

## **CHAPITRE I**

### **Recherche bibliographique**

#### **1.1 Introduction**

##### **1.1.1 Friction**

Bhushan [1] a défini la friction comme la résistance au mouvement relatif entre deux corps en contact. La définition donnée par l'ASTM est la plus explicite, la force de résistance, tangentielle à la surface de séparation entre deux corps, sous une charge externe, l'un des corps bouge ou tend à bouger par rapport à l'autre. Les corps peuvent être des solides, des liquides ou gazeux.

#### **1.2 Usure des matériaux métalliques**

##### **1.2.1 Tribologie**

Dans ce chapitre, on procède à une révision bibliographique des différentes théories liées aux mécanismes de l'usure en général et l'usure abrasive en particulier. Si l'usure est principalement le sujet de cette étude, elle se trouve souvent corrélée à des notions de frottement ou de lubrification. Ce phénomène, s'inscrit dans une science plus vaste : la tribologie. (Du grec \* Tribos \*), frottements) fût tout d'abord de finie comme la science des surfaces en contacts animées d'un mouvement relatif (G. Salomon.1968 [2]).

On retrouvera la Tribologie dans les applications industrielles les plus pointues (adhérence du contact roue / rail) comme dans la vie de tous les jours (l'essuie-glace qui laisse une pellicule d'eau non homogène sur le pare-brise d'une voiture). [2]

##### **1.2.1.1 Historique**

On doit à Leonard de Vinci (XVe siècles) les premiers travaux de la Tribologie moderne et en particulier les premiers efforts pour caractériser le frottement en fonction de la charge appliquée ou de la surface de contact, mais également l'usure suivant la direction de la charge appliquée.

Dans les siècle qui suivirent, la Tribologie devient une science dans laquelle on citera les travaux marquants de Amontons [3], menant à la définition du coefficient de frottement (rapport de la force résistante au mouvement sur la charge appliquée au contact), ainsi que ceux de Belidor et Coulomb (XCIII<sup>e</sup> siècle) [3]. La Tribologie est donc un champ très nouveau de la science, le majeur parti de la connaissance étant gagné après la deuxième guerre mondiale, c'est une science jeune datant des années 70 mais elle fait partie de notre vie quotidienne. Si on veut définir un système Tribologique, c'est tout simplement un système qui contient deux ou plusieurs surfaces en contact soumises à un mouvement relatif qui est contrôlé par trois catégories de paramètres liés :

**a- Paramètres d'environnement**

- Milieu (température, humidité...)
- Lubrifiant
- Vibrations

**b- Paramètres des matériaux**

- Propriétés physico-chimiques (la microstructure, composition chimique.)
- Propriétés mécaniques (module et limite d'élasticité...)
- Propriétés thermiques (température de fusion....)
- Propriétés de surface

**c- Paramètres de fonctionnement**

Mouvement, Vitesse, Géométrie, Charge, Durée.

En terme simple, il s'avère que l'objectif pratique de la tribologie est de réduire au minimum les deux inconvénients principaux du solide en contact, le frottement et l'usure, mais ce n'est pas toujours le cas dans quelques situations, par exemple la réduction de l'usure mais pas du frottement est souhaitable dans les freins et les embrayages lubrifiés. [3]

### **1.3 Usure**

L'usure ne varie généralement pas de manière progressive en fonction des paramètres comme la vitesse, la température ou le temps. Si certaines formes d'usure sont relativement régulières, d'autres au contraire connaissent des sauts très brutaux, dans des rapports pouvant aller parfois de 1 à 100 000 ou plus, lorsque certaines valeurs critiques sont franchies. L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs, mais elle présente aussi des aspects favorables. L'affûtage d'un outil, la finition d'une surface par rectification, l'écriture de la craie sur le tableau ou du crayon sur le papier sont des exemples d'usures abrasives utiles. La plupart du temps, l'usure globale d'un mécanisme est due à plusieurs processus qui agissent simultanément, plus rarement à un processus bien défini et identifiable. L'effet de ces actions simultanées est souvent plus important que la somme des effets que l'on produirait en faisant agir séparément les divers processus, on parle parfois de « sur-additivité ». À l'opposé, certaines formes d'usure s'excluent mutuellement : par exemple, les dents s'usent principalement par carie et par abrasion, mais ces deux processus ne coexistent absolument pas, les zones abrasées ne sont jamais cariées. [4]

#### **1.3.1 Lois d'usure**

##### **1.3.1.a Loi d'ARCHARD**

Le premier travail sur l'usure date du 18<sup>ème</sup> siècle, il concernait la perte de poids de pièces de monnaie anglaises, ce n'est qu'en 1953, que la loi d'ARCHARD tente de relier la vitesse d'usure avec la vitesse de glissement et les caractéristiques mécaniques de l'un des corps en contact. Cette loi suggère que le taux d'usure par adhésion a sec exprime en perte de volume  $\Delta v$  ou de masse  $\Delta m$  par unité de distance parcourue est proportionnel à la charge appliquée divisée par la dureté des matériaux et à la vitesse de glissement, la loi d'ARCHARD s'écrit sous la forme: [5]

$$\Delta v = K * (F_N / H) * L \quad (2-1)$$

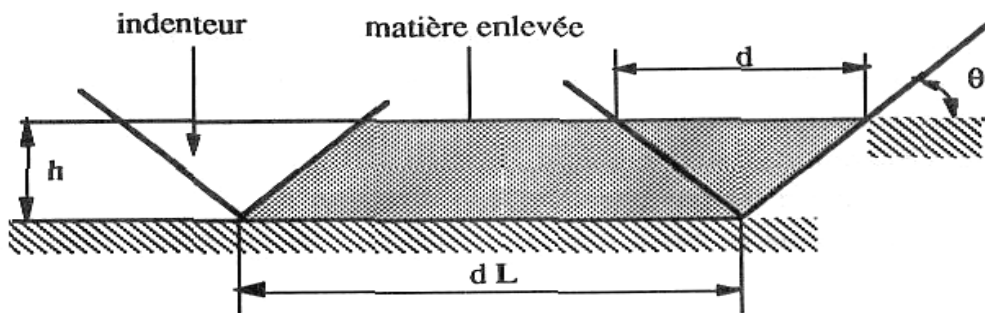
### 1.3.1.b Calcul d'usure par abrasion

Ce mode d'usure est un phénomène de nature essentiellement mécanique. Il résulte de la pénétration d'une surface par une autre. Pour estimer le volume de matière enlevé, on considère que la forme des aspérités du matériau le plus dur est conique. On a ainsi le volume de matière enlevé pour un déplacement  $dL$  se calcul aisément, soit:

