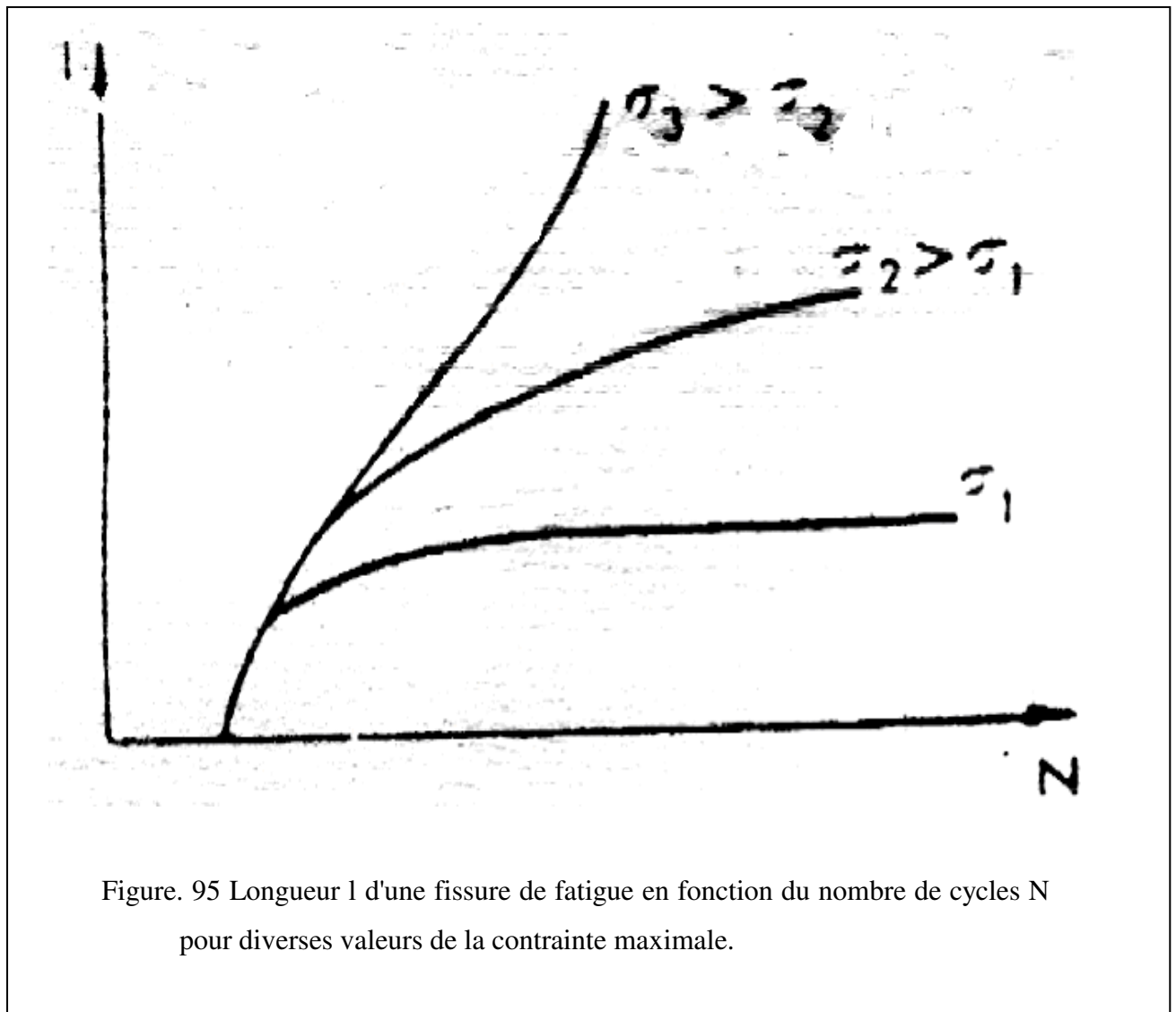


Figure. 95 Longueur l d'une fissure de fatigue en fonction du nombre de cycles N pour diverses valeurs de la contrainte maximale.

Amorçage:

Une déformation plastique localisée est nécessaire pour amorcer une microfissure. Elle se produit en des points où existe une concentration de contrainte, par suite des irrégularités de surface, des inclusions, des jonctions de plusieurs joints de grains. Cet effet peut être exalté en surface par des facteurs macroscopiques tels que les rayures, les entailles, les filets, les raccordements sans congé. Localement on se trouve en présence de fatigue plastique. Pour comprendre le mécanisme d'amorçage, on s'adresse donc aux examens de matériaux de monoou polycristallins, déformés en sollicitation oligocyclique. Le va et vient des dislocations dans les bandes persistantes produit des défauts ponctuels, d'où un accroissement de volume et parfois la formation de pores, et des irrégularités de surface, sous forme d'extrusions et d'intrusions. Les intrusions servent d'amorcer de microfissures qui se développent par décohéssion en cisaillement. Tous les facteurs métallurgiques qui favorisent des bandes de glissement localisées réduisent la durée du stade d'amorçage. Les microfissures peuvent ainsi être amorcées aux inclusions et aux jonctions de plusieurs joints de grains.

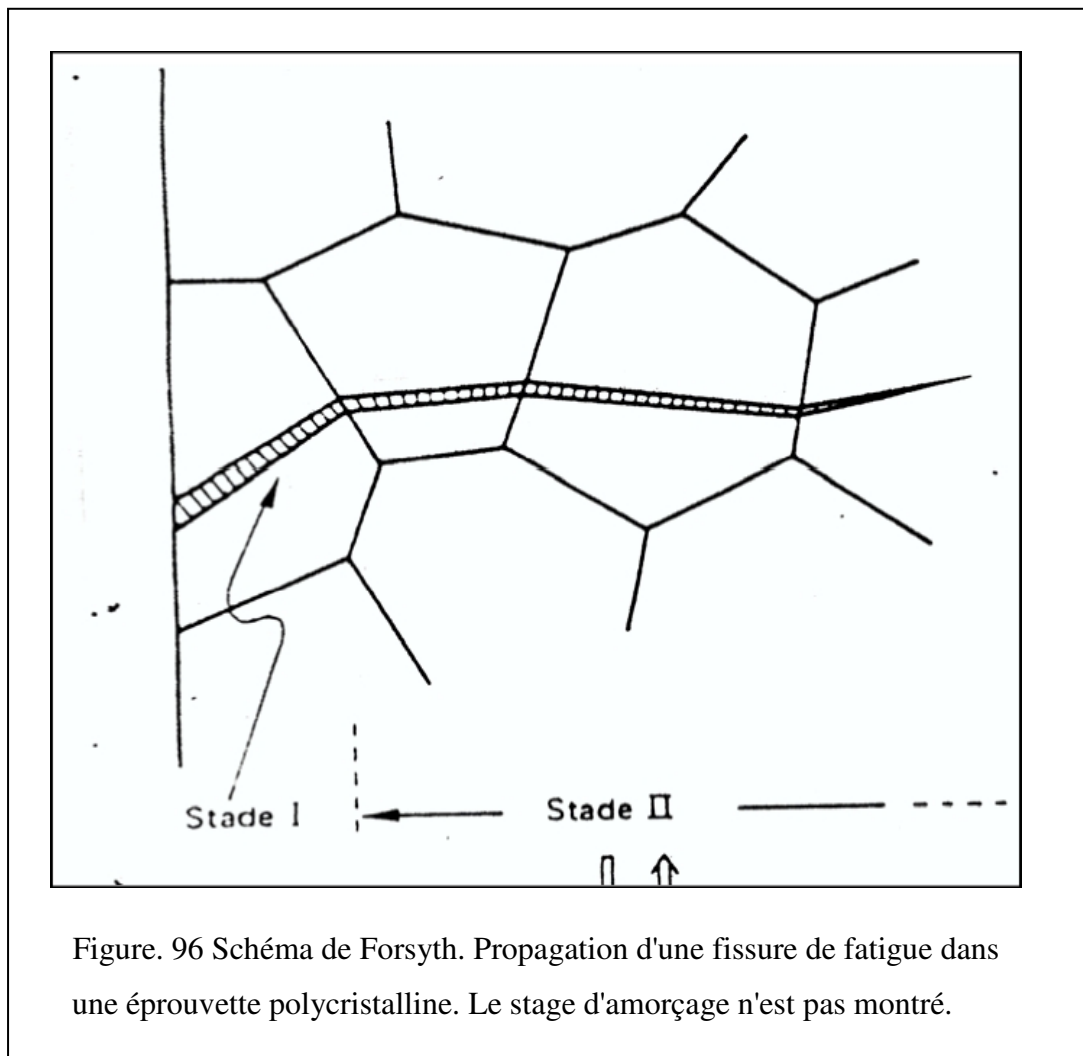
Stade I de la propagation

Les microfissures formées par les divers mécanismes évoqués au paragraphe précédent, progressent en restant dans le plan de glissement initial où elles sont apparues, et en s'étendant au plus dans quelques grains à vitesse lente (quelques A par cycle). La déformation en tête de fissure, et la vitesse de propagation, dépendent étroitement de l'aptitude au glissement dévié (formation de cellules ou structures planaires). Dans les matériaux techniques le stade I peut ne pas apparaître, car la présence d'entailles, d'inclusions qui se fissurent...conduit tout de suite au stade II

Stade II de propagation

La fissure progresse dans le plan où la contrainte normale est maximale, donc suivant une section droite pour une sollicitation uniaxiale. La fissure est transcristalline et conserve une direction générale avec des ramifications et des changements de directions locaux. La déformation accompagnant chaque cycle se localise à l'extrémité de la fissure, par suite de concentration de contrainte. La fissure progresse à travers une zone déformée qui la précède et qui possède une structure double: une zone centrale qui subit un écrouissage cyclique, une zone périphérique (jusqu'à - 1mm) dans laquelle la déformation, monotone et faible, se produit à

l'ouverture de la fissure. La microscopie électronique a confirmé l'existence de cette double zone plastifiée.



Le mécanisme de progression est schématisé sur la figure 97. L'extrémité de la fissure s'ouvre durant l'augmentation de la charge, et se referme partiellement par déformation plastique durant la décharge. Ce processus donne souvent lieu à un faciès strié de la cassure, observable en microscopie électronique (fig. 98) chaque strie correspondant à un cycle. Le milieu ambiant joue un rôle important (notamment par oxydation des surfaces faiblement ouvertes: absence de stries sous vide).

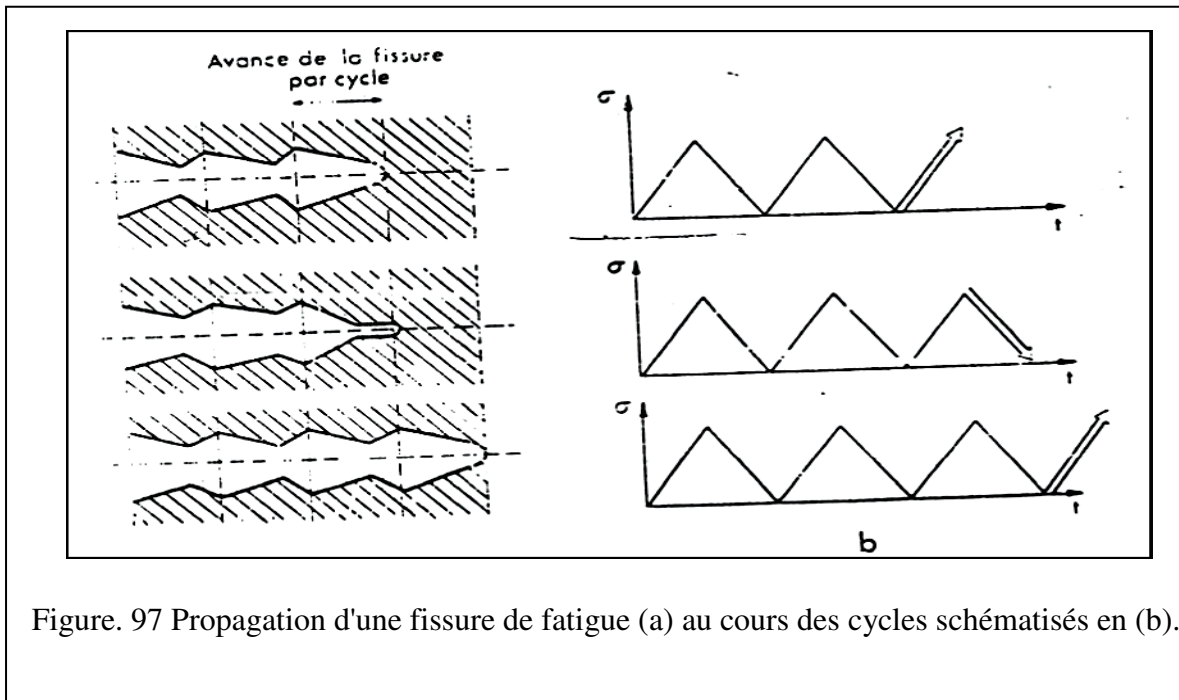


Figure. 97 Propagation d'une fissure de fatigue (a) au cours des cycles schématisés en (b).

La mécanique de la rupture s'applique à ce stade: elle permet de prévoir le rayon de la zone plastifiée cyclique r_c et de la vitesse de fissuration:

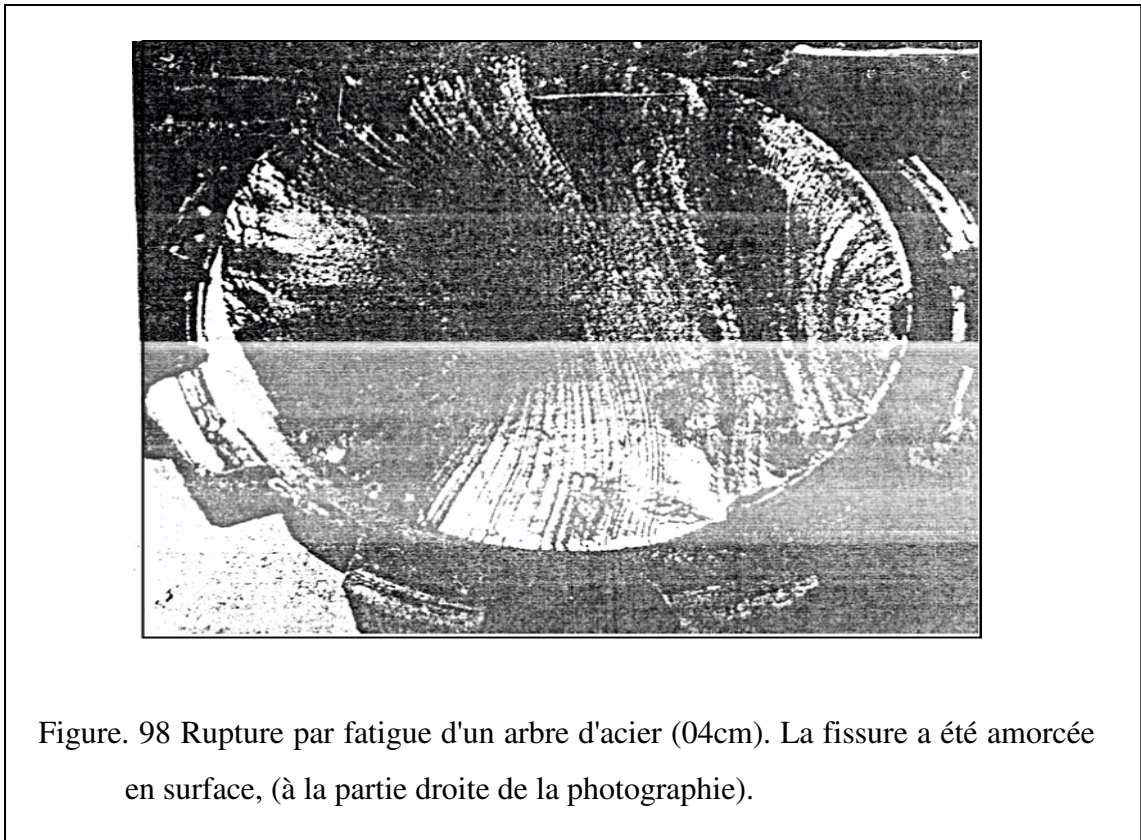


Figure. 98 Rupture par fatigue d'un arbre d'acier (04cm). La fissure a été amorcée en surface, (à la partie droite de la photographie).

Où AK est la variation du facteur d'intensité de contrainte correspondant aux contraintes appliquées maximales et minimales, R_e la limite d'élasticité, c la longueur de fissure. La loi de paris est généralement bien suivie, à partir d'un certain seuil; dans les aciers m-4.

c) rupture finale

Lorsque la fissure atteint une dimension telle que $K = K_c$.

La rupture brutale de la pièce intervient. Les deux parties de la cassure, correspondant au stade II et à la rupture brutale se distinguent bien à l'œil.

Remarque: le diagramme classique de Wbher peut être complété par des courbes correspondant à des contraintes seuils pour l'amorçage, le stade I ou la stade II- ce qui permet de faire la jonction avec le processus de fatigue plastique qui se produisent en tête de fissure.

4.9. La résistance au fluage

Le fluage est un phénomène observé lorsque l'on emploie les matériaux au dessus d'une certaine température. Pour les métaux, ce phénomène est sensible à partir du 1/3 de la température absolue de fusion. Pour les polymères, il peut être observé à température ambiante (les 2/3 de la température de transition vitreuse T_g). Il se traduit par la déformation lente et irréversible (déformation visco-plastique) du matériau lorsque celui-ci est soumis à une contrainte. La figure 99 ci-dessous représente l'allure typique d'une courbe de fluage classique.