$$P = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot R_p \quad (2-2)$$

D'où:

$$dV = \frac{d^2}{2} \operatorname{tg} \theta \cdot dL \quad dV = \frac{2}{\pi} \operatorname{tg} \theta \frac{P}{R_p} \cdot dL \quad (2-3)$$



**Fig. (1.1) :** Usure par abrasion. Estimation du volume de matière enlevé par une aspérité de forme conique

On obtient la valeur totale de matière enlevée en ajoutant la contribution de toutes les aspérités sur la distance parcourue  $L$ . On en déduit que le coefficient d'usure ne dépend que de la forme des aspérités et est égal dans le cas considéré à  $2\operatorname{tg}/\pi$

$$\left( \frac{dV}{dL} \right) \frac{R_p}{P} \quad (2.4)$$

Typiquement à  $10^2$  :

$$K = \frac{dV}{dL} \frac{R_p}{P} \cong 10^{-1} \quad (2.5)$$

L'expression du volume d'usure produit par abrasion montre qu'il dépend linéairement de la charge appliquée, de la distance parcourue et de l'inverse de la dureté du matériau qui apparaît, comme la seule caractéristique mécanique, et qui sont d'ailleurs prise en compte dans la partie expérimentale. La dépendance du volume enlevé et de la distance parcourue semble cependant plus complexe que ne le suggère l'équation simple qui vient d'être dérivée. Une telle loi linéaire est effectivement observée lorsque le matériau abrasif rencontre constamment une surface fraîche (circuit ouvert) dont les caractéristiques ne varient pas. Dans le cas de passages répétés (circuit fermé), les débris d'usure tendent à s'accumuler entre les aspérités et isolent ainsi la surface active du matériau abrasif. Le volume usé varie alors habituellement selon une loi de la forme :

$$V = V_i (1 - e^{\delta L}) \quad (2.6)$$

Où:  $\delta$  est une constante. [6]

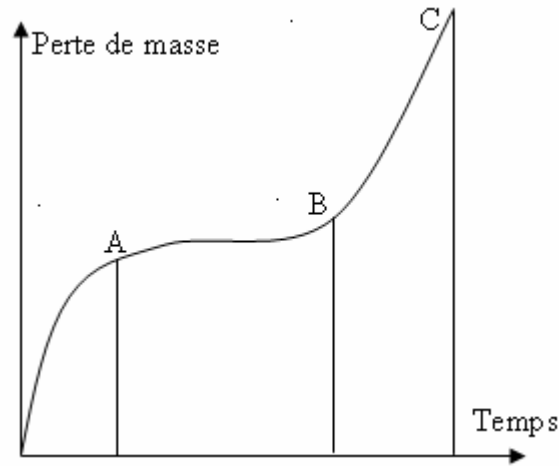
### 1.3.2 Phases de la vie d'un mécanisme d'usure

Un mécanisme passe normalement par trois phases d'usure successives :

**Le rodage (O-A) :** les actions sur les grosses aspérités diminuent avec le temps, les pics sont arasés progressivement tandis que les vallées restent intactes. Le taux d'usure et le facteur de frottement baissent, les portées s'améliorent, les films d'huile s'amincissent. Une nouvelle topographie remplace la rugosité originale de la pièce. Si l'usure se ralentit lors de la mise en fonctionnement, on constate une amélioration de l'état de surface, et réciproquement.

**La vie utile correspond au régime d'usure douce (A-B) :** la couche superficielle très dure qui semble se former est éliminée peu à peu sous forme de petites écailles. L'usure douce diminue la rugosité, tandis que l'usure sévère l'accroît.

**La vieillesse (B-C) :** se caractérise par une usure sévère qui aboutit à la mise hors d'usage.



**Fig.(1.2):** Perte de matière par unité de temps

### 1.3.3 Types d'usure d'après Kragelsky

Kragelsky distingue 5 types d'usure :

- **Déformation élastique** du matériau par les saillies du corps antagoniste a lieu si les contraintes ne dépassent pas la limite d'écoulement dans la zone de contact. L'usure n'est alors possible que par fatigue, le passage répété du corps frottant produisant des microfissures de traction perpendiculaires à la surface.
- **Repoussage plastique** se produit si les contraintes de contact atteignent la limite d'écoulement et si le matériau contourne les saillies du corps antagoniste. L'usure résulte dans ce cas, après un petit nombre de cycles, de la fatigue provoquée par le contact frottant.
- **Microcoupe** survient si les contraintes dans la zone de contact atteignent la limite de rupture ou si le contournement des saillies par le matériau déformé s'interrompt. La détérioration a lieu alors au début de l'interaction. La coupe est due aux aspérités, aux particules détachées et aux arêtes des cavités déjà formées.
- **Rupture par cisaillement** de l'interface de friction ne provoque pas de détériorations immédiates mais s'ajoute aux contraintes et aux déformations agissant au contact, favorisant les processus de fatigue.

- **Rupture par arrachement** a lieu quand la résistance de l'interface dépasse celle du matériau sous-jacent, ce qui peut conduire au **grippage**.