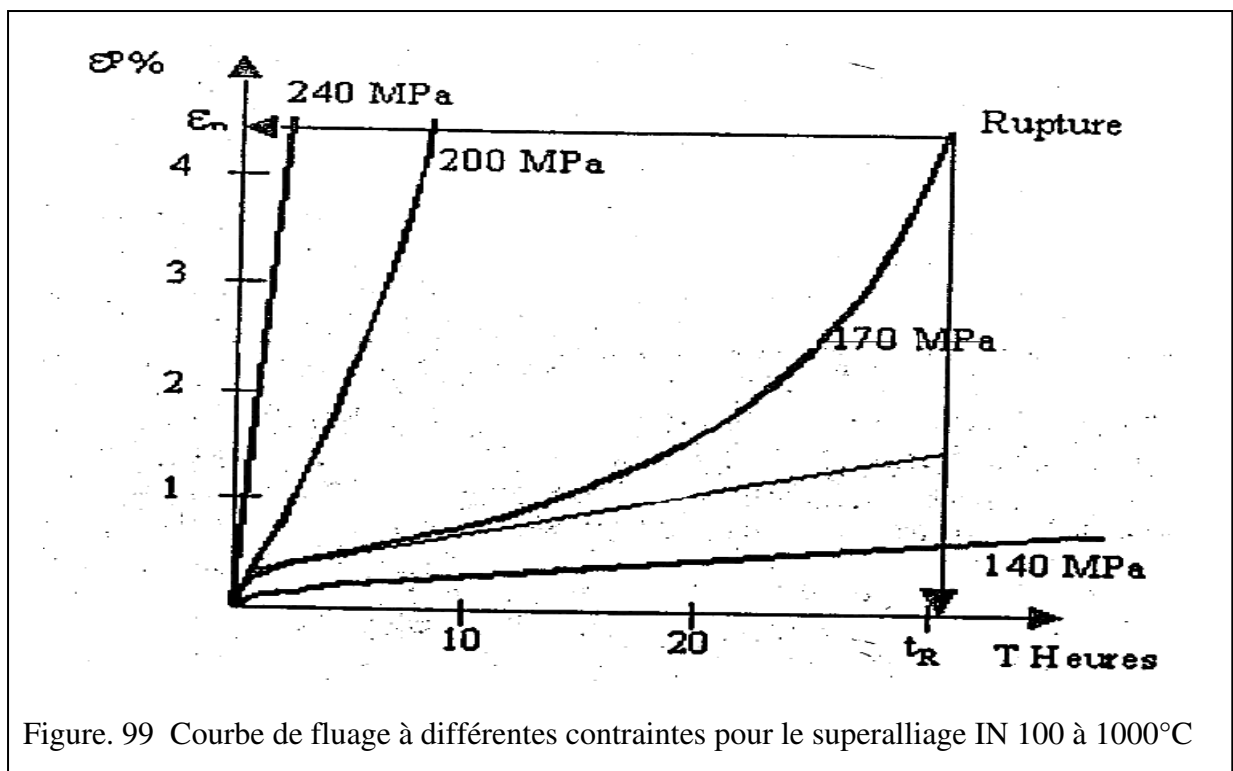


Figure. 99 Courbe de fluage à différentes contraintes pour le superalliage IN 100 à 1000°C

Ces courbes mettent en évidence trois phases:

- une phase de fluage primaire au cours de laquelle l'écoulement du matériau engendre une diminution de la vitesse de fluage initialement très grande; cette phase est assez bien représentée par la loi d'Andrade: $\dot{\epsilon} = A t^{-q}$ ou A et q sont des paramètres du matériau fonction de la température;
- une phase de fluage secondaire caractérisée par une vitesse de fluage constante fonction de la contrainte qu'exprime la loi de Norton:

$$\dot{\epsilon} = (\sigma / \lambda)^N$$

Où λ et N sont d'autres paramètres du matériau qui dépendent de la température;

- une phase de fluage tertiaire caractérisée par une augmentation régulière de la vitesse de fluage et conduisant à la rupture (R) .

4.10. Résistance à l'usure

En technologie, on différencie entre l'usure morale et l'usure physique. On caractérise les machines, appareils, équipements, etc., comme usure morale, si elles sont posées extérieurement des ateliers de fabrication, elles peuvent être encore fonctionnelles à cause

- Du développement technique, et par suite, elles seront remplacées.
- De manque de productivité.
- Par manque de maintenance technique

L'usure physique dans le sens technique, est définie comme un processus caractérisé par une attaque mécanique, en première ligne par un frottement conduisant à une perte progressive de matière en surface d'un corps solide par séparation de petites particules, donc c'est un changement de forme non voulue de la surface. L'usure peut avoir lieu dans un mouvement relatif entre un objet et son milieu gazeux liquide ou solide. Le plus souvent l'usure est accompagnée par des phénomènes de corrosion où ces derniers ne sont pas clairs à séparer de l'usure. Même les connaissances et résultats obtenus pour les phénomènes d'usure n'ont pas une validité générale pour simplifier le danger de ce phénomène.

Les pertes occasionnées par l'usure dans l'industrie mondiale s'élèvent annuellement à plusieurs millions de tonnes de métaux. A cause de l'usure, beaucoup de machines et équipements sont remplacés, le plus souvent, avec d'énormes dépenses. Par exemple, aux Etats Unis, on estime ces pertes à 2,3 kg d'acier pour chaque tonne de minerais traitée. Il n'est pas

possible d'indiquer par l'intermédiaire d'une certaine valeur caractéristique la tenue à l'usure d'un métal vis-à-vis des différentes contraintes ou sollicitations d'usure. L'utilisation économique d'un métal est défini seulement par les différents essais d'usure et pour des sollicitations bien déterminées.

Une analyse du processus indique que la tenue à l'usure ou le phénomène d'usure sont influencés par

- Les métaux accouplés.
- La rugosité des couches limites (surface, lubrification).
- Le type de mouvement (glissement, roulement, écoulement, chocs, etc.). - La vitesse du mouvement.
- L'enlèvement des particules solides.

6. DESIGNATION NORMALISEE DES ACIERS ET DES FONTES

6.1. Désignation des aciers

Les aciers sont classés en deux groupes :

- Aciers non alliés (aciers ordinaires et aciers spéciaux, ...).
- Aciers alliés (faiblement et fortement alliés)..

Le tableau ci-dessous donne un aperçu sur le pourcentage des éléments d'alliages dans les aciers alliés et non alliés.

% des éléments d'addition	Acier non allié	Acier faiblement allié	Acier fortement allié
Al	< 0,3		> 0,3
B			> 0
Co	< 0,2	0,2 à 0,3	> 0,3
Cr	< 0,3	0,3 à 0,5	> 0,5
Cu	< 0,4		> 0,4
Mn + Si	< 1,5	1,5 à 3	> 3
Mo	< 0,05	0,05 à 0,1	> 0,1
Ni	< 0,3	0,3 à 0,5	> 0,5
Pb	< 0,4		> 0,4
V	< 0,05	0,05 à 0,1	> 0,1
W	< 0,2	0,2 à 0,3	> 0,3

6.1.1. Désignation des aciers ordinaires sans traitement thermique

Les aciers ordinaires correspondent à des produits de grande consommation. Ils sont obtenus dans les convertisseurs, fours martin. Ce sont des aciers qui n'ont pas fait l'objet d'une addition volontaire d'éléments d'alliage et qui ne doivent pas dépasser la valeurs limites comme le montre le tableau ci-dessous.

Eléments	P+S	Si+Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Co	Al	Ti	Cu	Pb
%	0,20	2	0,5	0,25	0,10	0,05	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,10

Deux solutions se présentent pour les désigner :

a. La lettre A : est utilisée pour les aciers de constructions mécaniques.

Cette nuance est indiquée par la lettre A suivie d'un nombre correspondant à la limite minimale de résistance à la rupture par traction R_m exprimée en daN/mm^2 , éventuellement suivie des chiffres 1, 2, 3 ou 4 (indice de qualité des propriétés mécaniques).

Le chiffre 4 indique la plasticité la plus élevée. On utilise ces chiffres car deux aciers ayant la même charge de rupture peuvent avoir des plasticités différents.

Exemple : A 60 – 3

A : Acier ordinaire.

60 : Résistance minimale à la rupture à la traction 60 daN/mm^2 .

3 : Indice de qualité.

Leur désignation peut être aussi des indices d'utilisation comme :

S : soudable

M : moulable

L'indice de qualité est défini selon l'expression suivante :

$$N = 2,5 A + R$$

N : nombre définissant l'indice de qualité.

A : allongement en %.

R : résistance en hbar.

Qualité	1	2	3	4
$N \geq$	96	108	114	118

Exemple de nuances normalisées : A33, A34 , A50, A52, A60, etc.

b. La lettre E : est utilisée pour désigner les aciers destinés à la construction métallique.

Cette nuance est désignée par la lettre E suivie d'un nombre correspondant à la limite d'élasticité minimale à la traction et éventuellement suivie d'un chiffre 1, 2 3 ou 4.

Exemple : E 24 – 2

E : Acier ordinaire.

24 : limite d'élasticité minimale de 24 daN/mm².

2 : Indice de qualité.

La catégorie de certains aciers retenus par la norme AFNOR sont :

E 24 – 1 E 26 – 2 E 36 – 2

E 24 – 2 E 26 – 3 E 36 – 3

E 24 – 3 E 30 – 3

Pour distinguer la pureté chimique en soufre et en phosphore des aciers, leur désignation peut être éventuellement suivie d'une lettre minuscule indiquant la pureté en P et S comme indiqué sur le tableau ci-dessous.

Symbole	a	b	c	d	e	f	g	h	k	m
P + S	0,140	0,120	0,100	0,090	0,070	0,065	0,060	0,055	0,045	0,035

6.1.2. Désignation des aciers pour traitements thermiques

Cette catégorie d'aciers est apte aux traitements thermiques la teneur en carbone et en impuretés est contrôlée, on distingue deux nuances :

a. Les aciers courants :

Ils sont désignés par les lettres CC suivis d'un nombre qui désigne la teneur moyenne du carbone en centième pour cent (100 fois la teneur en carbone).

Exemple : CC 35

CC : Acier ordinaire pour traitement thermique.

35 : contenant 0,35 % de carbone.

Exemple de nuances normalisées : CC 10, CC 20, CC 30, CC 35, CC 55, etc.

b. Les aciers fins :

Ces aciers sont employés lorsque les caractéristiques mécaniques exigées sont sévères et nécessitent des transformations de structure par traitement thermique, leur élaboration s'effectue dans le four Martin.

Leur désignation commence par les lettres XC suivis d'un nombre indiquant la teneur en carbone en centième pour cent. Dans cette catégorie d'aciers, les écarts tolérés pour le carbone et les impuretés sont réduits, ces aciers présentent plus de garantie que les aciers courants vis à vis de la teneur en carbone et en impureté.

Exemple : XC 85

XC : Acier ordinaire pour traitement thermique.

85 : contenant 0,85 % de carbone.

Leur désignation peut être aussi suivie d'une lettre minuscule indiquant l'indice de pureté comme :

a : pureté minimale.

d : pureté moyenne.

m : pureté maximale.

Exemple de nuances normalisées : XC 10, XC 12, XC 18, XC 35, XC 38, etc.

Modes de traitement thermique pour les aciers au carbone :

- L'acier contenant moins de 0,30 % C est destiné à subir une cémentation est appelé acier trempé.
- Les aciers contenant 0,35 à 0,50 % C sont destinés à l'amélioration qui est la trempé suivie d'un revenu à haute température.
- Les aciers contenant 0,60 à 0,75 % C sont destinés à recevoir une trempé et un revenu à température moyenne.
- Les aciers contenant 0,8 à 1,3 % C sont dits aciers à outils et sont destinés à subir une trempé suivie d'un revenu à température basse.

6.1.3. Désignation des aciers alliés

Ces types d'aciers sont obtenus par l'addition volontaire d'éléments d'alliage. Ce sont des aciers contenant, outre le fer et le carbone un ou plusieurs éléments destinés à améliorer leurs propriétés mécaniques.

Ce sont des aciers de grande pureté. Leur élaboration s'effectue dans le four Martin, le four électrique ou le creuset.

Les principaux éléments d'alliages et leurs symboles normalisés sont présentés dans le tableau ci-dessous avec le coefficient de teneur de chaque élément.

Eléments	Symbole		Coefficient
	Chimique	Normalisé	
Aluminium	Al	A	x 10
Chrome	Cr	C	x 4
Cobalt	Co	K	x 4
Cuivre	Cu	U	x 10
Etain	Sn	E	x 10
Magnésium	Mg	G	x 10
Manganèse	Mn	M	x 4
Molybdène	Mo	D	x 10
Nickel	Ni	N	x 4
Phosphore	P	P	x 10
Plomb	Pb	Pb	x 10
Silicium	Si	S	x 4
Soufre	S	F	x 10
Titan	Ti	T	x 10
Tungstène	W	W	x 10
Vanadium	V	V	x 10
Zinc	Zn	Z	x 10
Antimoine	Sb	R	x 10
Cadmium	Cd	Cd	x 10

Les éléments d'addition sus-mentionnés agissent de deux façons principales sur l'acier.

a. Leur action sur la formation de l'austénite :

Les éléments alphagènes tels que Si, Cr, Al, W, Mo et V s'opposent à la formation de l'austénite pour une teneur suffisante, l'alliage demeure à l'état perlitique depuis la température ordinaire jusqu'à la température de fusion.

Les autres éléments gammagènes Ni, Mn et Co facilitent la formation de l'austénite au point de la rendre stable à la température ordinaire lorsqu'ils sont en proportion suffisante.

b. Leur action sur la formation de carbures complexes :

Ils facilitent la naissance des carbures complexes, généralement plus durs que le carbone de fer et qui demeurent noyés et non dissous dans le reste de l'alliage. Ces carbures influent sur les propriétés mécaniques de l'acier.

Selon les éléments d'addition et leurs quantités d'addition, on distingue deux types d'aciers :

- Aciers faiblement alliés.
- Aciers fortement alliés.

6.1.3.1. Désignation des aciers faiblement alliés

Ce sont des aciers dont la teneur en n'importe quel élément d'addition ne doit pas dépasser 5 %, ils sont désignés par :

- Un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone exprimé en centième pour cent (multiplié par 100).
- Suivi de symboles normalisés des éléments alliés dans l'ordre des teneurs décroissantes, c'est à dire, le premier élément indique toujours l'élément dont la teneur est la plus élevée.
- Les symboles sont suivis par des nombres indiquant la teneur moyenne des éléments d'additions multiplié par 4 pour les éléments C, K, M, N, S et par 10 pour tous les autres éléments.

Remarque :

La désignation des éléments mentionnés ci-dessous est négligée dans le cas où leur teneur est égale ou inférieure à celle mentionnées ci-dessous.

M, S	N	C	D, V
1 %	0,5 %	0,25 %	0,10 %

Exemples :

45 CD 20 – 4

C'est un acier faiblement allié contenant :

- 0,45 % de carbone.
- $20/4 = 5$ % de chrome (C).
- $4/10 = 0,4$ % de molybdène (D).
-

20 NC 6

C'est un acier faiblement allié contenant :

- 0,20 % de carbone.
- $6/4 = 1,5$ % de nickel (N).
- Le pourcentage de chrome (C) est inférieur à 1,5 %.

Exemples de nuances d'aciers faiblement alliés selon AFNOR :

18 CD 4,	10 NC 6,	16 NC 6,	14 NC 11	
20 NCD 2.	45 S 7,	38 C 4,	100 C 6,	25 CD 4
35 CD 4,	42 CD 4,	20 NC 6,	30 NC 11	etc.

6.1.3.2. Désignation des aciers fortement alliés

Ce sont des aciers caractérisés par la présence d'un ou de plusieurs éléments d'addition et au moins un de ces éléments a une teneur supérieure à 5 %. Dans cette catégorie, on trouve les aciers inoxydables, les aciers rapides pour la confection d'outils, les aciers à résistance thermique etc.

Leur désignation normalisée est toujours précédée par le lettre Z suivie :

- D'un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone au centième pour cent.
- Des symboles normalisés des éléments d'addition rangés dans l'ordre de teneur décroissante.
- Des chiffres indiquant la teneur moyenne en pour cent des éléments d'addition.

Dans le cas des aciers fortement alliés, les chiffres indiquent directement la teneur en % des éléments d'addition, donc il n'est pas nécessaire de diviser par les coefficients 4 ou 10 comme dans le cas des aciers faiblement alliés.

Exemples :

Z 160 CDV 12

Z : symbole de l'acier fortement allié contenant :

- 1,60 % de carbone.
- 12 % de chrome

Z 6 CN 18 – 09

C'est l'acier inoxydable courant contenant :

- 0,06 % de carbone
- 18 % de chrome.
- 9 % de nickel.

Exemple de nuances d'aciers fortement alliés :

Z 115 WC 05, Z 200 C 13, Z. 200 CKDV 14,
Z 150 CKD 14, Z 85 WDCV 06-05-04-02,
Z 130 WCV 12-04-04, Z 110 DKCWV 00-08-04-02.

6.2. Désignation normalisée des fontes selon AFNOR

La fonte est un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2%. Eventuellement une fonte contient d'autres éléments introduits volontairement ou non. Les

fontes se divisent en deux groupes selon leur mode d'élaboration, suivant l'état d'existence du carbone sous forme de cémentite ou de graphite.

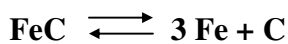
a. Fontes blanches :

La totalité du carbone se trouve sous forme de cémentite Fe_3C . Ces fontes sont obtenues lorsque le refroidissement est assez rapide et la température de coulée est assez basse. La cémentite n'a pas de temps pour se décomposer et l'on obtient une fonte sans graphite. Cette fonte est dite blanche car la cassure présente un aspect métallique blanc. Il y a absence de carbone libre.

La teneur en Si, C, P est relativement faible, tandis que la teneur en Mn est élevée. Ces types de fontes sont obtenues dans le haut-fourneau et sont généralement utilisées pour l'élaboration de l'acier ou de la fonte grise.

b. Fontes grises :

La totalité du carbone est libre et se trouve sous forme de graphite. Elles sont obtenues lors du refroidissement lent avec une température de coulée assez élevée, alors la cémentite peut se décomposer en donnant du carbone libre sous forme de graphite.