Comme dans le troisième cas, l'usure intervient dès les premières étapes de l'interaction. L'adhésion des aspérités est favorisée par les déformations plastiques et le raclage des couches oxydées et contaminées [7].

Les nombreuses formes d'usure sont classées en plusieurs groupes :

- abrasion, déformation ou coupe par corps durs,
- adhésion, jonctions intermétalliques, microgripages,
- corrosion, réactivité avec l'ambiance,
- corrosion de contact,
- surcontraintes provoquant des accidents brusques,
- fluage, déformation sans perte de matière,
- fatigue, endommagement sous des efforts répétés,
- phénomènes divers : cavitation, érosion, dissolution



**Fig.(1.3) : Usure sur arbre à cames**



**Fig.(1.4) : Usure sur un poussoir**

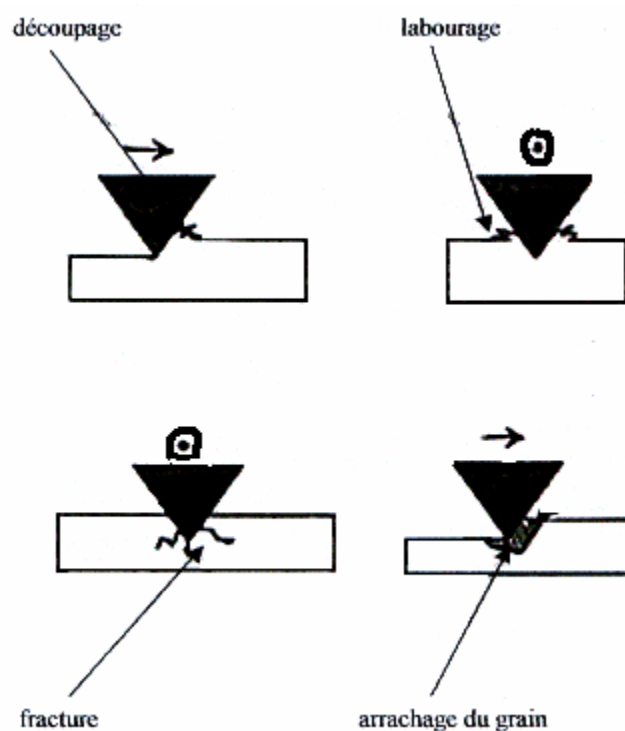
L'usure comporte une part importante de réactions chimiques ; des couches superficielles chimiquement inertes peuvent parfois se révéler plus résistantes au frottement que des couches dures, surtout en présence de milieux agressifs.

L'usure est un phénomène évolutif et irréversible ; chaque état d'un système détruit définitivement l'état précédent, de sorte qu'il est très difficile, voire impossible, de reconstituer le passé à partir du constat d'une dégradation.[8]

### 1.3.4 Différentes modes d'usure

#### 1.3.4.1 Usure par abrasion

Cette forme de dégradation est généralement combattue, mais aussi utilisée pour l'usinage: des taux d'usure importants sont recherchés et obtenus avec des outils abrasifs en rectification, affûtage, etc. L'abrasion coûte très cher, on lui attribue à peu près le tiers du total des pertes économiques dues à l'usure. Elle concerne de nombreux mécanismes fonctionnant dans des conditions sévères : machines agricoles, matériels de travaux publics, matériel minier ...



**Fig.(1.5):** Les quatre modes d'usure abrasive



### 1.3.4.2 Aspect des dégâts

Les surfaces présentent des sillons de profondeur variables, parallèles au déplacement. L'usure est assez constante au cours du temps, le volume des débris croît linéairement avec la charge appliquée et la distance parcourue. La vitesse n'intervient que si l'échauffement modifie les caractéristiques du matériau. Eventuellement, des particules arrachées de la pièce la plus tendre peuvent être transférées mécaniquement sur la plus dure mais sans y adhérer très solidement.

#### a- Nature du phénomène

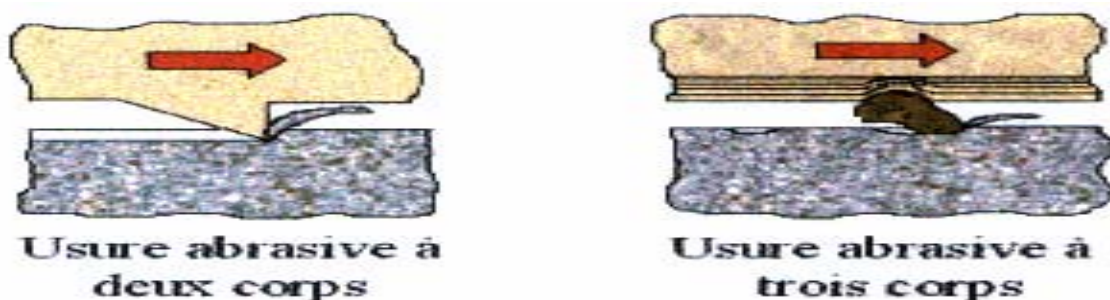
L'usure peut résulter des protubérances d'une des pièces ou des particules qui circulent dans l'interface. On peut distinguer deux modes d'usure par abrasion :

#### b- L'usure abrasive à deux corps

Les sillons sont formés parallèlement à la direction de déplacements des aspérités abrasives.

### 1.3.4.3 Usure abrasive à trois corps

Les particules abrasives dures sont libres dans l'interface et déforment plastiquement les surfaces frottantes en créant des empreintes.



**Fig.(1.6) : Les deux modes d'usure abrasive**

La perte de matière dépend à la fois du matériau usé et de l'abrasif et l'aspect des sillons fournit de précieuses indications :

- s'ils sont brillants et très peu profonds, les aspérités de la pièce antagoniste ont raclé les couches d'oxydes,
- s'ils sont isolés, et brusquement interrompus, des particules dures introduites entre les surfaces se sont plus ou moins incrustées,
- s'ils sont ininterrompus et rayent la pièce dure, des particules abrasives sont enchâssées dans la pièce tendre.
- s'ils sont ininterrompus et marquent la pièce tendre, la pièce antagoniste plus dure est trop rugueuse.