L'aspect de la cassure a une couleur grise, ce qui prouve la présence de carbone libre. L'élément indispensable pour obtenir une fonte grise est le silicium jusqu'à une teneur de 3 %, ensuite viennent le cuivre et le nickel dont le premier possède un pouvoir antiferrisant énergétique au cours du refroidissement mais facilitant la formation de carbure libre (point dur) et la ferrite libre (point doux) et le second (nickel) possède un pouvoir graphitisant plus meilleur que celui du cuivre, mais un pouvoir antiferrisant négligeable.

Généralement les fontes grises sont obtenues dans des fours appelés cubilots. Pour leur désignation normalisée, les fontes sont classées en deux catégories :

- Fontes non alliées.
- Fontes alliées

6.2.1. Désignation des fontes non alliées

a. Fontes grise à graphite lamellaire :

Pour leur désignation on utilise le symbole normalisé Ft suivi de la valeur en daN/mm² de la résistance minimale à la rupture de traction. Elles possèdent une excellente coulabilité et usinabilité mais présentent des propriétés mécaniques assez défavorables (fragiles et non malléables).

Exemple : Ft 25

Ft : symbole normalisé de fonte grise à graphite lamellaire.

25 : Rm (résistance minimale à la rupture de traction) = 250 MPA.

Exemple de nuances des fontes grises à graphite lamellaire :

Ft 10, Ft 15, Ft 20, Ft 25, Ft 30, Ft 35, Ft 40 etc.

b. Fontes à graphite sphéroïdal :

Les fontes à graphite sphéroïdal possèdent de bonnes propriétés mécaniques par rapport aux fontes Ft. Plus la sphéricité des particules est élevée, plus les propriétés sont bonnes.

La modification de la structure du graphite (passage du graphite lamellaire au graphite sphéroïdal) est obtenue par addition d'éléments d'alliages dans le métal liquide lors de sa coulée. Le premier élément ayant été utilisé est le cérium, mais aujourd'hui on utilise, le plus souvent, le magnésium sous forme d'alliages nickel-magnésium ou ferrosilicium-magnésium. Le procédé d'obtention des fontes à graphite sphéroïdal consiste à un traitement, au préalable, de la fonte tels que :

- La désulfuration.
- La démanganisation, si nécessaire, car la teneur en manganèse doit être fixée à l'avance si on veut obtenir des structures ferritiques ou perlitiques. Pour les structures critiques (Mn = 0,10 à 0,30 %), pour les structures perlitiques (Mn jusqu'à 0,90 %).

L'introduction du magnésium s'effectue lors de la coulée et à une température de 1350 à 1500°C et selon différentes méthodes.

a. Méthode sandwich :

Avant la coulée, le magnésium est introduit dans la poche sous forme d'alliage recouvert de rébus de tôles d'acier. La fonte à modifier est coulée directement sur ce sandwich.

b. Méthode plongeur :

Une cloche en réfractaire percée de trous et contenant le magnésium est entraînée mécaniquement vers le fond de la poche remplie de fonte liquide.

Les fontes à graphite sphéroïdal sont désignées par le symbole FGS suivi de la valeur en N/mm² de la résistance minimale à la rupture de traction et de la valeur de l'allongement après rupture en %.

Exemple : FGS 400 – 012

FGS : fonte à graphite sphéroïdal

400 : Résistance minimale à la rupture de traction = 400 N/mm².

012 : Allongement (A= 12%).

Exemple de nuances : FGS 370-17, FGS 500-17, FGS 600-3, FGS 700-2, etc.

6.2.2. Désignation des fontes alliées

Les fontes alliées sont obtenues par addition d'éléments d'alliages lors de la fusion. Ces éléments sont le Ni, CR, Mo, Ti, Va, Si, etc. Elles possèdent des propriétés mécaniques supérieures à celles des fontes déjà considérées. Elles sont à graphite lamellaire ou sphéroïdal et ferritiques ou austénitiques. Elles sont désignées par :

- La lettre L ou S : lamellaire ou sphéroïdal.
- Symboles normalisés des éléments d'addition rangés par teneur décroissante.
- Teneur moyenne en % des éléments d'addition rangés dans le même ordre que ces éléments sans facteur multiplicateur.

Exemple : L - NSC 30 – 5 – 5 : Fonte austénitique à graphite lamellaire ayant des teneurs moyennes en Ni (30%) en Si (5%) et en Cr (5%).

5.2.3. Désignation des fontes malléables

La fonte malléable est une fonte initialement blanche, qui a subi ultérieurement un recuit en atmosphère oxydante ou neutre. Il existe plusieurs procédés pour obtenir les différents types de fontes malléables.

a. Le procédé européen :

Pour obtenir la fonte malléable à cœur blanc (fonte malléable européenne) on élimine, en majeure partie, le carbone. Dans ce procédé les pièces moulées en fonte blanche sont emballées dans de l'oxyde de fer et portées vers 980 à 1050°C durant 80 à 100 heures. Les pièces, après ce long recuit, sont refroidies à la vitesse de 5 à 10 °C par heure et déchargées du four à 650°C pour ensuite les refroidir à l'air, alors on obtient une matrice complètement ferritique avec éventuellement quelques nodules de graphite au cœur de la pièce moulée.

b. Le procédé américain :

Il est destiné à obtenir des fontes malléables à cœur noir perlitiques (fontes malléables américaines). Dans ce procédé, les pièces coulées en fonte blanche subissant un recuit en atmosphère neutre à une température de 870 à 950°C durant 8 à 60 heures. Après ce recuit, elles sont refroidies aussi vite que possible jusqu'à la température de 760°C, ensuite elles sont refroidies à une vitesse de 3 à 10°C par heure afin d'obtenir une ferritisation complète. La descente lente de la température est souvent remplacée par un maintien à 720°C, ensuite les pièces peuvent refroidir à l'air. On obtient finalement une matrice ferritique ou tout le carbone se présente sous forme de nodules de graphite déchiquetés (fonte malléable à cœur noir). On peut supprimer la ferritisation eutectoïde en parcourant rapidement le domaine ($\alpha+\gamma+g$) pour que l'austénite se transforme en perlite, ce qui donne une fonte malléable perlitique.

Pour leur désignation, on utilise :

- La lettre M : fonte malléable.
- Les lettres B, N ou P : à cœur Blanc, Noir ou Perlitique.
- La résistance minimale de rupture à la traction R_m en daN/mm².
- L'allongement après rupture en %.

Exemples :

MB 35 –10 : fonte malléable à cœur blanc.

MN 38 – 18 : fonte malléable à cœur noir.

MP 55 – 5 : fonte malléable perlitique.

7. CLASSIFICATION DES ACIERS ET DES FONTES

Les aciers et les fontes sont les matériaux métalliques les plus utilisés dans les différentes branches de l'industrie. Un acier est un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est $\leq 2\%$. La fonte est aussi un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est $> 2\%$. Selon leur usage, les aciers et les fontes, sont classés en plusieurs groupes.

7.1. Classification des aciers

7.1.1. Aciers de construction

Dans les groupes des aciers de construction, on trouve les aciers au carbone et les aciers alliés, destinés à la fabrication des éléments de machines, utilisés dans la construction des ouvrages d'art et des édifices. La teneur en carbone dans ce groupe d'aciers ne dépasse pas 0,5 à 0,6 %.

Un acier de construction doit posséder en plus des bonnes propriétés mécaniques, de bonnes propriétés technologiques telles que se prêter bien au formage (laminage; forgeage, emboutissage, etc.), à l'usinage, au soudage, avoir une pénétration de trempe élevée et une faible aptitude aux déformations et aux tapures de trempe.

Il existe des centaines de nuances d'aciers de construction. Les aciers de construction sont élaborés dans des fours martin (acides et basiques), dans des fours électriques ouverts et dans des convertisseurs à soufflage supérieur.

7.1.1.1. Aciers de construction d'usage général (aciers au carbone)

Les aciers de construction au carbone forment deux classes, celles des aciers courants (ordinaires) et de qualité. D'après les conditions et le degré de désoxydation on distingue trois types de nuances.

a. Les aciers calmés :

Ils sont obtenus par désoxygénation complète du métal dans le four puis dans une poche de coulée. Ces aciers contiennent une quantité minimale de protoxyde de fer en assurant ainsi une solidification « calme » du métal dans la lingotière, qui s'accompagne de diminution de volume.

A la partie supérieure du lingot solidifié, se forme une retassure et une porosité dues au retrait éliminées par chauffage lors du laminage.

b. Les aciers effervescents :

Ce sont des aciers insuffisamment désoxygénés et qui contiennent une quantité non négligeable de FeO. Le métal est dit effervescent à cause des bulles de gaz CO qui se dégagent suite à la réaction de FeO avec le carbone du métal. Le grand nombre de bulles de gaz, empêche la formation d'une retassure. Les aciers effervescents sont moins coûteux car les rebuts de leur fabrication sont réduits au minimum. Ils possèdent une plasticité élevée et se prêtent bien à l'emboutissage à froid.

c. Les aciers semi-calmés :

Ce sont des aciers intermédiaires entre les aciers calmés et effervescents et trouvent aujourd'hui un emploi toujours plus large.

7.1.1.2. Aciers de construction ordinaires (aciers courants)

Ils sont moins purifiés et contiennent donc plus de soufre, de phosphore et certaines autres inclusions non métalliques. Ils sont employés pour des pièces peu importantes tels que les fers marchands, laminés à chaud (poutres, barres, cornières, tôles, ...).

Ils sont très employés aussi dans la fabrication des éléments de machines peu importantes (axes, arbres, pignons, doigts de chenilles, bagues, boulons, écrous), les propriétés mécaniques d'un acier ordinaire peuvent être sensiblement améliorées par un traitement thermique (généralement une trempe à l'eau après chauffage). Ainsi après trempe à l'eau, la limite élastique des tôles laminées s'accroît légèrement sans que la plasticité ne se dégrade ($A = 15$ à 26%).

Pour les constructions soudées, on utilise essentiellement les aciers calmés et semi-calmés à faible teneur en Mn et Si. Les aciers prévus à cet effet doivent avoir une faible aptitude au vieillissement thermique.

Pour les nuances devant être utilisées dans les régions froides, le seuil de rupture à froid acquiert une grande importance. Les aciers doivent être calmés et traités thermiquement (amélioration ou normalisation).

Les aciers de construction ordinaires, ayant une composition chimique définie et demandent une bonne tenue à l'usure, (axes, poussoirs, vis sans fin, pignons), subissent généralement une cémentation ou cyanuration.

7.1.1.3. Aciers de construction de qualité

Ces aciers ont une composition chimique plus rigoureuse, des teneurs plus faibles en soufre ($< 0,04 \%$) et en phosphore ($< 0,035 \%$), et suivant le degré de désoxydation, ils peuvent être calmés ou effervescents. Les aciers à faible teneur en carbone, donc à faible résistance, à plasticité élevée et à bonne soudabilité, s'emploient pour des pièces peu sollicitées. L'aptitude de ces aciers à l'estampage est d'autant plus faible que leur teneur en carbone est plus élevée. Les aciers de qualité sont utilisés :

- Sans traitement thermique.
- Avec le traitement de normalisation.
- Avec un traitement de cémentation lorsque les pièces demandent de faibles charges et une bonne tenue à l'usure (arbres à came, axes, leviers, etc.).

Les aciers à teneur moyenne en carbone ($0,3$ à $0,5 \%$), s'emploient après une normalisation, une amélioration et une trempe superficielle pour des pièces très variées dans la construction mécanique (vilebrequins, bielles, pignons, tiges, etc.). A l'état normalisé, la résistance de ces aciers est plus grande que celle des aciers à bas carbone, alors que la plasticité est plus basse. A l'état recuit, ces aciers se prêtent bien à l'usinage. L'acier à $0,45 \%$ C est souvent utilisé pour les roues dentées et les arbres.

Les aciers contenant entre $0,6$ et $0,85 \%$ C possèdent une résistance et une limite élastique plus grandes et une tenue à la l'usure plus élevée. Ils s'emploient après trempe et revenu, normalisation et revenu, ainsi qu'après trempe superficielle pour la fabrication des ressorts, tiges, rondelles, cylindres de laminoirs, etc.

Les aciers au carbone de qualité, contiennent du manganèse ($0,7$ à 1%), ce qui permet d'améliorer la résistance en augmentant la pénétration de trempe et de réduire légèrement la plasticité.

7.1.2. Aciers de décolletage

Les aciers de décolletage possèdent de bonnes aptitudes à l'usinage tout en assurant un bon état de surface. Ils contiennent généralement une teneur accrue en soufre et en phosphore. Le soufre se combine au manganèse en formant MnS sous forme d'inclusions allongées dans le sens du laminage et contribue à la formation d'un copeau court et cassant. Le phosphore améliore la dureté et la résistance, et élève le seuil de fragilité à froid.

La teneur en carbone varie de 0,08 à 0,45 %, celle du manganèse de 0,7 à 1,5 %, celle du soufre de 0,08 à 0,30 % et celle du phosphore de 0,08 à 0,15 %. La résistance et la dureté augmentent, alors que la plasticité diminue avec la teneur en carbone.

Exemples :

- Acier à 0,12 % C, R = 420 N/mm², HB = 160, A = 22 %.
- Acier à 0,40 % C, R = 600 N/mm², HB = 207, A = 14 %.

Parfois on rajoute à l'acier de 0,15 à 0,30 % de plomb qui fond lors de la coupe et diminue ainsi la résistance, les frottements et l'effort de coupe.

Les aciers de décolletage étirés à froid (écrouis) ont une résistance assez élevée (jusqu'à 800 N/mm²), l'emploi de ces aciers est destiné à la fabrication de vis, de boulons, d'écrous, ainsi qu'aux pièces fortement sollicitées.

7.1.3. Aciers d'amélioration

Ce sont les aciers utilisés après trempe et revenu à haute température et contenant entre 0,3 et 0,5 % C. Les aciers d'amélioration doivent avoir une limite élastique élevée, une faible susceptibilité à l'entaille, une bonne pénétration de trempe et une faible aptitude à la fragilité de revenu.

Les nuances contenant entre 0,35 et 0,45 % s'emploient surtout pour les pièces de sections relativement petites, ou sollicitées par des charges relativement faibles. Pour des pièces volumineuses, on emploie les aciers alliés pour augmenter la pénétration de trempe. Pour des pièces encore plus grandes, on utilise les aciers fortement alliés exposés ci-après.

7.1.3.1. Aciers alliés au chrome

L'addition du chrome de 0,8 à 1,2 % accroît la pénétration de trempe et permet de former un carbure plus dur que la cémentite, ce qui contribue à l'augmentation de la dureté, de la résistance à la rupture et à l'usure, sans accroître la fragilité.

Les aciers alliés au chrome peuvent contenir d'autres éléments tels que le bore (0,002 à 0,005) % qui augmente la pénétration de trempe et le vanadium (0,1 à 0,2) % qui renforce les propriétés mécaniques de l'acier.

7.1.3.2. Aciers alliés au chrome-manganèse.

L'addition combinée de chrome (0,9 à 1,2 %) et du manganèse (0,9 à 1,2) % permet d'accroître suffisamment la résistance et la pénétration de trempe. Ces aciers s'emploient pour

des pièces de sections variant de 20 à 40 mm. L'addition supplémentaire de titane à l'acier, abaisse son aptitude à la surchauffe.

7.1.3.3. Aciers alliés au chrome-silicium-manganèse (chromansil)

Les propriétés mécaniques de ces aciers sont très élevées. La composition chimique moyenne est constituée de :

- 0,2 à 0,3 % C.
- 0,9 à 1,1 % Cr.
- 0,8 à 1,1 % Mn.
- 0,9 à 1,2 % Si.

Les caractéristiques mécaniques des aciers au Cr-Si-Mn après trempe à l'huile (880°C) et revenu (540°C) sont les suivantes :

- $R = 1100 \text{ N/mm}^2$.
- $R_e = 850 \text{ N/mm}^2$.
- $A = 10 \%$.
- $K = 50 \text{ J/cm}^2$.
- $Z = 45 \%$.

Les aciers "chromansil" possèdent une bonne soudabilité une faible pénétration de trempe. Celle ci peut être améliorée par une addition de 1,4 à 1,8 % de nickel.

7.1.3.4. Aciers alliés au chrome-nickel

Ces aciers possèdent une bonne résistance, une bonne ductilité et une grande pénétration de trempe. Ils sont employés pour la fabrication de grosses pièces de formes complexes, sollicitées en service à des chocs et des charges vibratoires.

Le nickel assure la ductilité maximale, et combiné au chrome, ils assurent une pénétration de trempe élevée. Combiné au molybdène, le nickel abaisse sensiblement le seuil de fragilité à froid.

Enfin nous avons rassemblé les principales nuances des aciers alliés d'amélioration et leurs caractéristiques dans le tableau ci-dessous.

Nuance DIN	Rm (daN/mm ²)	K (J/cm ²)	Applications technologiques
41 Cr 4	80 à 120	5 à 7	Boulonnerie pour matriçage à froid, à chaud. Se prête à la trempe par induction.
50 CrV 4	90 à 130	4 à 5	Essieux et arbres fortement sollicités. Se prête à la trempe par induction.
25 CrMo 4	65 à 105	7 à 10	Pièces d'avions, d'automobiles fortement sollicitées. Vilebrequins, leviers de direction, bielles, arbres.
42 CrMo 4	75 à 130	5 à 8	
30 CrMoV 9	90 à 145	4 à 6	Pièces de grande résistance : engrenages, axes.
24 NiCr 14	75 à 120	8 à 12	Pignons, roues dentées.
35 NiCr 18	110 à 165	4 à 7	Pièces très sollicitées, grande résistance aux chocs.
36 NiCrMo 4	75 à 130	6 à 10	Pièces pour flexion, chocs, torsion alternée : bielles, vilebrequins, arbres de cardans, d'engrenages, fusées d'essieux, leviers.
30 NiCrMo 8	90 à 145	5 à 8	
34 NiCrMo 6	80 à 130	6 à 9	
40 Mn 4	70 à 105	4 à 6	Pièces de faibles sections : boulons, vis, arbres.
37 MnSi 5	70 à 120	3 à 6	Pièces pour haute résistance à l'usure : roues d'engrenages, arbres.