L'abrasion combine déformation et coupe. Elle creuse d'abord des sillons puis, si les capacités de déformation sont dépassées, elle enlève des microcopeaux. Lors d'un usinage par abrasion, on fait tout pour que le métal soit enlevé sous forme de petits copeaux, tels que ceux que l'on retrouve dans le fluide de refroidissement d'une rectifieuse. Les débris émis par les surfaces acquièrent une dureté bien supérieure à celle des matériaux en présence, provoquant une abrasion à trois corps. Ceci est dû à l'écrouissage et à l'oxydation, cette dernière dépendant entre autres de l'humidité atmosphérique. L'abrasion modifie profondément les couches superficielles qui deviennent comparables à celles obtenues par laminage. Les surfaces durcissent et résistent mieux à l'abrasion elle-même.

L'usure dépend des vitesses relatives des surfaces et des particules, de la forme et de la résistance des grains. Elle croît avec la taille de ces derniers, se stabilisant pour une dimension critique voisine de 0,1 mm, et varie selon que les contraintes sont faibles ou fortes, les charges agissent directement ou indirectement, en brisant ou en déformant les grains abrasifs.



**Fig.(1.7):** Usure sur un tourillon



**Fig.(1.8):** Usure sur des dentures d'un arbre de boîte à vitesses

L'abrasion est une usure typique des systèmes télescopiques : tiges de vérins, broches de machines-outils, certains paliers ... Il faut empêcher l'entrée des corps étrangers par une bonne étanchéité et imposer des jeux plus petits que les particules abrasives, si l'on sait que ces dernières sont assez grosses. Il faut aussi donner une dureté maximale à la pièce qui défile devant la zone de contact et faire l'autre aussi « tendre » que possible pour qu'elle puisse « enliser » les particules abrasives. Un coussinet trop dur incrustant des corps étrangers use davantage l'arbre. Il est essentiel que les particules abrasives et les débris d'usure soient évacués des zones frottantes. Il faut impérativement prévoir des sculptures ou des moletages, si aucune circulation de lubrifiant ne permet cette évacuation.

L'usure des matériaux purs est à peu près inversement proportionnelle à leur dureté mais le rapport de proportionnalité varie avec leur structure. Généralement on diminue l'abrasion en augmentant la dureté superficielle sur une profondeur importante. Une meilleure résistance à l'oxydation et à la corrosion donne moins d'oxydes abrasifs, l'écrouissage augmente la dureté et la résistance à l'usure. Il y a 30 ans on n'utilisait que les fontes et les aciers spéciaux, avec le chrome comme élément d'alliage privilégié. Depuis, la palette s'est élargie à certaines matières plastiques et céramiques.

#### **1.3.4.4 Usure par adhésion**

Le matériau d'une pièce est transféré et solidement soudé sur l'autre. Les pièces peuvent être immobilisées par un grippage, dont la forme n'est reconnaissable qu'au début, avant que les surfaces ne soient complètement défigurées.



**Fig.(1.9):** Usure d'un roulement



**Fig.(1.10):** Usure d'une tourillon



**Fig.(1.11):** Usure d'un pignon de boîte de vitesses d'une motocyclette

Contrairement à ce qui se passe dans le cas de l'abrasion, de brusques changements de régime d'usure peuvent résulter de légères modifications des paramètres. Pour des surfaces non lubrifiées, le coefficient de frottement n'est pas multiplié par plus de vingt mais le taux d'usure peut varier d'un facteur un million.



**Fig.(1.12):** Schéma de l'usure adhésive. Le matériau adhère à la surface antagoniste et lui arrache de la matière.[9]

**a- Nature du phénomène**

La matière d'une pièce est transférée sur l'autre pendant le mouvement par soudage en phase solide. Les métaux, s'ils sont mutuellement solubles, forment des alliages par diffusion.

- Si l'interface est moins solide que les pièces, les jonctions se cisailent par rupture adhésive, l'usure est modérée ou quasi nulle.
- Si l'interface est plus solide qu'une des pièces, il y a rupture cohésive, usure sévère, voire grippage. L'interface se fixe sur la pièce la plus résistante ou se détache sous forme de particules qui, écrouies et oxydées, peuvent contribuer à l'abrasion.

Le grippage épidermique, conséquence extrême du frottement par soudure, est facilité par divers facteurs comme :

- l'accumulation de matière devant les aspérités du frotteur qui augmente l'aire réelle du contact,
- la mise à nu des structures cristallines sans possibilité de repollution,
- l'accumulation de reliefs dans un sens parallèle à la direction du déplacement,
- l'échauffement.

**1.3.4.5 Usure par corrosion, usure chimique**

La corrosion n'est pas directement liée aux mouvements des pièces, mais elle interagit avec le frottement.

Les pièces sont rongées et portent de nombreuses piqûres ou crevasses. L'usure est aggravée par les contraintes mécaniques et le frottement. La corrosion attaque de façon différentielle les constituants des matériaux polyphasiques. Elle peut par exemple éliminer le plomb d'un cuproplomb, le métal est devenu alors poreux en surface au point de se désagréger. Dans une fonte grise elle peut détruire la perlite et laisser en place le graphite et la cémentite. [10]

**a- Nature du phénomène**

Les surfaces réagissent avec les ambiances agressives, les lubrifiants altérés ... L'attaque chimique ou électrochimique est en général d'abord rapide, puis ralentie par la formation de films plus ou moins protecteurs qui peuvent passer les matériaux et stopper, au moins provisoirement, le processus. Le frottement peut accélérer la corrosion s'il élimine des films d'oxydes ou de sels peu résistants, inversement la corrosion peut détruire les qualités frottantes des surfaces. On provoque une corrosion volontaire et contrôlée avec les lubrifiants contenant des additifs

« extrême pression » qui couvrent les pièces de composés mous faciles à cisailier et donnant un très faible taux d'usure : chlorures, sulfures, phosphates ... mais l'attaque chimique peut se poursuivre si ces additifs sont trop actifs ou ionisés par de l'eau de condensation. Les effets chimiques sont très importants lors de l'usure des polymères, qui sera envisagée plus loin.