7.1.4. Aciers de cémentation

Ce sont des aciers à faible teneur en carbone (0,10 à 0,25) %. Après trempe, cémentation et revenu à basse température, la dureté de la couche cémentée atteint 62 HRC et celle du cœur (20 à 40) HRC.

Les aciers de cémentation doivent avoir au cœur des propriétés mécaniques élevées, en particulier, une très haute limite élastique. Les éléments d'alliage améliorent les propriétés mécaniques.

7.1.4.1. Aciers alliés au chrome

La teneur en chrome des pièces simples, varie de 0,7 à 1 %, la profondeur de la couche cémentée atteint 1,5 mm. Une trempe à l'huile, suivie de cémentation, donne au cœur des pièces, une structure bainitique. Les propriétés mécaniques sont de l'ordre de :

- $R = (700 \text{ à } 800) \text{ N/mm}^2$.
- $R_e = (500 \text{ à } 650) \text{ N/mm}^2$.
- $A = (11 \text{ à } 12) \%$.
- $K = (60 \text{ à } 70) \text{ J/cm}^2$.

7.1.4.2. Aciers alliés au chrome-vanadium

L'addition de vanadium (0,1 à 0,2) % à un acier au chrome, améliore ses propriétés mécaniques, celles-ci, deviennent au cœur.

- $R = (750 \text{ à } 800) \text{ N/mm}^2$.
- $R_e = (550 \text{ à } 600) \text{ N/mm}^2$.
- $A = (12 \text{ à } 13) \%$.
- $K = 80 \text{ J/cm}^2$.

La faible pénétration de trempe de ces aciers ne permet de les utiliser que pour des pièces de petites dimensions (axes de pistons, arbres à cames).

7.1.4.3. Aciers alliés au chrome-nickel

L'addition simultanée de chrome et de nickel augmente la résistance, la plasticité et la ductilité au cœur des pièces. De plus, le nickel augmente la résistance et la ductilité de la couche cémentée.

Ces aciers sont employés pour les grosses pièces supportant, en service, des charges dynamiques importantes. Ils sont peu susceptibles de surchauffe en cémentation prolongée et n'ont pas de tendance à la sursaturation en carbone de la couche superficielle. L'addition de

tungstène ou de molybdène aux aciers au chrome-nickel, accroît la stabilité de l'austénite surfusionnée et par conséquent, la pénétration de trempe.

7.1.4.4. Aciers alliés au chrome-manganèse

Dans beaucoup de cas, puisque les aciers au chrome-nickel coûtent chers, ils sont remplacés par les aciers au chrome-manganèse qui sont employés pour la fabrication des engrenages, des arbres, etc.

Les aciers alliés au chrome- manganèse sont moins résistants à la surchauffe et possèdent une ductilité plus faible par rapport aux aciers chrome-nickel. Une faible addition de titane (0,03 à 0,09) % à cet acier donne après cémentation, trempe. revenu, une couche cémentée de dureté élevée (60 HRC), une pénétration de trempe très faible, ainsi une faible addition de molybdène l'accroît et donne une dureté maximale en surface.

Dans le tableau ci-dessous, nous avons porté les principales nuances d'aciers alliés de cémentation et leurs applications.

Nuance DIN	Rm (daN/mm ²)	Dureté (HB)	Applications technologiques
13 Cr 3	50 à 60	141 à 183	Pièces de construction avec exigences extraordinaires, résistance du cœur très élevée, haute résistance à l'usure: vis sans fin, engrenages..
15 CrNi 6	60 à 75	169 à 211	
18 CrNi 8	60 à 80	183 à 225	
15 CrMo 5	60 à 75	169 à 211	Pièces soumises à des efforts élevés de tous genre : roues dentées, engrenages de boîtes de vitesses, arbres à cames.
20 CrMo 5	75	220	
16 MnCr 5	60 à 70	155 à 200	
20 MnCr 5	60 à 75	169 à 211	
18 NiCrMo 6	115 à 150	210	Axes, engrenages, pignons, leviers de direction.

7.1.5. Aciers de nitruration

Appliquée à un acier non allié, la nitruration ne donne qu'un durcissement faible et la pénétration de l'azote en profondeur fragilise les pièces. Par contre, il suffit d'introduire une faible quantité d'aluminium (1 à 2) % ou éventuellement d'autres éléments d'alliage, tels que le chrome, pour que la consolidation en surface s'intensifie sans affecter le cœur. L'addition

d'une certaine quantité de molybdène, assure le maintien prolongé à 550°C et ne change pas la résilience (pas de fragilisation).

La dureté obtenue dans la couche nitrurée est d'autant plus élevée que la teneur en aluminium est plus forte. Pour obtenir une résistance au cœur, plus importante, on augmente la teneur en carbone (jusqu'à 0,5 %), en gardant inchangée celle de l'aluminium. Le tableau suivant rapporte les principales nuances de nitruration et leurs caractéristiques.

Désignation	Caractéristiques				Applications
	Rm	Re	A	K	
	(da/mm ²)		(%)	(J/cm ²)	
30 CDA 6-612	800	700	18	19	Axes, vilebrequins, arbres, engrenages
45 CDA 6-12	900	800	16	16	Outils d'emboutissage, de sertissage, engrenages fortement chargés.
30 CAD 6-6	800	700	18	19	Même usage que ci-dessus. Couche nitrurée plus tenace et moins dure.
40 CAD 6-6	900	800	15	16	
30 CAD 6-3	800	700	18	19	
45 CAD 6-3	900	800	15	16	
20 CD 12	700	600	22	18	Pièces soumises aux chocs importants et nécessitant une grande résistance à l'écaillage
30 CD 12	800	700	19	23	
30 CD 12 revenu à 550°C	1300	1200	11	8	
Z 35 CS 8	950	850	18	6	Pièces résistant à l'oxydation à chaud : soupapes à tiges nitrurées.
Z 50 CNW 20	880	450	30	10	

7.1.6. Aciers pour constructions soudées

Comme leur nom l'indique, les aciers pour constructions soudées doivent d'abord avoir une bonne soudabilité. De plus, il est nécessaire qu'ils aient une limite élastique assez élevée et ils ne doivent pas être susceptibles de rupture par fragilité. Ces aciers contiennent en général :

- Une faible teneur en carbone (0,15 à 0,22) % cause des exigences de soudabilité.
- Une teneur relativement élevée en manganèse à cause des exigences de résistance mécanique.
- Eventuellement de faible addition de chrome et de molybdène.

Les aciers pour constructions soudées sont très employés en construction, métalliques soudées et en chaudronnerie, notamment, dans le domaine ferroviaire (wagons, etc.).

7.1.7. Aciers à ressorts

Les aciers à ressorts doivent répondre aux exigences suivantes :

- Une bonne résistance aux faibles déformations plastiques.
- Une bonne limite de fatigue.
- Un grand pouvoir trempant.
- Une régularité dans le comportement.

Ces propriétés s'obtiennent pour une teneur en carbone supérieure à 0,5 % après trempe et revenu à 500°C, du point de vue composition chimique, les aciers à ressorts diffèrent très peu des aciers de construction, mais les conditions d'élaboration sont plus rigoureuses.

Généralement la limite élastique des aciers à ressorts au carbone est supérieure à 800 N/mm² et celles des aciers à ressorts alliés est supérieure à 1000 N/mm². Après trempe, tout le volume de la pièce doit avoir une structure martensitique.

La nuance avec la teneur la plus élevée en carbone (1,25 à 1,32) % est pauvre en manganèse (0,1 à 0,25) %. Cette nuance est utilisée, après traitement, pour faire des rubans de scie, de la coutellerie, des lames de grattoirs, etc. Les teneurs moyennes en éléments d'alliages contenus dans les aciers à ressorts sont : Si : (1,5 à 2,8) %, Mn : (0,6 à 1,2) %, Cr : (0,2 à 1,2) %, Ni : (1,4 à 1,7) %, W : (0,8 à 1,2) %.

Ces éléments assurent la pénétration de trempe, affinent le grain et augmentent la tenue à la relaxation. Le silicium élève la pénétration de trempe et retarde la décomposition de la martensite pendant le revenu. Les autres éléments sont plus ou moins présents suivant l'usage des ressorts.

Dans le cas courant, les ressorts sont durcis par trempe et revenu à moyenne température, ou par écrouissage superficiel (grenailage) qui permet d'augmenter la limite de fatigue. L'emploi des aciers à ressorts est très varié (voir tableau ci-dessous).

- Dans le cas de sollicitations normales, on utilise les aciers au manganèse-silicium.
- Dans le cas où s'impose un amortissement efficace et une longue durée de vie sous sollicitations élevées, on emploie les aciers au chrome-silicium et au chrome-vanadium.

Nuances DIN	Re (daN/mm ²)	Dureté (HB)	Applications
46 Si 7	90	255	Ressorts de suspension pour locomotives et wagons.
60 SiMn 5	85	250	Ressorts en spirales, coniques, hélicoïdaux, à lames.
46 Mn 7	75 à 90	230	Ressorts soumis à un taux élevé de flexion alternée : Ressorts à lames, ressorts à boudins.
67 SiCr 5	85	240	Ressorts de soupapes et régulateurs.
50 CrV 4	80	235	Ressorts à boudins, barres de torsion, ressorts de soupapes (T = 350°C).

7.1.8. Aciers à roulements

Les aciers à roulements doivent satisfaire à des exigences très rigoureuses en ce qui concerne les inclusions non métalliques. Leur présence dans la partie sollicitée, provoque une concentration de contraintes qui entraîne une rupture de fatigue prématurée. Les bagues, rouleaux et bielles, exigent dans les conditions de travail, une dureté, une tenue à l'usure et une résistance, élevées.

A l'état recuit, ces aciers ont une structure perlitique à grains fins, assez usinable avec une dureté d'environ 187 HB. Après trempe à l'huile et revenu à basse température (200°C) la dureté atteint (61 à 66) HRC.

Les bagues, les rouleaux et les bielles sont fabriqués en acier à haut carbone contenant du chrome. Dans le cas de grosses pièces, on utilise comme addition, du chrome-manganèse-silicium ou du chrome-nickel (aciers de cémentation). Pour les roulements travaillant dans des milieux agressifs, on emploie l'acier inoxydable à 1,2 % C et 1,4 % Cr.

Dans le tableau, ci-dessous, nous avons porté quelques nuances d'aciers pour roulements et leurs principales applications.

Nuances DIN	Rm (daN/mm ²)	Dureté (HRC)	Applications
105 Cr 4	70	63 à 67	Roulements à bagues de 10 à 17 mm de diamètre.
100 Cr 6	70	63 à 66	Bagues de roulements à billes, disques et anneaux de butées à billes et à galets, sièges de roulements.
100 CrMn 6	73	63 à 66	Bagues de plus de 30 mm d'épaisseur de paroi à l'état fini.
X90 CrMoV 18	85	57 à 59	Roulements inoxydables, rouleaux à billes, à galets.

7.1.9. Aciers à haute résistance (Maraging)

Les exigences de ces aciers sont les suivantes :

- Une résistance mécanique élevée.
- Une bonne tenue à la rupture fragile.
- Une fiabilité élevée en service.

Ces prescriptions correspondent, dans une grande mesure, aux aciers martensitiques de vieillissement qui contiennent très peu de carbone (< 0,03 %) et appelés aciers « Maraging ». Ce sont les ferronickels martensitiques traités par durcissement structural. Ils sont souvent additionnés de cobalt, de molybdène, de niobium, etc., pour assurer le vieillissement.

Lors du vieillissement, le chrome consolide la martensite, améliore la tenue à la corrosion. Le manganèse provoque le vieillissement de la martensite Fe-Ni, mais diminue la plasticité et la ductilité de la martensite vieillie.

Le plus utilisé des aciers Maraging est le Z3 NKDT 18-9-5 contenant 18 % Ni, 9 % Co, 5 % Mo, et 0,7 % Ti. Son traitement thermique comporte un recuit d'une heure à 820°C avec un refroidissement à l'air, suivi d'un traitement de vieillissement de 3 heures à environ 480°C. Les caractéristiques mécaniques après recuit et vieillissement sont portées dans le tableau ci-dessous.

Etat	Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)	Z (%)	KCV (J/cm ²)
Recuit	650 à 1020	630 à 700	15 à 20	70 à 80	31 à 45
Vieilli	1750 à 1950	1650 à 1850	10 à 12	48 à 57	31 à 45

L'acier Maraging se distingue donc par ses bonnes propriétés de résistance et de ductilité. A l'état trempé, il se prête bien à l'usinage, au corroyage et au soudage. Les aciers martensitiques de vieillissement s'emploient dans les industries aéronautiques, navales, dans les constructions d'appareils de mesure et de contrôle, etc.

7.1.10. Aciers à haute tenue à l'usure

Il existe deux classes d'aciers résistant à l'usure :

- Les aciers austénitiques au manganèse.
- Les aciers martensitiques au chrome.

7.1.10.1. Aciers austénitiques au manganèse

Ce sont des aciers austénitiques à haute teneur en manganèse, de composition moyenne de (0,9 à 1,3) % C et de (11,5 à 14,5) % Mn.

Ces aciers n'ont pas une dureté particulièrement élevée, mais ils possèdent une aptitude remarquable à s'écrouir sous l'effet de faibles déformations plastiques. Ils ont de ce fait, une très

bonne tenue au frottement, convenablement traités, ils sont très peu fragiles. Leur haute aptitude à s'écrouir, les empêche d'être usinables et ils ne peuvent être mis en forme que par moulage et rectification. Après coulée, ils sont constitués d'austénite et de carbure en excès $(Fe, Mn)_3C$, qui se précipite aux joints de grains en altérant la résistance et la ductilité.

Les aciers austénitiques au manganèse conviennent pour des pièces de frottement (rails de chemins de fer, godets d'excavateur, mâchoires de concasseur, etc.). L'acier le plus connu de cette catégorie est l'acier "Hadfteld" de désignation normalisée Z 120 M 12, dont les caractéristiques mécaniques sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Etat	Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)	Z (%)	Dureté (HB)
Trempe à l'eau	850 à 1050	340 à 440	40 à 60	35 à 40	160
Ecroui (10 à 20) %	1200 à 1250	800 à 900	15 à 25	-	200

L'addition d'environ 1 % de molybdène permet d'éviter les précipitations indésirables de carbure, et de surclasser l'acier Hadfield du point de vue résistance à l'abrasion.

7.1.10.2. Aciers martensitiques au chrome

Les aciers martensitiques au chrome sont des aciers résistants à l'usure, usinables et qui peuvent imposer une certaine conservation de dimensions. Il existe deux catégories :

- Les aciers ayant (0,4 à 0,48) % C et (0,7 à 1,1) % Cr.
- Les aciers ayant (0,95 à 1,1) % C et (1,3 à 1,6) % Cr.

Les aciers de la première catégorie correspondent à la nuance 42 CD 4. Pour les applications demandant une bonne résistance à l'usure, cette catégorie exige une élaboration particulièrement soignée.

Les aciers, de la deuxième catégorie, correspondent à la nuance 100 C 6, qui est une nuance d'acier pour roulements, ils ont une très haute dureté à l'état traité. Dans le cas des pièces volumineuses, pour lesquelles la trempabilité du 100 C 6 est insuffisante, on rajoute (0,2 à 0,4) % de molybdène sans faire varier la composition chimique du carbone et du chrome.

7.1.11 Aciers résistant à chaud

Le besoin d'aciers pour emploi à haute température se fait sentir dans les domaines industriels suivants :

- Construction des fours; (soles, chemins de roulement, grilles).
- Construction des générateurs de vapeur.
- Boulonnerie.
- Construction des turbines à gaz ou à vapeur.

L'augmentation de température influe fortement sur les propriétés mécaniques, en particulier, elle provoque la diminution des caractéristiques de résistance (E, Rm, Re et HB) et l'élévation des caractéristiques de plasticité en particulier, et le fluage. Par conséquent, les exigences d'emploi sont les suivantes.

- Grande résistance à la déformation à chaud (fluage, relaxation, fatigue à chaud).
- Bonne résistance aux chocs thermiques.
- Grande résistance aux agents chimiques à chaud (oxydation, corrosion).
- Facilité de mise en oeuvre (aptitude à la conformation à chaud ou à froid, soudabilité, usinabilité).

La résistance à chaud peut être améliorée par addition d'éléments d'alliages à la solution solide. Ceux-ci renforcent l'énergie de liaison interatomique et retardent le processus de diffusion, tout en élevant la température de recristallisation. Les aciers, pour emploi à haute température, atteignant les 950°C (pointes d'outils de coupe en service), sont élaborés à base de nickel, de fer et de cobalt, alors que ceux atteignant des températures encore plus élevées (1200 à 1500)°C, sont réalisés à base de chrome, de molybdène et d'autres éléments difficilement fusibles. Parmi les aciers résistants à chaud, on peut citer les aciers perlitiques, martensitiques et austénitiques.

7.1.11.1. Aciers perlitiques

Les aciers perlitiques sont employés dans le cas des pièces susceptibles de fluage, mais relativement peu chargées et ne dépassent pas la température de 600°C (pièces d'installations énergétiques). Ce sont des aciers à bas carbone dont la teneur en chaque élément additionné (Cr, Mo, V) est égale ou supérieure à 1 %. Ces derniers améliorent la résistance à chaud, notamment avec la formation du carbure VC.

Les aciers perlitiques sont souvent soumis à la normalisation (vers 1000°C) et au revenu à haute température (vers 700°C). Ce traitement leur confère une structure de perlite lamellaire fine (sorbite) dont la résistance à chaud est plus élevée.