### **b- Corrosion de contact**

Bien avant la révolution de 1789 les compagnies françaises de transport par diligence avaient remarqué la destruction des pièces frettées et des moyeux avec émission de « poudre rouge ». La première mention du phénomène dans la littérature scientifique peut être relevée en 1911 : Eden Rose Cunningham [11] décrivent les dégâts qu'ils ont constaté sur les attaches des éprouvettes d'une machine d'essai des matériaux. Tomlinson [11], en 1927, utilise pour la première fois le terme « fretting-corrosion ». On parle aussi d'« oxydation de frottement » et en 1952 a lieu le premier symposium consacré uniquement à ce sujet.

Tomlinson [11] écrivait en 1939 : « Bien que la présence de produits d'oxydation indique qu'une action chimique accompagne le phénomène, le processus n'est certainement pas une corrosion au sens habituel du terme ». La corrosion de contact est connue sous des noms très divers : traditionnels (poudre rouge), français (corrosion frottement, frottement fatigue, usure induite en petits débattements) ou anglais (fretting corrosion). Le terme « corrosion de contact » est en fait mal adapté car il donne une fausse idée de la réalité ; « **usure induite en petits débattements** » est plus correct mais n'informe nullement sur le déroulement des dégradations.

Strictement limitée aux zones de contact, cette forme d'usure est propre à des mécanismes ou assemblages soumis à de petits déplacements tangentiels rapides ou à des vibrations sous forte charge. Les surfaces commencent généralement par se colorer, puis elles se creusent de cavités remplies des débris émis. On observe aussi, très souvent, des criques de fatigue. La corrosion de contact s'attaque particulièrement aux pièces de haute qualité : moteurs d'avions, clavetages et cannelures, manchonnages et emmanchements, roulements, mors de machines de fatigue, portées de culasse sur bâtis de moteurs ... On peut dire qu'il s'agit d'une usure « de luxe ».

**c- Nature du phénomène**

La complexité du phénomène a fait apparaître diverses théories concurrentes pour expliquer l'émission de particules et la formation d'oxydes. Rapidement, les théories de Bowden et Merchant sur l'usure adhésive amenèrent à prendre en compte la formation de jonctions au niveau des contacts des aspérités des surfaces. Ces aspérités, dénudées par la rupture des couches d'oxydes subissent des pressions et des températures très élevées ; Caubet et Amsallem [12] ont même parlé de plasma dans la zone interfaciale. Il en résulte des microsoudures identiques à celles qui produisent le grippage, phénomène dont la corrosion de contact, au début, est toujours très proche.

Le rapport de la surface au volume des particules, augmenté par frottement, facilite l'oxydation. L'oxyde  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  est formé après passage par la poudre de fer, par l'oxyde  $\text{FeO}$  instable en dessous de  $570^\circ\text{C}$  ou éventuellement par  $\text{FeO}(\text{OH})$ , puis par la magnétite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  de couleur gris-bleu. Les effets mécaniques s'accompagnent d'effets chimiques complexes comme l'absorption de l'azote atmosphérique qui facilite l'amorçage des ruptures de fatigue.

L'usure par corrosion de contact augmente linéairement avec le nombre de cycles si l'atmosphère n'est pas oxydante, sinon elle est quasi exponentielle. Peu de processus sont aussi destructeurs. Une fois qu'elle est amorcée, on ne peut que retarder la destruction par des apports massifs de lubrifiants. La diminution de la résistance à la fatigue des pièces, à la suite de la corrosion de contact, a été signalée dès 1911. De nombreux chercheurs ont mis en évidence l'existence de microfissures dans les zones de contact atteintes par le phénomène. Il n'est pas évident d'établir des relations de cause à effet entre la corrosion de contact et la fatigue mais il semble établi que ce sont pour une large part les mêmes conditions qui provoquent les deux phénomènes. Il est quasi certain en tous cas que la corrosion de contact multiplie les sources de fissuration à partir desquelles s'amorcent les ruptures par fatigue, et les fissures atteignent plus vite la taille critique à partir de laquelle elles deviennent dangereuses.



**Fig.(1.13):** Usure constaté sur une bague de roulement



**Fig.(1.14):** Usure sur un bout d'arbre en acier inoxydable

Il semble qu'il existe un seuil d'endommagement irréversible au-delà duquel la durée de vie des pièces est diminuée, même si l'on a réussi à empêcher la corrosion de contact. Un phénomène voisin, appelé « **faux brinnelling** », s'en prend aux roulements quand ils sont à l'arrêt, mais soumis à des vibrations. De petits « cratères » apparaissent au niveau des contacts des billes ou des rouleaux. Pendant la dernière guerre mondiale, lors du transport par trains de camions Chrysler, les roulements étaient profondément rongés sans que les camions aient servi.

#### **d-Nature du phénomène**

Les contraintes de traction accompagnant le passage d'un glisseur sont capables de fissurer la zone arrière du contact, si elles dépassent la résistance à la rupture du matériau. De telles fissures apparaissent déjà dans les contacts statiques. Ainsi, une bille d'acier pressée sur un plan en verre ne provoque aucune dégradation dans la zone centrale pourtant soumise aux plus fortes pressions mais elle cause, un peu à l'extérieur du cercle de contact, une fissuration de forme générale tronconique dont l'angle répond à la loi **d'Auer BACH**.



La fissuration est grandement facilitée en présence d'efforts tangentiels et si ces derniers sont suffisants pour entraîner le glissement, alors on trouve toute une série de ruptures successives le long de la zone frottante. Des expériences faites avec un plan de carbure de titane sur lequel on fait frotter une bille du même matériau ont montré que la fissuration pouvait se produire sous des charges normales qui peuvent varier de 400 N (charge purement statique dans l'air) à 1 N (frottement avec un coefficient de 0,9 dans le vide ou dans un gaz inerte). Ceci remet en cause l'affirmation selon laquelle, pour résoudre des problèmes de frottement dans des conditions très sévères, il faut faire appel à des matériaux très durs. Un auteur a pu écrire, dans le même ordre d'idées, que « le frottement des céramiques est parfois l'une des méthodes les plus onéreuses pour fabriquer du sable ».

#### **1.3.4.6 Usure par fatigue**

L'usure par fatigue est lente et habituellement masquée par l'abrasion ou l'adhésion. Induite par le frottement de roulement ou de roulement avec glissement sous fortes charges répétées, on la rencontre essentiellement dans les engrenages et les roulements dont elle constitue le mode normal de destruction. Une longue phase de vieillissement précède les accidents visibles. Une pièce peut être atteinte irrémédiablement tout en gardant jusqu'au dernier moment une apparence intacte. Il existe cependant un certain nombre de manifestations extérieures qui permettent, dans certains cas, un suivi des pièces en service.

Il y a en fait deux sortes d'avaries distinctes :

##### **a- Fatigue superficielle par écrouissage**

Elle est due aux contraintes maximales de traction ou de compression : le premier signe visible est une apparence brunie, un éclat lustré du métal et la disparition des marques d'usinage. L'incubation est assez courte, survenant même dans des contacts peu chargés, puis de petites piqûres se forment, alignées le long des aspérités initiales. L'accident typique est le pitting, ou piquage, des engrenages : le point de cisaillement maximal étant situé à la surface, des fissures se développent perpendiculairement à la direction du glissement, prenant parfois la forme d'un V pointant dans la direction du mouvement. Elles ne sont véritablement dangereuses que si le métal est apte à les propager.

Des micros écailles ou « pits », de quelques centièmes de mm dans la direction de la surface et en profondeur, sont émises. Les piqûres sont facilement reconnaissables à leur forme en éventail. La pointe est généralement tournée vers le pied des dents motrices et vers le sommet des dents menées, l'angle va de 60 à 120° et l'autre extrémité est toujours largement arrondie.[13]

#### **b- Fatigue profonde ou écaillage**

Après un long temps de vieillissement se produit une émission brutale de particules dont la surface atteint quelques mm<sup>2</sup>, la profondeur quelques dixièmes de mm, et dont la taille est sans rapport avec la structure du métal. L'usure s'étend par le bord des zones écaillées, découvrant progressivement les sous-couches dont l'aspect est poli.

#### **c- Nature du phénomène**

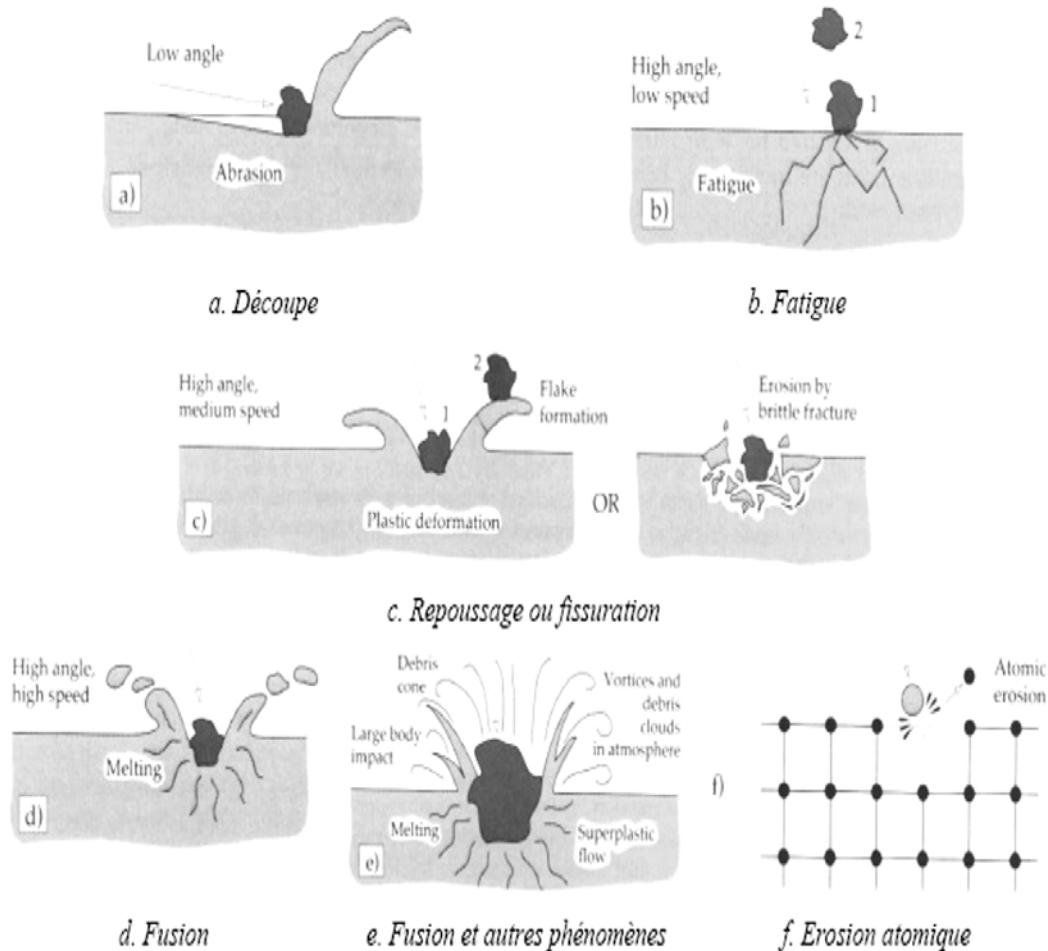
Les aspérités recevant des pressions cycliques se dégradent par fatigue, même lorsqu'elles sont séparées par un lubrifiant. Les pièces bombées qui reçoivent des contraintes bien plus fortes que les pièces planes s'usent beaucoup plus. L'endommagement créé par les déformations plastiques, en surface ou en profondeur selon les conditions, provoque des transformations métallurgiques (par exemple, il transforme la martensite en troostite plus fragile) et l'amorçage de fissures. Dans le cas du pitting, l'émission des micros écailles est relativement rapide. Dans le cas de la fatigue profonde, amorcée à partir du point de cisaillement maximal, les défauts étalés sous la surface font que cette dernière se comporte comme un véritable placage. Les détériorations par écaillage concernent au premier chef les roulements et les engrenages. Elles dépendent de nombreux paramètres : vitesse de glissement, rugosités, nature et microstructure des matériaux, duretés, contraintes de Hertz, inclusions, lubrifiant et additifs. Parfois, les contraintes dues à la flexion ou à la torsion peuvent accélérer le processus.