7.1.11.2. Aciers martensitiques résistant à chaud

Ce sont des aciers martensitiques alliés au W, V, Mo, Ti, destinés à la fabrication des pièces et des ensembles de turbines à gaz et des installations à vapeur. Les éléments d'alliages permettent d'élever la température de recristallisation, de former des carbures de type $M_{23}C_6$, M_6C , M_2C , MC et donc d'améliorer la résistance à chaud.

La résistance optimale à haute température pour les aciers à haute teneur en chrome, après une trempe martensitique vers 1020°C, suivie de revenu, est due à la structure de sorbite que lui confère ce traitement.

Les aciers martensitiques au chrome-silicium (silichrome) sont employés pour les soupapes d'échappement des moteurs à combustion interne, après une trempe (vers 1020°C) et un revenu à haute température.

7.1.11.3 Aciers austénitiques résistant à chaud

Ce sont les aciers à forte teneur en carbone, nickel et manganèse qui favorisent la structure austénitique. Ils sont employés pour des pièces travaillant entre 500 et 750°C. La résistance à chaud est plus élevée que celle des aciers martensitiques et ferritiques. Les aciers austénitiques sont plastiques et se prêtent bien au soudage.

On peut obtenir d'excellentes propriétés d'aciers résistants à chaud par addition, à la composition classique des aciers inoxydables 78-10 :

- Soit d'éléments durcissant d'austénite à l'état hypertrempe (B, Mo, W, ...).
- Soit d'éléments donnant lieu à des précipitations en cours de fluage (Ti, Nb, ...).
- Soit d'éléments permettant le durcissement structural de l'austénite (Mo, Ti, ...).

7.1.11.4. Austénites complexes

Les exigences, sans cesse, croissantes dans le domaine de l'industrie des turbines à gaz et des turboréacteurs, ont conduit à renforcer les teneurs en chrome et en nickel, et à ajouter en plus des teneurs en éléments spéciaux, tels que le cobalt aboutissant ainsi à des compositions dans lesquelles la teneur en fer peut descendre au dessous de 50 %. Exemple : l'alliage Z 12 CNKDW 20-20-20 contenant 20 % Cr, 20 % Ni, 20 % CO, 2 % Mo et 3 % W.

7.1.12. Aciers à haute tenue à la corrosion (aciers inoxydables)

La tenue à la corrosion s'obtient en ajoutant aux aciers ordinaires, des éléments chimiques qui forment en surface, des pellicules protectrices fortement liées au métal de base et qui empêchent ainsi le contact direct métal-milieu corrosif.

Les éléments d'addition (chrome, aluminium, silicium) se dissolvent dans le fer et forment, pendant l'échauffement de l'acier, des couches protectrices d'oxydes tels que $(Cr, Fe)_2O_3$, $(Al, Fe)_2O_3$. Au fur et à mesure que la teneur des éléments d'addition est élevée, plus la tenue à la corrosion s'élève en température :

- Avec (5 à 8) % Cr, on peut atteindre $T = (700 \text{ à } 750)^\circ\text{C}$.
- Avec (15 à 17) % Cr, on peut atteindre $T = (950 \text{ à } 1000)^\circ\text{C}$
- Avec 25 % Cr et 5 % Al, on peut atteindre $T = 1300^\circ\text{C}$.

Les aciers à haute tenue à la corrosion peuvent être classés en deux groupes principaux : les aciers alliés au chrome qui, après refroidissement à l'air obtiennent une structure martensitique ou ferritique et les aciers alliés au chrome-nickel à structure austénitique.

7.1.12.1. Aciers inoxydables au chrome

L'addition à l'acier entre 12 et 14 % de chrome, rend positif le potentiel électrochimique du métal qui devient ainsi résistant à la corrosion dans l'atmosphère, l'eau potable, l'eau de mer et dans plusieurs sortes d'acides, de sels et d'alcalis. Les aciers inoxydables au chrome contiennent une faible teneur en carbone et éventuellement des additions d'aluminium pour améliorer la résistance à la corrosion à chaud. Il est indiqué deux types de ces aciers dans le tableau ci-dessous.

Nuances	% C	% Cr	Traitements thermiques	Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)
Z3 C 13	0,03	13	Trempe (air ou huile) à 950°C et revenu (2 à 4) h vers $(650 \text{ à } 700)^\circ\text{C}$	550 à 700	350 à 550	15
Z5 CA 13	0,05	13		450 à 600	250 à 450	20

Malgré sa faible teneur en carbone, l'acier Z3 C13 prend partiellement par la trempe, une structure martensitique. L'acier est inoxydable, grâce à la présence d'aluminium (0,2 %). Ces deux nuances sont soudables. La tenue à la corrosion des aciers à 13% Cr est meilleur, mais à condition que tout le chrome soit à l'état de solution solide. Dans ce cas, il forme à la surface une couche protectrice dense de type Cr₂O₃.

Les aciers Z12 C13 et Z20 C13 s'emploient pour les pointeaux des carburateurs, les ressorts, les instruments chirurgicaux, les aciers à plus forte teneur en chrome (17 % et plus) ont une tenue à la corrosion plus élevée. L'acier Z12 C17 s'emploie après recuit de recristallisation vers 750°C dans l'industrie alimentaire et l'industrie légère.

Les aciers ferritiques Z15 C 25 et Z15 C 28 s'emploient, le plus souvent, sans traitement thermique pour la fabrication des pièces travaillant dans des milieux agressifs (acide nitrique bouillant, ...). Ces nuances résistent à l'oxydation à chaud jusqu'à 1150°C en atmosphère sulfureuse. Leurs caractéristiques mécaniques à chaud sont faibles et elles deviennent facilement fragiles après quelques temps de maintien à haute température, probablement à cause du grossissement exagéré du grain.

7.1.12.2. Aciers inoxydables au chrome-nickel

Ce sont des aciers austénitiques, additionnés généralement de chrome, nickel ou de manganèse. Ils ont une faible limite d'écoulement, une résistance modérée, une plasticité élevée et une bonne tenue à la corrosion dans les milieux oxydants. Les caractéristiques de quelques nuances d'aciers inoxydables Cr-Ni, après trempe à l'eau à 1150°C sont rapportées dans le tableau suivant.

Nuances	Composition chimique				Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)
	% C	% Cr	% Ni	% Si			
Z15 CN24-12	0,15	24	12		600	250	35
Z10 CN25-20	0,10	25	20	-	600	250	35
Z12 NCS38-18	0,12	18	38	2	600	300	30

Des nuances voisines à celles mentionnées dans le tableau, teneurs en carbone plus élevée, permettent d'améliorer la coulabilité en moulage. Les teneurs en nickel peuvent être abaissées en raison de l'influence gammagène du carbone. Les aciers inoxydables au chrome-nickel coûtent très chers.

C'est pourquoi, on a recours à des aciers moins coûteux dans lesquels le nickel est remplacé par le manganèse. Ces aciers servent dans la fabrication des appareils travaillant dans des milieux faiblement corrosifs. Par trempe (1050°C), les aciers au Cr-Ni-Mn, acquièrent une structure austénitique. Dans le domaine de déformation, ils subissent, d'une part, un fort durcissement, et d'autre part, une transformation partielle en martensite. Les tableaux suivants résument différentes nuances d'aciers inoxydables ferritiques, austénitiques et martensitiques ainsi que leurs domaines d'applications.

a. Aciers inoxydables ferritiques :

Nuances DIN	HB état recuit	R (dan/mm ²)	Applications
X8 Cr17	150	45 à 60	Ustensiles de cuisines, ferrures de portes, revêtements de comptoirs.
X8 CrTi17	150	45 à 60	Résistant à la corrosion intercrystalline : bacs, pales d'agitateurs.
X8 CrMoTi17	160	50 à 65	Résistant aux acides : citrique, sulfurique, borique bouillant, acétique froid et bouillant, sulfate d'ammoniac bouillant, iode sec, vinaigre.

b. Aciers inoxydables austénitiques :

Nuances DIN	HB état recuit	R (dan/mm ²)	Applications
X12 CrNi18-8	175	50 à 70	Ustensiles de cuisines, ferrures de portes et fenêtres, Instruments chirurgicaux, sièges de soupapes.
X10 CrNiTi18-9	185	50 à 75	Ustensiles, appareils pour l'industrie alimentaire et chimique, pièces pour réacteurs nucléaires.
X12 CrNiS18-8	175	50 à 70	Crochets à viandes, écrous, vis à bielles.
X8 CrNi12-12	175	50 à 65	Ustensiles de cuisines
X5 CrNiMo18-12	175	50 à 70	Instruments de chirurgie, conduite d'eau résiduaire, gicleurs résistant aux acides, armatures.

c. Aciers inoxydables martensitiques :

Nuances DIN	HB état recuit	R (dan/mm ²)	Applications
X10 Cr13	160	50 à 65	Instruments médicaux, canons de fusils de chasse, rivets, ustensiles de cuisine.
X20 Cr13	240	60 à 70	Moulage : hélices de navires, roues, godets pour turbines. Forgeage : arbres, boulons.
X40 Cr13	225	70 à 85	Instruments de chirurgie, couteaux de table, hachoir, pieds à coulisse.
X35 CrMo17	260	70 à 85	Aciers inattaquables à l'eau de mer, bonne résistance à chaud.
X22 CrNi17	260	80 à 95	
X90 CrMoVCo17	265	70 à 85	Disques perforés pour cuisine, couteaux, bistouris.

7.2. Aciers à outils

Les aciers à outils sont des aciers au carbone et alliés à plus de 0,5 % C. Ils sont caractérisés par :

- Une dureté élevée (60 à 65) HRC.
- Une grande résistance à l'usure.
- Une forte résistance mécanique.

Dans le cas général; ce sont des aciers hypereutectoïdes et lédéburitiques, dont la structure après trempe et revenu à basse température se compose de martensite et de carbures. Pour les outils qui demandent une ductilité relativement élevée (matrices de formage à chaud), on emploie des aciers hypoeutectoïdes. Après trempe et revenu à haute température, ils acquièrent une structure de sorbite.

On distingue actuellement quatre classes d'aciers à outils :

- Classe 1 : aciers au carbone pour travail à froid.
- Classe 2 : aciers alliés pour travail à froid.
- Classe 3 : aciers pour travail à chaud
 - avec chocs : forgeage, estampage, matriçage.
 - Sans chocs : moules, pièces de filage.
- Classe 4 : aciers à coupe rapide.

Les aciers à outils sont repérés, indépendamment de la désignation normalisée, par quatre chiffres :

- Le premier indique la classe.
- Les trois autres dépendent du groupe, du sous-groupe d'emploi et des éléments d'alliages dominants.

7.2.1. Aciers à outils de la classe 1

Ce sont des aciers au carbone destinés pour le travail à froid. Cette classe d'aciers est utilisée pour l'outillage à main. Les aciers au carbone doivent assurer, après trempe et revenu à basse température, une dureté élevée de l'arête tranchante des outils (60 à 65)HRC, nettement supérieure à celle du métal usiné, ainsi qu'une bonne tenue à l'usure pour conserver l'état de l'arête tranchante.

La faible stabilité de l'austénite surfusionnée affaiblit la pénétration de trempe des aciers à outils au carbone. La pénétration de trempe totale lors du refroidissement à l'eau ne s'obtient que pour des dimensions inférieures à (10 à 12) mm des outils.

C'est pourquoi les nuances contenant entre 0,5 et 1,2 % de carbone, s'emploient généralement pour des outils de petites dimensions (limes, forets aléseurs, ...)

Dans le cas où les outils subissent en service des charges dynamiques, il est recommandé d'utiliser des aciers hypoeutectoïdes et eutectoïdes traités thermiquement, de manière à obtenir une structure de type troostite.

Pour les outils, (comme les fraises, tirets, scies, grattoirs, ...), on emploie des aciers hypereutectoïdes (1 à 1,3) % C traités et à structure composée de martensite et de carbures.

Les aciers au carbone présentent les avantages suivants :

- Prix modéré.
- Faible dureté et bon usinage à l'état recuit.
- Bonne aptitude à la transformation à l'état recuit.

Quelques nuances d'aciers à outils de la classe 1, avec des exemples d'applications, sont exposées dans le tableau ci-après.

Nuances AFNOR	Température moyenne (°C)			Dureté HRC	Applications
	Recuit	Trempe	Revenu		
XC 50	750 à 780	830 E	150 à 300	54	Outils de forage, fourches, râpeaux.
XC 60	750 à 780	825 E 850H	200 à 300	60 à 63 60 à 62	Petites matrices, outils de chocs, barres.
XC 70	750 à 780	800 E 850 H	150 à 250	61 à 63	Scie à bois, marteaux, fers de rabots.
XC 80	750 à 780	800 E 800 H	150 à 250	63 à 64 62	Matrices, cisailles, poinçons, estampes, scies circulaires.
XC 90	750 à 780	790 E 790 H	150 à 300	63 à 64 63	Burins, tourneurs, coutellerie, matrices, chirurgie.
XC 100	700 à 750	790	150 à 250	63 à 65	Ciseaux, burins, poinçons, touches à froid
XC 110	700 à 750	780 E	150 à 250	64 à 65	Matrices à chaud, Outils pour meules.
XC 120	700 à 750	180 E	150 à 250	65	Calibres, jauges, burins, outils à bois.
Recuit : recuit d'adoucissement, E : eau, H : huile					

7.2.2. Aciers à outils de la classe 2

Ce sont les aciers à outils pour travail à froid. Les aciers à outils alliés pour travail à froid, de même que les aciers à outils au carbone ne sont pas très résistants, et de ce fait, sont employés pour la coupe des matériaux relativement doux et à de faibles vitesses de coupe, la température en service ne dépasse pas 2350°C.

Les aciers à outils alliés au chrome, vanadium, molybdène, ... font preuve d'une grande stabilité de l'austénite surfusionnée et par suite d'une grande pénétration de trempe. Le traitement thermique comporte une trempe à l'huile et un revenu à 200°C afin de réduire les déformations et les gauchissements des outils. Les aciers à outils pour travail à froid sont de plusieurs sortes.

7.2.2.1. Aciers au manganèse et au manganèse-vanadium

Les teneurs moyennes sont de l'ordre de 0.8 % C, 2,1 % Mn et de 0 à 0,25 % V. Les aciers de cette classe sont appelés aciers indéformables. Ils ont pour principale Caractéristique, une bonne indéformabilité au traitement thermique due à une température de trempe relativement basse. On les trempe, soit à l'huile, soit au bain de sels par trempe étagée. Ils forment une solution commode pour les outils de précision et de mesure, ne demandant pas une résistance particulière à l'usure (poinçons, matrices de découpage, calibre vérificateurs, instruments de mesure, ...).

7.2.2.2. Aciers au chrome

La composition moyenne comporte les additions suivantes : (1 à 2,1) % C, (0,2 à 1,3) % Cr, (0 à 0,25) % V. Les aciers à faible teneur en chrome présentent une faible trempabilité et sont employés pour de petits outils à fabriquer en grande série (mèches, tarauds, ...), et pour des pièces demandant une bonne tenue au choc ou à la flexion (extracteurs, butées, ...).

Les nuances, à plus forte teneur en chrome (13 %) et contenant du vanadium, sont très indéformables et très résistantes à la flexion et sont destinées à la fabrication, par exemple, de filières, mandrins d'étirage, galets de formage, matrices d'extension à froid, molettes de coupes, fraises et outils à bois.

7.2.2.3. Aciers au chrome-molybdène

La composition moyenne de ces aciers comporte : (1 à 1,5) % C, (5 à 12) % Cr, (0,9 à 1,1) % Mo, (0,1 à 0,4) % V. Les aciers de ce type se déforment très peu à la trempe et sont employés pour les mêmes catégories d'outils que précédemment.

7.2.2.4. Aciers au chrome-tungstène

Ces aciers contiennent en général, les teneurs suivantes : (0,4 à 1,1) % C, 0,9 % Mn, (0,85 à 1,1) % Cr, (1 à 2) % W. Ces aciers sont d'un emploi très général, ils sont durs, tenaces et d'un assez grand pouvoir trempant. Leur application est très variée, outils coupants (forets, mèches, cisailles.), alésoirs, tarauds, filières, poinçons, matrices, etc.

7.2.2.5. Aciers au nickel-chrome

Ces aciers contiennent 0,35 % C, 1,7 % Cr, 3,75 % Ni. C'est une nuance particulière, réservée pour les outillages d'estampage à froid, comportant des gravures de grande finesse et d'un prix élevé.

7.2.3. Aciers à outils de la classe 3

Ce sont des aciers à outils pour travail à chaud. Dans cette catégorie d'aciers, on peut distinguer deux classes principales :

- Les aciers au Cr-W-Mo-V.
- Les aciers au Ni-Cr-Mo.

Quelques nuances d'aciers à outils pour travail à chaud sont mentionnées, à titre d'exemple, dans le tableau suivant :

N° d'ordre	% C	% Cr	% W	% Mo	% V	% Ni
1	0,6	0,9	1,85	0,2	0,15	-
2	0,4	5	1,3	1,4	0,4	-
3	0,3	2,5	9	0,3	0,4	-
4	0,55	0,85	-	0,45	-	1,75
5	0,4	1,5	-	0,5	-	4,3

La nuance au Cr-W, repérée sous le numéro 1 dans le tableau précédent, possède une grande résistance à l'état traité, une haute limite de fatigue notamment aux chocs répétés et une bonne stabilité au revenu jusqu'à 500°C. On l'emploie comme outillage travaillant aux chocs à des températures moyennes : poinçons de perçage, lames de cisailles à chaud, petites matrices diverses.

La deuxième nuance qui contient 5 % Cr, est un acier indéformable pour outillage travaillant à chaud. Il est réservé aux emplois demandant à la fois une haute résistance à la compression et une bonne tenue aux chocs thermiques entre 300 et 600°C.

La troisième nuance contenant une très forte teneur en tungstène (9 %), est caractérisée par une grande dureté et une bonne tenue à l'usure. Cet acier peut être utilisé jusqu'à la température de 650°C.

Les deux autres nuances au nickel-chrome-molybdène ont une excellente pénétration de trempe et sont employés pour les grosses matrices d'estampage à chaud.