#### **1.3.4.7 Usure par érosion**

L'érosion est une usure abrasive particulière, causée par des impacts de particules solides contenues dans un fluide en mouvement ou par des particules liquides en milieu gazeux. Lors des chocs, il y a ébranlement du matériau de la surface et bris du système cristallin, les dégâts sont fonction de l'énergie cinétique, donc de la masse et du carré de la vitesse de la particule.

L'enlèvement de matériau croît très vite avec la vitesse, comme la cinquième puissance pour les gouttes. [14]. Le comportement est très différent selon la nature du matériau.

- Si ce dernier est ductile, on trouve des rides annulaires très écrouies et cassantes et la vitesse d'usure passe par un maximum pour des angles d'incidence de 20 à 30°.



**Fig.(1.15):** Schémas des mécanismes d'usure par érosion : découpe, fatigue, repoussage ou fissuration, fusion et autres phénomènes et érosion atomique. [15]

#### a- Nature du phénomène

L'érosion diffère de l'abrasion car elle est corrélée avec l'énergie cinétique des particules qui, frappant les surfaces à grande vitesse, créent des petits cratères par déformation plastique du matériau sous l'effet du cisaillement. La perte de matière résulte de la coupe ou des déformations alternées des aspérités formées par les impacts successifs.



**Fig.(1.16):** Virole d'acier inoxydable usée par érosion



**Fig.(1.17):** Usure d'une conduite.  
usée par érosion



**Fig.(1.18):** Usure Aube de turbine à gaz

Quand l'angle d'impact est faible, le phénomène de coupe est important, la résistance du matériau dépend très étroitement de sa dureté. S'il est grand, l'usure est due à la déformation des surfaces et le phénomène est beaucoup plus complexe : un matériau moins dur mais plus tenace peut fort bien résister.

#### 1.3.4.8 Usure par cavitation

La cavitation exige un mouvement relatif entre un solide et un fluide. Elle concerne en premier les organes pour fluides, pompes, hélices de bateaux ... mais aussi certains mécanismes lubrifiés : coussinets de moteurs ou engrenages, par ex



**Fig.(1.19):** Impulseur de pompe centrifuge

### a- Nature du phénomène

Lord Rayleigh [16], a montré que les pressions atteignent plusieurs milliers de bars, les effets sont surtout mécaniques et les chocs successifs fatiguent les surfaces, surtout en présence de défauts. Les trous sont autant d'amorces et se creusent davantage. Pour comprendre le rôle des défauts, il suffit d'observer un verre de champagne que l'on vient de le remplir. D'abord, le gaz s'échappe de façon énergique pendant plusieurs secondes, formant une mousse qui ne tarde pas à retomber. Au bout de quelques minutes, le liquide est calmé et l'on peut apercevoir des colonnes de petites bulles montant de certains points précis de la surface du verre. Le dégazage ne se produit pas dans les zones où le verre est parfaitement lisse, mais seulement là où se trouvent d'imperceptibles défauts, rayures, micro bulle, inclusions, ...

Dans un premier temps, des courants de convection apparaissent, l'eau chauffée au fond se dilate, monte vers la surface, pendant que l'eau des zones plus froides la remplace.

- De petites bulles adhérentes se forment sur les parois, ce sont les gaz de l'air que l'eau avait dissous qui s'apprête à s'échapper.
- Un peu plus tard, des bulles de vapeur se forment au fond de la casserole et l'eau commence à « chanter » : en montant vers la surface, ces bulles sont refroidies par le liquide environnant et elles implosent bruyamment lorsque la vapeur qu'elles contiennent se condense de façon quasi instantanée. Si la température continue à monter, les bulles ne se condensent plus, elles montent au contraire vers la surface où elles éclatent en laissant échapper la vapeur qui les constituait. L'eau bout maintenant de façon régulière. Notons que cette ébullition est facilitée, tout comme le dégazage du champagne, par la présence de défauts de surface.

### **1.3.4.9 Usure par fatigue thermique**

C'est une dégradation par alternance d'échauffements et de refroidissements, qui touche des pièces comme les cylindres de laminoirs, les matrices de forge ... mais aussi les surfaces rectifiées dans de mauvaises conditions. La fissuration finale a un aspect caractéristique de mosaïque, dit de « faïençage ». Les fissures sont plus ou moins polygonales et suivent les joints de grains et s'enfoncent dans les matériaux perpendiculairement à la surface.

#### **a- Nature du phénomène**

Les contraintes par flash thermique font alterner très vite compressions et tractions. Les premières déforment plastiquement les surfaces, les secondes descellent les grains par cisaillement, surtout si les joints sont oxydés. Le faïençage peut exister avant ou après frottement. Les contraintes résiduelles de traction, ou les contraintes de traction provoquées par le frottement, facilitent la dégradation donc créer l'usure.