7.2.4. Aciers à outils de la classe 4

Cette classe contient les aciers à coupe rapide. Les aciers à coupe rapide ou simplement les aciers rapides sont caractérisés par :

- Une bonne tenue à chaud.
- Une bonne dureté.
- Une résistance mécanique et une tenue à l'usure élevée.
- La propriété de garder la structure martensitique à chaud à 600°C.

L'utilisation des aciers de coupe par rapport aux aciers à outils ordinaires, permet d'augmenter sensiblement la vitesse de coupe de 2 à 4 fois et la tenue de l'outil de 10 à 30 fois.

L'élément d'alliage principal est le tungstène. Plus la teneur en tungstène est élevée, plus les qualités de coupe de ces aciers sont meilleures et ceci jusqu'à environ 23%. Au delà de cette teneur, le tungstène semble n'avoir aucun effet.

Les teneurs en chrome sont en général, de l'ordre de 4 à 4,5 %. Le molybdène peut remplacer le tungstène et la tenue à chaud de ces aciers s'améliore en présence de vanadium et de cobalt.

Les aciers rapides contiennent des carbures lédéburitiques. A l'état recuit, ils sont constitués de ferrite alliée et de carbures de type M_6C , $M_{23}C_6$, MC , M_3C dont le principal acier dans les aciers rapides est le M_6C , la ferrite comporte la plus grande partie dissoute de chrome.

La structure d'un acier moulé comporte un eutectique complexe qui ressemble à la lédéburite et qui se dépose aux joints de grains.

Pour assurer une bonne tenue à chaud, les outils rapides sont soumis à une trempe de 1200 à 1300°C pour avoir une meilleure dissolution des carbures secondaires, et obtenir au chauffage, de l'austénite hautement alliée au Cr, W, Mo, et V. Ceci assure, après trempe, une structure martensitique à haute stabilité, donc une bonne tenue à chaud. La trempe est suivie d'un revenu multiple à haute température.

Les nuances commerciales d'aciers rapides peuvent se classer comme suit.

7.2.4.1. Aciers rapides courants

Ces Aciers sont aussi appelés "aciers 18-4-1" et ils contiennent environ 18 % W, 4 % Cr, 1 % V. Ils sont employés pour les outils coupants à grande vitesse (forets, tarauds, alésoirs, ...), ainsi que pour le petit outillage demandant une grande résistance à l'usure à chaud et sans chocs thermiques (matrices spéciales, filières,..).

7.2.4.2. Aciers rapides au tungstène-molybdène

La teneur moyenne de ces aciers est de 6 % W, 6 % Mo, 4 % Cr et 2 % V. Le molybdène remplace, en partie, le tungstène. Une teneur donnée de molybdène peut remplacer une teneur, à peu près, double de tungstène.

7.2.4.3. Aciers extra-rapides

Ces aciers contiennent en moyenne 18 % W, 4 % Cr, 1 % Mo et 2 % V. Ils sont utilisés pour outils de finition devant présenter des arêtes aiguës et une grande constante de profil (peignes à fileter les tubes, fraises, broches, alésoirs, ...).

7.2.4.4. Aciers rapides spéciaux au cobalt

Ce sont des aciers rapides qui contiennent, en plus de la teneur moyenne, environ entre 2 et 15 % Co. Ils sont destinés à être utilisés dans des conditions de travail très sévères.

- Usinage de métaux durs (aciers traités, fontes trempes).
- Vitesses de coupes très élevées (tours automatiques, tours à barres).
- Section du copeau forte (dégrossissage, rabotage).

7.2.4.5. Aciers rapides à haute teneur en vanadium

La teneur en vanadium atteint 5 %. Le carbure de vanadium est à l'origine de la supériorité de ces aciers, en ce qui concerne, la tenue à la coupe.

7.2.4.6. Aciers au molybdène-cobalt

Ce sont des aciers à coupe rapide; de dureté exceptionnelle (59 à 70) HRC, permettant d'usiner les alliages à haute résistance massique et les alliages réfractaires.

Dans les tableaux suivants, nous avons rapporté quelques nuances d'aciers rapides :

- Aciers rapides au tungstène.
- Aciers rapides au molybdène.

a. Aciers rapides au tungstène :

Analyse		HB état recuit	Rm (dan/mm ²)	Applications	Matériaux
Elément	%				
C	0,8	235	80	Tarauds, fraises à fileter, mèches hélicoïdales.	Aciers avec Rm<90 daN/mm ²
W	18,5	-	-		
V	1,0	277	95		
C	0,8	235	80	Outils soumis à de gros efforts, grandes vitesses de coupe, fortes passes	Aciers, fontes à résistance élevée, acier moulé, fonte malléable.
W	18,5	-	-		
Mo	0,8	277	95		
V	1,7				
Co	5,0				
C	0,75	277	95	Outils pour conditions de travail sévères, dégrossissage.	Moulage des aciers, aciers inoxydables au Cr-Ni.
W	18,5	-	-		
Mo	0,8	321	110		
V	1,7				
Co	10,0				

a. Aciers rapides au molybdène :

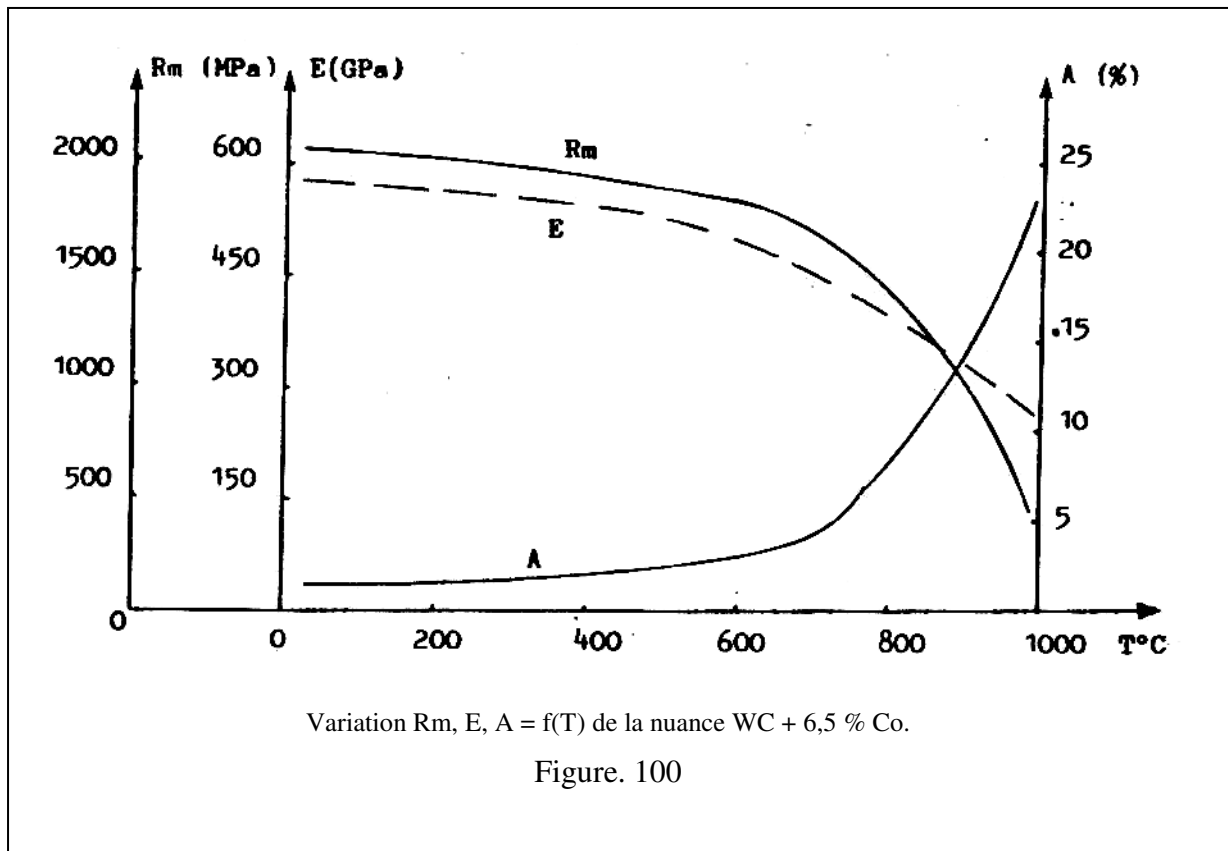
Analyse		HB état recuit	Rm (dan/mm ²)	Applications	Matériaux
Elément	%				
C	1,2	235	90	Outils soumis à des contraintes élevées, dégrossissage et finition sur tours.	Aciers austénitiques et alliages de grande résistance.
W	9,5	-	-		
Mo	4,0	277	95		
V	3,5				
Co	10,5				
C	0,8	235	90	Scies à métaux, scies circulaires, mèches hélicoïdales.	Aciers de résistance Rm < 90 daN/mm ²
W	6,7	-	-		
Mo	5,2	277	95		
V	2,0				
C	0,8	235	90	Outils extra-tenaces : tarauds, mèches.	Aciers de résistance Rm < 90 daN/mm ²
W	2,0	-	-		
Mo	9,2	277	95		
V	1,3				
C	1,2	240	90	Fraises, alésoirs, roulettes à découper, à racler	Aciers, fontes, bronzes, laitons, alliages d'aluminium.
W	6,5	-	-		
Mo	5,2	300	95		
V	3,5				

7.2.5. Carbures métalliques à outils

On appelle carbures métalliques, les alliages constitués de tungstène et de titane, alliés au cobalt. Les carbures de tungstène WC et de titane TiC, très durs et fragiles sont agglomérés par une phase ductile de cobalt.

Les carbures métalliques contiennent en général (85 à 36) % WC, (6 à 60) % TiC et (3 à 25) % Co. La dureté et la tenue à l'usure des carbures métalliques restent importantes jusqu'à 800°C. Ils permettent de travailler avec une arête tranchante échauffée jusqu'à des températures plus élevées que dans le cas des aciers à outils, (fig. 100), ce qui veut dire qu'ils peuvent être utilisés à des vitesses de coupe plus grandes.

Les alliages au titane-tungstène s'emploient essentiellement pour l'usage des aciers au carbone et alliés. Ils sont élaborés sous forme de plaquettes fixées aux supports, généralement en acier ordinaire, non pas par fusion, mais par frittage. A cet effet, les poudres TiC et WC, finement broyées (1 à 3) μm et mélangées à du cobalt pulvérisé dans des proportions bien définies, sont compactées puis elles sont frittées vers 1500°C.



7.3. Aciers et alliages spéciaux

Cette partie du chapitre est consacrée à quelques aciers et alliages ayant des propriétés physiques particulières et dont les caractéristiques mécaniques présentent un intérêt secondaire.

7.3.1. Aciers et alliages à aimants

On distingue trois groupes d'aciers et alliages : durs, doux et amagnétique.

7.3.1.1. Aciers et alliages magnétiques durs

L'énergie nécessaire pour inverser l'aimantation d'un matériau ferromagnétique est proportionnelle au produit de l'induction rémanente B_r et la force coercitive H_c . Dans les métaux ferromagnétiques, la grandeur B_r est définie par la saturation magnétique, par conséquent, pour accroître l'énergie magnétique, il faut augmenter H_c . Pour augmenter la force coercitive, il faut que la structure de l'alliage comporte des défauts de structure (lacunes, dislocations, blocs, ...), qui constituent une distorsion du réseau cristallin.

Pour la fabrication des aimants, on utilise les aciers à haut carbone, environ 1 % C, additionnés de chrome, de tungstène, de cobalt, ... Ces aciers se prêtent bien à l'usinage et au corroyage, mais possèdent une énergie magnétique relativement faible. Ainsi, on les utilise pour les aimants peu importants. Les alliages les plus importants dans l'industrie des aimants sont ceux à base des éléments de transition Fe, Co et Ni, additionnés également de Cu, Al, Co, Ti, Nb, pour augmenter la force coercitive. Ces alliages sont durs et fragiles, donc ils ne se déforment pas. Les aimants s'obtiennent selon la forme par moulage, suivi de rectification.

Pour obtenir des propriétés magnétiques élevées de ces alliages, on procède au chauffage vers 1200 à 1300°C, puis d'une trempe à une vitesse propre pour chaque type d'alliage, suivie d'un revenu vers 550 à 650°C.

7.3.1.2. Aciers magnétiques doux

Ces aciers sont employés dans le domaine de l'électrotechnique. Les aciers à faible teneur en carbone (0,05 à 0,005) %, et contenant du silicium (0,8 à 4,8) %, sont très employés pour les tôles magnétiques. ils doivent avoir :

- Une faible force coercitive H_c .
- Une haute perméabilité magnétique.
- Des pertes par hystérésis très faibles.

Pour avoir ces caractéristiques, le matériau ferromagnétique doit avoir une structure homogène (solution solide ou métal pur), et doit être purifié des impuretés et des inclusions telles que la cémentite, l'oxygène et le soufre. Le matériau doit être complètement recristallisé (vers

1200°C), afin d'éviter les effets de l'écroutissage (forte réduction du paramètre μ et accroissement de H_c).

Le silicium forme avec le fer une solution solide, ce qui permet d'augmenter la résistance électrique, et donc de diminuer les pertes de courants tourbillonnaires. De plus, le silicium augmente la perméabilité magnétique, abaisse quelque peu la force coercitive et les pertes par hystérésis.

L'estampage à froid, la coupe, l'enroulement des noyaux à tôles dégradent les propriétés magnétiques des aciers, c'est pour cela, qu'il est recommandé d'appliquer un recuit entre 750 et 790°C. L'acier pour transformateur est livré sous forme de bandes et tôles laminées à froid, et ayant une texture magnétique orientée.

a. Permalloy :

Ce sont les alliages à permittivité initiale et à permittivité maximale élevées, permettant d'obtenir une induction magnétique importante et de faibles champs. Les permalloys sont à base de nickel (40 à 80) %, et contiennent souvent du molybdène et du chrome.

b. Ferrites :

Les ferrites sont des oxydes complexes de fer et de métaux bivalents de types $nM_o.mFe_2O_3$ (où M est un métal bivalent) obtenus par agglomération de poudres. Leurs caractéristiques sont essentiellement la résistivité élevée (10^3 à 10^7) Ωcm et la magnétisation de saturation relativement faible.

Les ferrites s'emploient dans le cas des hautes fréquences et des hyperfréquences lorsque l'utilisation des ferromagnétiques devient impossible par les grandes pertes en énergie électromagnétique. Elles servent en radio-électronique et en radiotechnique pour la fabrication des antennes à tiges magnétiques, des noyaux des amplificateurs, etc. Les ferrites en $MgO-MnO-Fe_2O_3$ servent de mémoires d'ordinateurs.

7.3.2. Aciers et alliages pour éléments chauffants

La présence d'une solution solide dans un alliage favorise l'obtention d'une haute résistance électrique. Les aciers et alliages prévus comme éléments chauffants, doivent posséder une bonne tenue à l'oxydation à chaud et une résistance suffisante au chauffage pour pouvoir conserver en service leurs formes.

On emploie, le plus souvent, les aciers au chrome-aluminium à basse teneur en carbone de type ferritique (fechral et chromal). Plus la teneur en chrome et en aluminium est élevée, meilleures sont les caractéristiques des éléments de chauffage. Les aciers au Cr-Al sont peu plastiques, ainsi pour en faire des éléments, le métal doit être chauffé vers 200 à 350°C, suivant les dimensions des pièces.

Nous avons déjà noté que les alliages au nickel ont une haute résistance électrique par formation de solution solide. Parmi ces alliages, il y a essentiellement les alliages au nickel-chrome, appelés "nichromes". Pour réduire le prix des nichromes et conserver ou améliorer les caractéristiques de résistance, une partie du nickel est remplacée par du fer, ces alliages s'appellent "ferronichromes" et sont utilisés à 950 ou 1000°C. Les nichromes sont employés aussi bien pour la fabrication des ustensiles de ménage, que des éléments de chauffage des fours électriques

7.3.3. Alliages aux propriétés dilatométriques

Ce sont des alliages à base de Fe-Ni, très employés dans la construction mécanique et surtout dans la construction des appareils. Le coefficient de dilatation " α " entre -100°C et +100°C, diminue brusquement lorsque la teneur en nickel augmente jusqu'à 36 % et il s'accroît par la suite, si la teneur continue à augmenter. Ce comportement est largement exploité en technique.

Ainsi les éléments des machines et des appareils devant conserver des dimensions constantes entre -100 et +100°C se font en alliages austénitiques (% C < 0,05 et 36 % Ni), appelés "elvar". Ces alliages, dont le coefficient de dilatation $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ est constant dans l'intervalle de température (-50 à +100)°C, sont utilisés comme étalons de longueur en métrologie, comme pièce dans certains appareils de mesures géodésiques.

6.3.4. Aciers et alliages aux propriétés élastiques particulières

Les éléments élastiques des appareils et de mécanismes, doivent être constitués par des matériaux ayant :

- De hautes propriétés élastiques.
- Une bonne plasticité.
- Un module élastique constant dans une large gamme de température.
- Une bonne résistance à la corrosion.
- Etc.

Les matériaux les plus utilisés sont les métaux non-ferreux (laitons, bronzes, ...) et les alliages austénitiques au Fe-Cr-Ni et au Co-Cr-Ni. Pour la fabrication des éléments élastiques, très sensibles, concernant les appareils de précision, (membranes, soufflets, spiraux de montre, etc.), on utilise les alliages ‘elvar’ au Ni-Cr-Ti à durcissement structural, et dont les propriétés mécaniques moyennes sont :

- Après trempe à 950°C à l'eau :
 - $R_m = 700 \text{ N/mm}^2$.
 - $A = 50 \%$.
- Après vieillissement à 700°C :
 - $R_m = 1250 \text{ N/mm}^2$.
 - $R_c = 800 \text{ N/mm}^2$.
 - $A = 20 \%$.

7.4. Classification des fontes

Les alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2,14 % s'appellent fontes. Outre ces deux éléments, elles contiennent essentiellement du Si, Mn, P, S, dans le cas des fontes non alliées et de plus du chrome, du molybdène, de l'aluminium, etc., dans le cas des fontes alliées.

Dans une fonte, le carbone peut se présenter sous deux formes :

- Cémentite : l'aspect de la cassure est clair d'où l'appellation de fonte blanche.
- Graphite : l'aspect de la cassure est gris d'où l'appellation de fonte grise.

Par rapport aux aciers, les fontes ont des propriétés mécaniques relativement médiocres et sont souvent utilisées en fonderie à cause :

- De leur température de solidification relativement basse.
- De leur intervalle de solidification réduit.
- De leur très faible retrait lors de la solidification.
- De leur difficulté d'usinage.

D'après la forme du graphite et les conditions de sa formation, les fontes sont classés de la façon suivante :

- Fonte blanche.
- Fonte grise.
- Fonte à graphite sphéroïdal.
- Fonte malléable.

Le tableau ci-dessous indique certaines nuances de ces fontes.

Variété	Nuance	R mini (daN/mm ²)	Re (daN/mm ²)	A (%)	Dureté (HB)
Fonte grise de moulage (A.32.101)	Ft 10	10	0,8 à 0,9 R	0,5 à 1	150 à 300
	Ft 15	15			
	Ft 20	20			
	Ft 25	25			
	Ft 30	30			
	Ft 35	35			
	Ft 40	40			
<p>Propriétés : matériau économique, se moulant bien, résistant à la compression, peu oxydable, s'usinant bien, de faible coefficient de frottement, mais cassant.</p> <p>Emplois : pièces moulées courantes, bâtis, carters, organes de transmission, cylindres, pistons, coulisseaux, vannes, etc.</p> <p>Ft 30 à 40 : fonte à haute résistance, s'usinant plus difficilement.</p>					
Fonte malléable (A .32.701, 702, 703)	MB 35-7	35	22	7	≥ 150
	MB 40-10	40	25	10	
	MN 32-8	32	21	8	
	MN 35-10	35	23	10	
	MN 38-18	38	25	18	
	MP 50-5	50	33	5	170 à 300
	MP 60-3	60	40	3	200 à 245
	MP 70-2	70	50	2	240 à 285
<p>Propriétés : bonne résistance mécanique, malléable, soudable (pour MB seulement), se moulant bien.</p> <p>Emplois : pièces de formes complexes, de forgeage impossible, exemples : quincaillerie, machines agricoles.</p>					
Ît, E ² Fonte à graphite	FGS 800-2	80	48	2	248 à 352
	FGS 700-2	70	42	2	229 à 302
	FGS 600-3	60	37	3	192 à 269
	FGS 500-7	50	32	7	170 à 241

sphéroïdal	FGS 400-12	40	25	12	≤ 201
	FGS 370-17	37	23	17	≤ 179
Propriétés : bonne résistance mécanique, se moulant bien, s'usinant facilement, malléable après recuit de stabilisation, trempe possible. Emplois : les mêmes emplois que la fonte grise, mais pièces plus résistantes et plus légères. Exemples : cylindres de laminoirs, vilebrequins, pompes, etc.					

7.4.1. Fontes blanches

La majorité du carbone se trouve sous forme de cémentite, ce qui donne à la cassure une couleur claire spécifique, c'est pourquoi elle est dite blanche. Elle est caractérisée par des teneurs en carbone et au silicium relativement faibles et par une teneur élevée en manganèse. Elle est constituée de perlite et de cémentite :

- Fonte hypoeutectique : lédéburite + perlite + cémentite.
- Fonte hypereutectique : lédéburite + cémentite + cémentite primaire.

Ces fontes sont obtenues lorsque le refroidissement est assez rapide et la température de coulée est assez basse. La cémentite n'a pas de temps pour se décomposer et l'on obtient une fonte sans graphite. Ces types de fontes sont obtenues dans le haut fourneau et sont généralement utilisés pour l'élaboration de l'acier ou de la fonte grise.

La fonte blanche présente un retrait élevé, ce qui oblige à prévoir des formes simples des sections uniformes sous angles vifs. Les caractéristiques physiques et mécaniques moyennes des fontes blanches brutes et coulées sont les suivantes :

- Masse volumique : (7,5 à 7,8) g/cm³.
- Coefficient de dilatation à (0 à 300)°C : (9 à 11).10⁻⁶.
- Résistivité électrique : 80 $\mu\Omega$ cm.
- Résistance à la corrosion : (200 à 400) N/mm².
- Résistance à la compression : (1500 à 1800) N/mm².
- Module d'élasticité : (168000 à 183000) N/mm².
- Résistance à la flexion : (350 - 750) N/mm².
- Dureté Brinell (350 à 500).
- Retrait de moulage (13 à 21) mm/m.

La fonte blanche est parfois appelée "fonte trempée" car elle présente un état trempé (hors d'équilibre) par rapport à la fonte grise (état stable). La fonte blanche est obtenue par un moulage en coquille métallique entraînant un refroidissement plus rapide. Ainsi, l'extérieur de la pièce est en fonte blanche (12 à 40) mm alors que le cœur est en fonte grise. Ces deux parties sont séparées par une zone mixte en fonte truitée.

Les principaux domaines d'emploi des fontes blanches sont les suivants :

- Galets de dressage, cylindres de broyage, boulets.
- Blindage des broyeurs, pièces de pompes, de ventilateurs.
- Cames, poussoirs, guides.
- Rouleaux pour le travail des métaux, du caoutchouc et des matières plastiques.

Pour obtenir des pièces en fontes blanche, légèrement plus dure qu'à l'état brut, on utilise des additions modérées de nickel, chrome ou de nickel-chrome. La dureté atteint jusqu'à 600 HB. Si l'emploi des fontes blanches, exige des caractéristiques de résistance à la chaleur et aux corrosions sévères, on ajoute jusqu'à 35 % Cr, (supports des pièces du four de recuit, pièces de moteurs diesel, de chaudières, d'échangeurs).

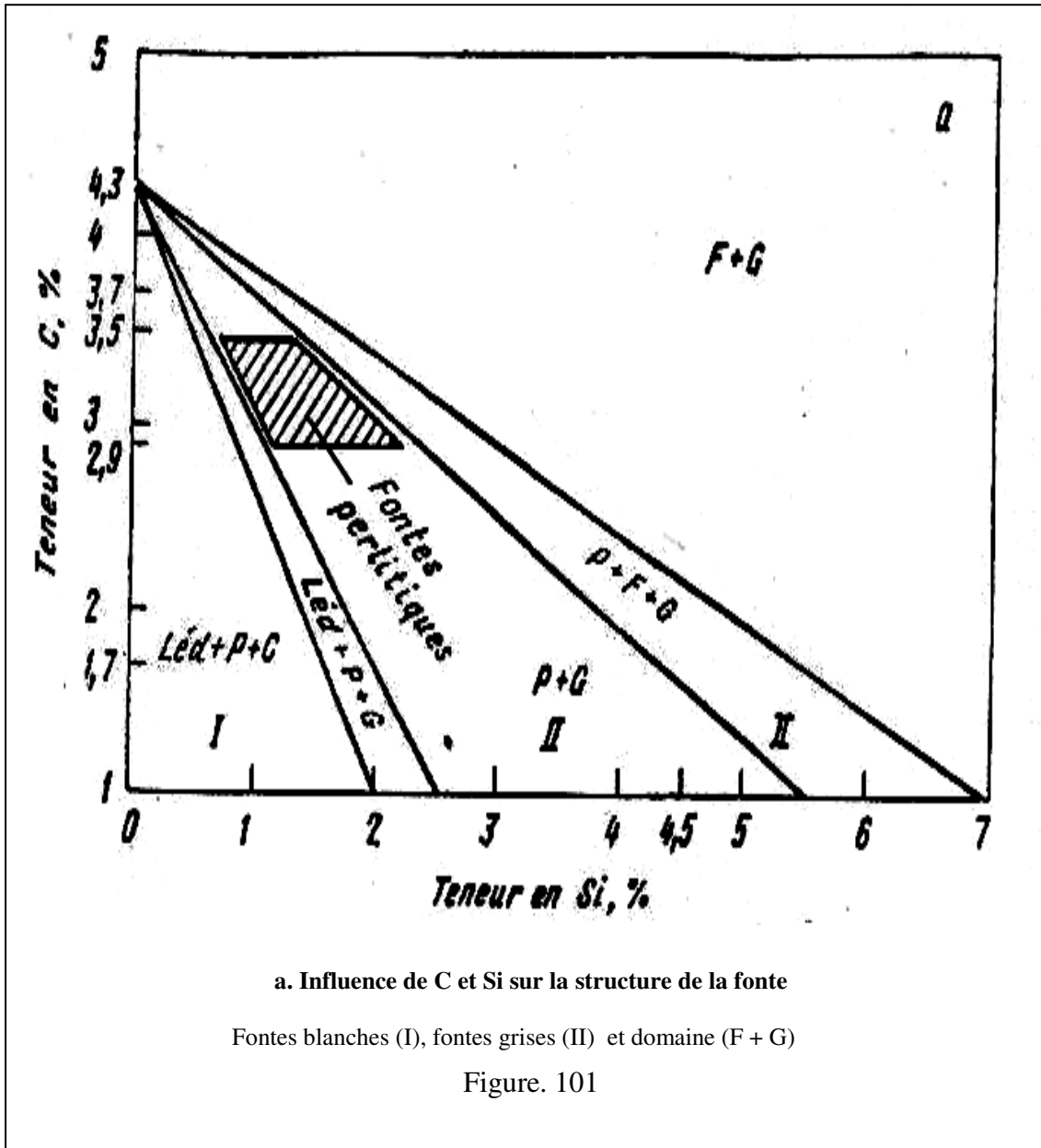
7.4.2. Fontes grises

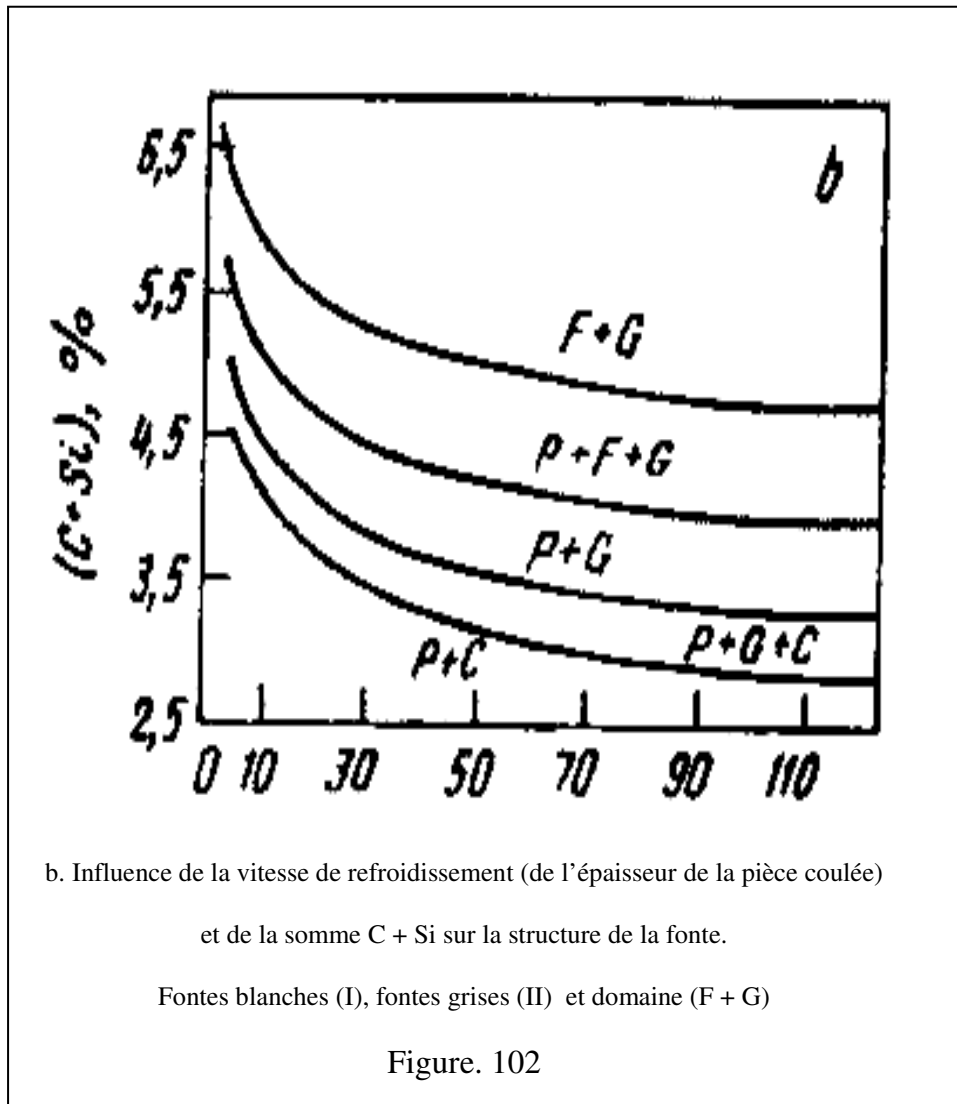
La dénomination de fonte grise, fait allusion à l'aspect de la cassure grise. Dans ce type de fonte, la majeure quantité du carbone se trouve sous forme de graphite. Au fond, c'est un alliage Fe-C-Si, contenant comme impuretés inévitables du Mn, S et P.

Une coupe métallographique montre que le graphite se présente sous formes de lamelles, ce qui caractérise particulièrement ces fontes, et ce qui détermine leurs propriétés principales. Les plus utilisées sont les fontes hypoeutectiques, titrant de 2,4 à 3,8 % C, plus cette teneur est grande, plus il se forme du graphite et plus les propriétés mécaniques de la fonte sont faibles.

Le silicium dont la teneur dans les fontes grises varie le plus souvent de 1,2 à 3,5 % influe fortement sur leur structure et par suite sur leurs propriétés. L'introduction du silicium diminue la solubilité du carbone dans le fer; il en résulte que le domaine de l'austénite se rétrécit. Le silicium favorise la graphitisation et agit dans le même sens que le ralentissement du refroidissement. En modifiant d'une part la teneur en carbone et de l'autre, la vitesse de refroidissement, on peut obtenir des matrices métalliques à structure différente.

Le diagramme structural des fontes, traduisant la structure des pièces moulées aux parois de 50 mm d'épaisseur en fonction de la teneur en silicium et carbone est représenté sur la figure 28, ci-dessous. La teneur en carbone étant donnée, plus le titre de silicium est élevé, plus le processus de graphitisation est complet. Plus la teneur en carbone est grande, il faut moins de silicium pour obtenir une structure donnée, (fig. 101).





La quantité de carbone liée par la cémentite détermine l'existence des types suivants de fontes et bien sûr selon la teneur en silicium. La structure de ces fontes est donnée par la figure 103

a. Fonte demi-truitée :

La fonte demi-truitée est celle dont la plus grande partie du carbone (> 0,8 %), se trouve sous forme de Fe_3C , et dont la structure est composée de : lédéburite + perlite + graphite lamellaire.

b. Fonte grise perlitique :

Les 0,7 à 0,8 % C de cette fonte se trouvent sous forme de cémentite qui fait partie de la perlite et dont la structure se compose de : perlite + graphite lamellaire.

c. Fonte grise ferrito-perlitique :

La décomposition de la cémentite eutectoïde détermine pour cette fonte la teneur en carbone lié, qui varie de 0,1 à 0,7 %. La structure étant : perlite + ferrite+ graphite lamellaire

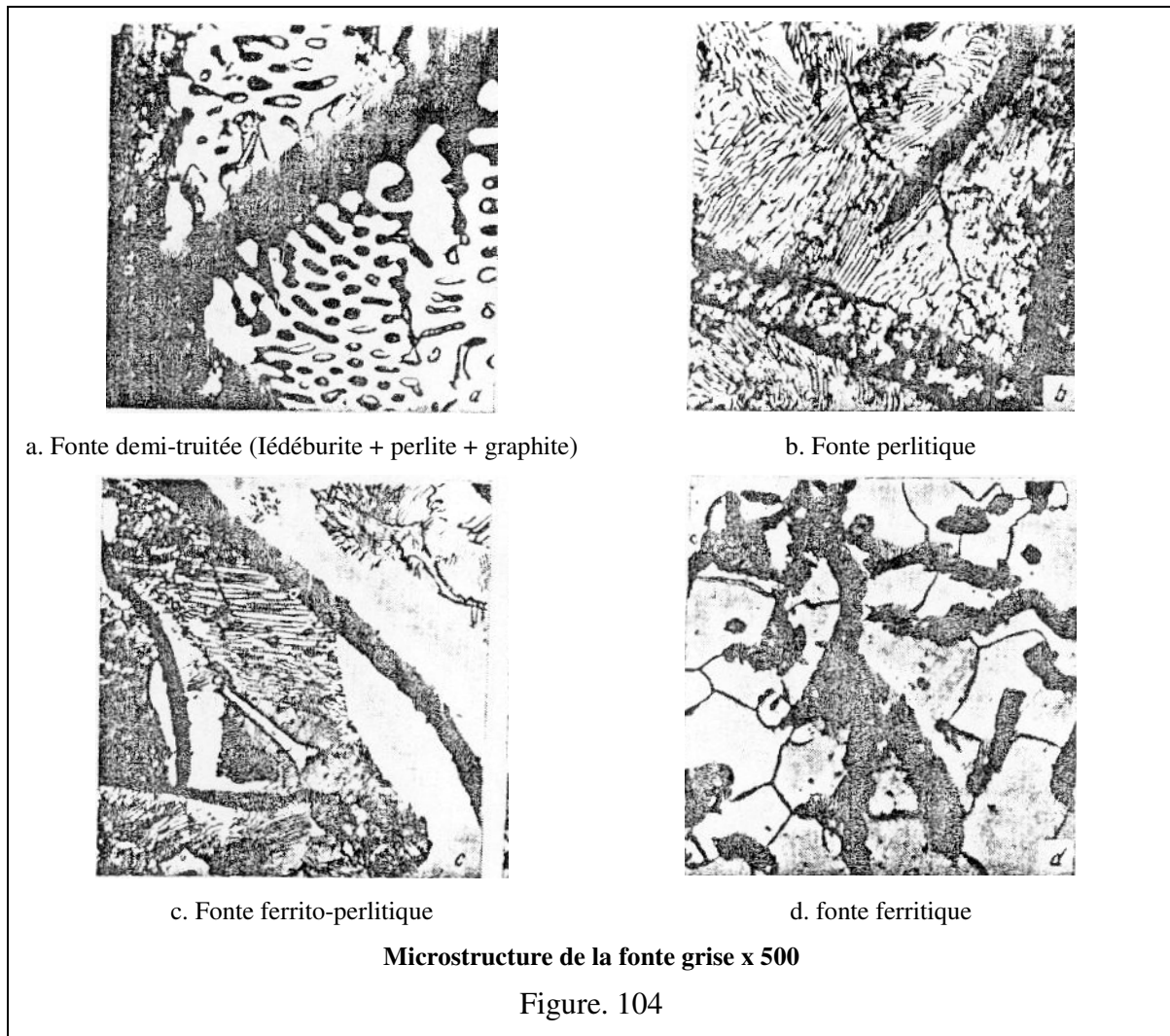
d. Fonte grise ferritique :

Dans ce cas, tout le carbone se trouve sous forme de graphite et la structure est composée de :

ferrite + graphite lamellaire

La figure 104, ci-dessous, présente des structures de fontes :

- Fontes demi-traitées.
- Fontes perlitiques.
- Fontes ferro-perlitiques.
- Fontes ferritiques.



Il est évident que pour des teneurs données en carbone et en silicium, la graphitisation est d'autant plus complète que le refroidissement des fontes est plus faible.

La taille et la répartition de inclusions de graphite jouent un rôle important dans la résistance des fontes grises. Plus la taille et la quantité de ces inclusions sont faibles, plus la résistance est élevée. D'une manière générale, les lamelles de graphite diminuent la résistance à la rupture et tout particulièrement la plasticité de la fonte grise ($A < 0,5 \%$).

Les discontinuités produites par les lamelles de graphite dans le métal de base, rendent la fonte peu sensible aux concentrateurs de contraintes (entailles, défauts de surface, gorge, etc.). Le graphite a une action lubrifiante qui améliore la tenue à l'usure et les propriétés antifrictions de la fonte.

Il est commode de caractériser la vitesse de refroidissement d'après l'épaisseur des parois des pièces à mouler. Plus les parois de ces dernières sont minces, plus le refroidissement est rapide et plus la graphitisation est faible. Par conséquent, pour les pièces à mouler de petites sections, pour lesquelles le refroidissement est rapide, ou pour une fonte à faible teneur en carbone, le titre de silicium doit être augmenté. Par contre, lorsque les pièces à mouler sont épaisses, et par suite leur refroidissement plus lent, la graphitisation est plus complète et la teneur en silicium peut être plus faible.

Le manganèse entrave la graphitisation en rendant plus difficile le dégagement du graphite et accroît l'aptitude de la fonte à la trempe, c'est à dire la constitution surtout dans les couches superficielles de la structure d'une fonte blanche ou truitée.

Le soufre apporte aux éléments qui ralentissent sensiblement la graphitisation sa contribution et provoque le grossissement des lamelles de graphite. C'est une impureté nocive qui altère les propriétés mécaniques et la coulabilité de la fonte (teneur maxi 0,1 à 0,12 %).

Le phosphore n'influe pas sur la graphitisation, sa teneur dans les fontes grises ne doit pas dépasser 0,2 %, mais parfois on admet même 0,4 à 0,5 %. Le phosphore améliore la coulabilité de la fonte par l'intermédiaire de l'eutectique qui s'est formé.

7.4.3. Fontes à graphite sphéroïdal

Comme il a été déjà noté que le graphite lamellaire rend la fonte fragile. Ainsi, pour améliorer la résistance mécanique de la fonte grise, on ajoute des éléments d'addition tels que le Ni, Cr, Mn ou bien on cherche à améliorer l'effet du graphite sphérique. Dans ce cas, la fonte est appelée fonte à graphite sphéroïdal.

La fonte à graphite sphéroïdal s'obtient par addition de magnésium à la fonte liquide. La composition chimique moyenne de cette fonte est comme suit :

- C : (3,2 à 3,6) %.
- Si : (1,8 à 3) %.
- Mn : (0,3 à 0,4) %.
- P \approx 0,05 %.

L'introduction de silicium, jusqu'à 3 % environ, augmente le pouvoir graphitisant de la fonte liquide et celle du magnésium, jusqu'à 0,07 % environ, joue un rôle d'inhibiteur, mais de courte durée, en retardant la formation initiale du graphite.

A l'état brute de la coulée, la fonte à graphite sphéroïdal présente une structure perlitique, ferritique ou à cémentite libre. Elle est caractérisée par une résistance mécanique et une ductilité bien plus grande que celles des fontes grises usuelles. La facilité d'usinage est excellente. C'est en somme, un matériau intermédiaire entre la fonte grise et l'acier moulé.

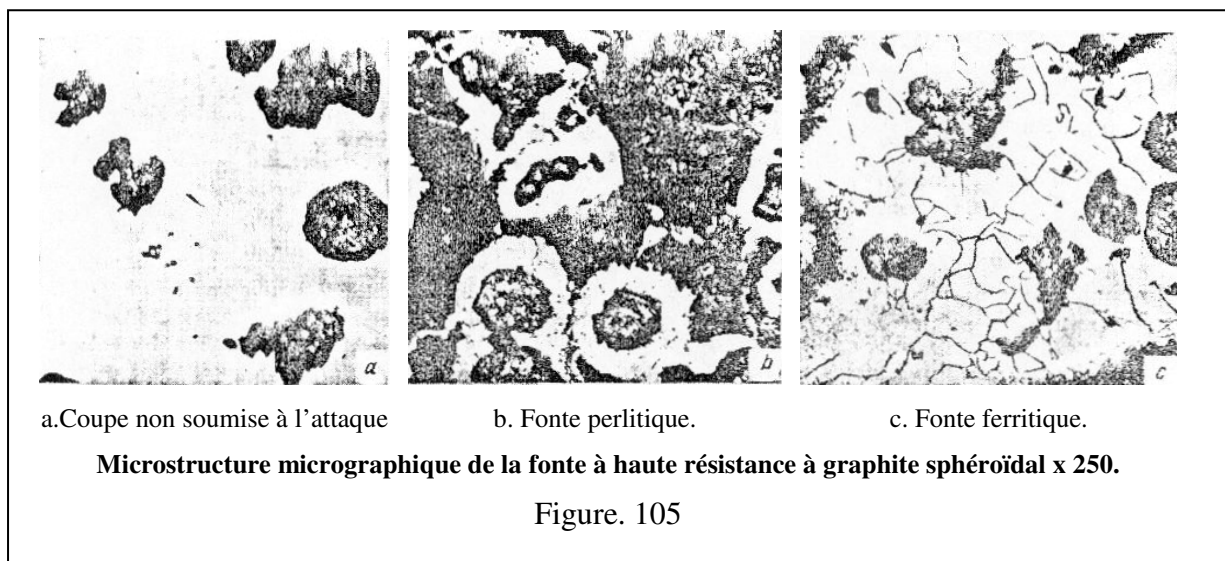
Dans le tableau ci-dessous, nous avons porté à titre de comparaison, quelques caractéristiques mécaniques moyennes des fontes et celles de l'acier doux moulé.

Nuance	Dureté (HB)	Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)
1. Fonte grise lamellaire	200	200	160	-
2. Fonte blanche non alliée	420	300	-	-
3. Fonte malléable ferritique	140	360	120	-
4. Fonte malléable perlitique	200	530	370	6
5. Fonte à graphite sphéroïdal	260	700	500	3
6. Acier doux moulé	135	450	270	18

La fonte à graphite sphéroïdal est très utilisée dans les diverses branches de l'industrie comme :

- Pièces de construction automobiles (vilebrequins, culasses, ...)
- Pièces pour l'industrie lourde (cylindres de laminoirs, pièces pour presses, ...).
- Pièces pour l'industrie chimique et pétrolière (conduite, pompes, valves, ...).

La figure 105 représente la structure micrographique de la fonte à haute résistance à graphite sphéroïdal.



7.4.4. Fontes malléables

La fonte malléable s'obtient par le maintien prolongé aux températures élevées (recuit) des pièces en fonte blanche. Le recuit produit une graphite nodulaire déchiquetée, qui, par rapport au graphite lamellaire, diminue beaucoup moins la résistance et la plasticité de la matrice métallique.

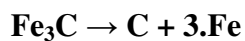
La matrice métallique d'une fonte malléable est constituée de ferrite (fonte malléable ferritique ou à cœur noir, figure 107 a) et plus rarement. de perlite (fonte malléable perlitique ou à cœur blanc, figure 107 b). La fonte malléable à cœur noir est largement employée dans l'industrie, car elle est la plus plastique.

La composition chimique d'une fonte blanche, prévue pour malléabilisation par recuit, peut varier dans les limites de tolérances suivantes : (2,5 à 3) % C, (0,7 à 1,5) % Si, (0,3 à 1) % Mn, 0,12 % S et $\leq 0,18$ P, en fonction de la structure imposée du métal de base.

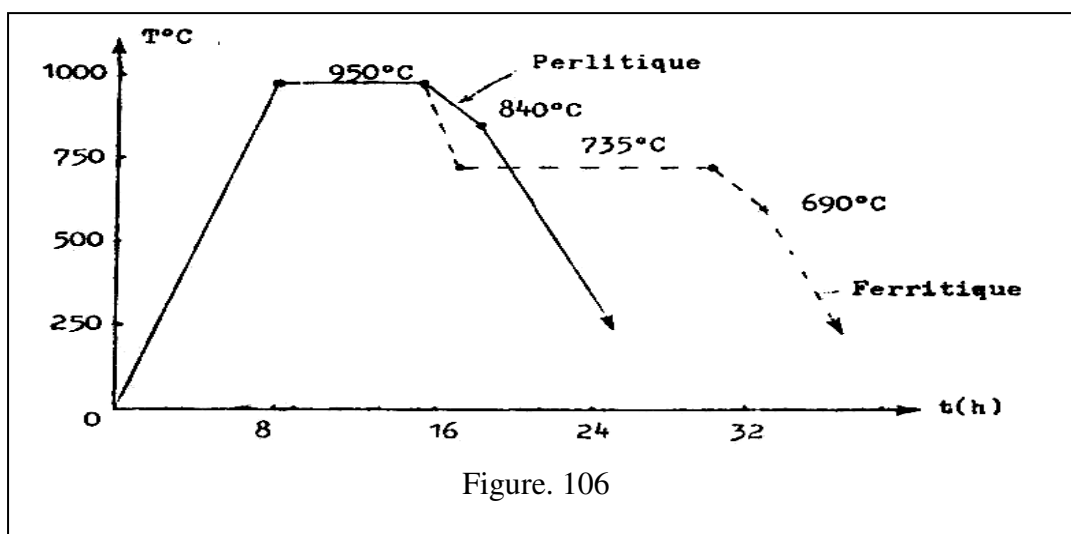
La teneur de la fonte en carbone et en silicium est réduite. Un plus faible titre de carbone améliore la plasticité du fait de la diminution de la quantité de graphite qui se dégage au recuit, - alors que la teneur en silicium élimine la précipitation éventuelle au refroidissement du graphite lamellaire dans la structure des moulages. L'épaisseur de la section des pièces coulées ne doit pas dépasser 40 à 50 mm. Lorsqu'elle est plus grande, l'âme de la pièce peut devenir le siège de formation du graphite lamellaire qui rend la fonte inapte au recuit. Il existe deux procédés pour malléabiliser les fontes. Ces deux procédés s'appliquent à des pièces de formes définitives compliquées et qui seraient difficiles à obtenir en acier (par coulée ou par forgeage). La matière à traiter, est la fonte blanche et le produit obtenu est doux et tenace. Le premier procédé, étant de loin, le plus employé.

7.4.4.1. Malléabilisation par graphitisation (fonte malléable à cœur noir)

L'opération consiste à placer les pièces en fonte blanche dans des caisses, souvent remplies de sable et chauffées jusqu' environ 950°C, avec un maintien suffisant : c'est la graphitisation primaire qui correspond à la décomposition de la cémentite contenue dans le lédéburite (A + Cm), et l'établissement d'un équilibre stable (austénite + graphite).



Le produit de la décomposition est du graphite nodulaire déchiqueté. A partir de 950°C, on peut obtenir deux types de fontes malléables.

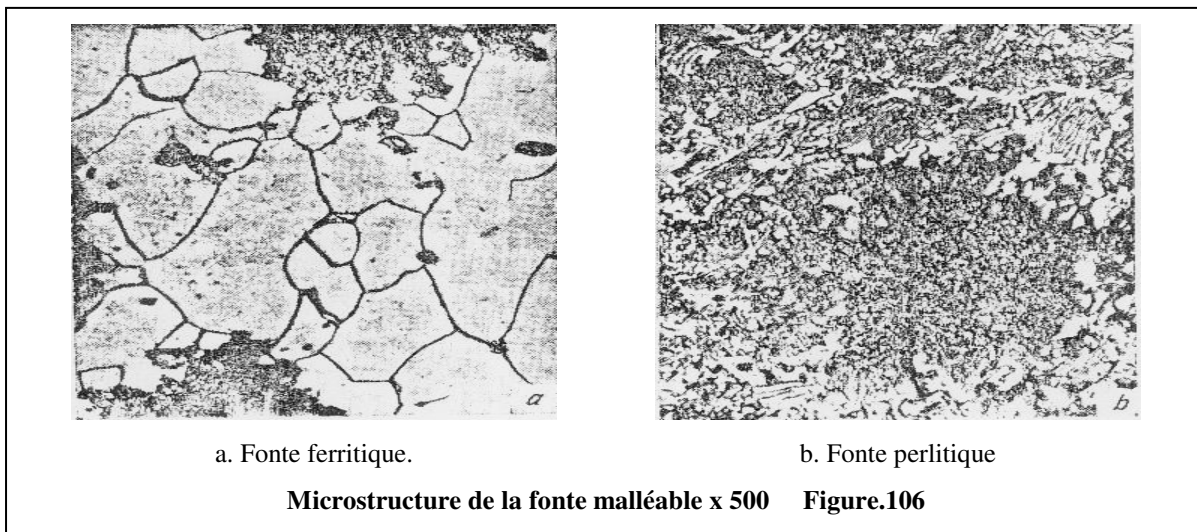


a. Fonte malléable ferritique :

On refroidit les pièces jusqu'à environ 735°C pendant 12 heures pour avoir un graphite secondaire : l'austénite se décompose en ferrite et graphite. A partir de 690°C, les pièces peuvent être refroidies à l'air.

b. Fonte malléable perlitique :

La nature de la fonte est la même, mais le mode de refroidissement est différent. La décomposition de la cémentite est suivie d'un refroidissement à l'air à partir de 840°C, on obtient ainsi une matrice entièrement perlitique pour des pièces minces (perlite + graphite).



7.4.4.2. Malléabilisation par décarburation (fonte malléable à cœur blanc)

Si dans le cas précédent de la malléabilisation par graphitisation, on procède par un traitement thermique, dans ce cas de malléabilisation par décarburation, on procède par un traitement mixte thermochimique. Il consiste à chauffer la fonte à 960°C, durant (50 à 100) heures dans un milieu oxydant constitué de minerai de fer, de manière à éliminer le carbone de la fonte sous forme de gaz.

L'oxydation du carbone se déroule comme suit :

- L'oxygène ambiant de la caisse réagit avec le carbone de la surface des pièces en donnant les gaz CO et CO₂.
- L'oxyde de carbone réagit avec le minerai de fer en donnant du CO₂.
- Le gaz CO₂ formé, agit sur le carbone de la fonte suivant la réaction :
$$C + CO_2 \rightarrow 2.CO$$

Ainsi, l'oxydation porte sur le carbone de l'austénite de la surface de la pièce et le carbone diffuse du centre vers la périphérie pour remplacer le carbone oxydé, et la cémentite entre en solution

BIBLIOGRAPHIE

1. Einführung in die werkstoffwissenschaft, Prof. Dr. W.Schatt, édition Veb Deutscher Verlag Leipzig, 1973.
2. Werkstoffkunde stahl und eisen I, Eckstein, édition Veb, Deutscher Verlag Leipzig, 1971.
3. Matériaux, J.Lignon et M.Mijon, édition librairie Delagrave, 1967.
4. Werkstoffkunde stahl und eisen II, Eckstein, édition Veb, Deutscher Verlag Leipzig, 1972.
5. Matériaux, tome 1 et 2, N.Bouaoudja, édition OPU, 1992.
6. Métallographie, Schuman, édition Veb Deutscher Verlag Leipzig, 1975.
7. Métallurgie, élaboration des métaux, C.Chaussin et G.Hilly, édition Dunod Paris, 1972.
8. Métallographie et traitements thermiques des métaux, I.Lakhtine, édition Mir Moscou, 1978.
9. Modellbau fier giesserei, édition Veb Fachbuchverlag Liepzig, 1972.
10. Giessereitechnik, R.Helmut, édition Fur Hochschulwesen Karlmarx Sstadt, 1976.
11. Technologie professionnelle générale, A.Castel et A.Dupont, édition Desfarges Paris, 1980.

SOMMAIRE

1. ETATS DE SURFACE.....	3
2. FROTTEMENT ET LUBRIFICATION.....	13
3. USURE ET PROPRIETES DES MATERIAUX.....	41
4. ELASTICITE.....	79
5. RESISTANCE DES MATERIAUX	96
6. DESIGNATION NORMALISEE DES ACIERS ET DES FONTES.....	119
7. CLASSIFICATION DES ACIERS ET DES FONTES.....	131