### **1.4 Influence de l'usure sur les matériaux métalliques**

Le choix d'un matériau de frottement ou de l'usure est un problème d'optimisation de d'équilibre entre des qualités souvent contradictoires :

- propriétés mécaniques : dureté, limite d'élasticité, résistance à la compression, au fluage, à la fatigue, résilience, aptitude au vieillissement, amortissement des vibrations et des chocs,
- propriétés physico-chimiques : masse volumique, température limite d'utilisation, coefficient de dilatation, conductivité thermique, conductivité électrique, résistance à l'oxydation et à la corrosion, mouillabilité par les lubrifiants, aptitude aux traitements, reprise d'humidité,
- propriétés anti-usure : facilité du rodage, résistance à l'abrasion, à l'adhésion et au grippage, à la corrosion de contact, à l'érosion et à la cavitation, à la corrosion par les lubrifiants,
- propriétés techniques : facilité de mise en œuvre, conformabilité, absorption de particules abrasives, autoréparation par comblement des rayures, dureté minimale de l'antagoniste, comportement en cas de lubrification déficiente ou d'incident,

comportement face à l'augmentation du jeu, facilité de réparation ou d'échange, aptitude au soudage sur un support,

- propriétés d'environnement : caractéristiques du milieu, moyens et possibilités de lubrification, problèmes de pollution ou contamination,

En fait les matériaux durs sont toujours plus ou moins fragiles (céramiques, polymères, composites) et leur utilisation en frottement est contrariée par une inéluctable tendance à la fissuration. La dureté est donc loin d'être le seul critère intéressant et en outre, on risque des erreurs importantes en voulant la déduire de la limite d'élasticité.

## **1.5 Matériaux métalliques**

### **1.5.1 Généralités sur les matériaux**

Un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle que l'homme façonne pour en faire des objets.

- Un matériau, c'est donc une matière de base sélectionnée en raison de propriétés particulières et mise en œuvre en vue d'un usage spécifique.
- La nature chimique, la forme physique (phases en présence, granulométrie et forme des particules, par exemple), l'état de surface, des différentes matières premières qui sont à la base des matériaux confère à ceux-ci des propriétés particulières.
- On distingue ainsi cinq grandes familles de matériaux : [17]
  - 1- Les métaux ;
  - 2- Les polymères ;
  - 3- Les matériaux composites ;
  - 4- Les céramiques ;
  - 5- Les nanomatériaux.

### **1.5.2 Aciers de construction mécanique**

Aciers spéciaux destinés à subir des traitements thermiques et devant, de ce fait, répondre à des exigences relatives à leur trempabilité et à sa régularité.

Des éléments d'alliage (Cr, Ni, Mo, V notamment et parfois Si) apportent surtout la trempabilité et, éventuellement, des aptitudes particulières au durcissement. Cette catégorie d'aciers comporte de nombreuses nuances prévues pour des usages spécifiques (boulonnerie, chaînes, ressorts, roulements, soupapes...) ainsi que des variantes destinées à des mises en oeuvre particulières (aciers de décolletage, aciers à usinabilité améliorée, aciers prétraités...).

### **1.6 Traitements thermiques des aciers**

Les traitements thermiques sont des opérations de chauffage suivies de refroidissement qui ont pour but de donner à une pièce métallique les propriétés les plus appropriées pour son emploi ou sa mise en forme. Ils permettent d'améliorer dans une large mesure les caractéristiques mécaniques d'un acier de composition déterminée. Toute utilisation rationnelle d'un alliage implique généralement un traitement thermique approprié. D'une façon générale, un traitement thermique ne modifie pas la composition chimique de l'alliage mais apporte les modifications suivantes :

- constitution (état de carbone et forme allotropique du fer)
- structure (grosseur du grain et répartition des constituants)
- état mécanique.

Les principaux traitement thermiques sont les suivants : trempe, revenu et recuit. [18]

#### **a- Trempe**

Le cycle thermique de trempe comporte trois phases successives :

- chauffage à une température T dite température de trempe, correspondant à un état austénitique,
- maintien à cette température T de façon à réaliser plus ou moins complètement la mise en solution des carbures et l'homogénéisation de l'austénite. L'ensemble de ces deux phases est dit austénitisation.
- Refroidissement par immersion dans un milieu (eau, huile, air), suffisamment rapide pour obtenir les constituants de trempe recherchés.

#### **b- Trempabilité**

C'est une grandeur physique caractérisant chaque acier. Elle dépend de la loi de refroidissement (fonction du milieu de refroidissement et de la section de la pièce) [19].



**c- Revenu**

L'acier trempé est trop fragile pour pouvoir être mis en service. La trempe est suivie d'un revenu constitué d'un chauffage au dessous de  $AC_1$ . Le revenu réalise un compromis entre deux exigences contradictoires qui sont dureté et résilience : il augmente l'allongement et surtout la résilience ; mais il diminue la dureté, la limite élastique et la résistance à la traction. Le diagramme de revenu (caractéristiques mécaniques en fonction de la température de revenu) est présenté dans les fiches techniques du présent catalogue.

**d- Recuit**

Le recuit amène le métal en équilibre physico- chimique et tend à réaliser l'équilibre structural ; il a donc pour but de faire disparaître les états hors d'équilibre résultants de traitement antérieurs, thermiques ou mécaniques. L'état recuit correspond aux valeurs maximales des caractéristiques de ductilité, et aux valeurs minimales des caractéristiques de résistance.

**e- Recuit de normalisation**

Le recuit est effectué à une température dépassant  $AC_3$  de 50 à 100°C et suivi d'un refroidissement à l'air calme. Ce recuit a pour but d'affiner le grain et il contribue également à l'homogénéisation du métal au relâchement des contraintes internes.

**f- Recuit d'adoucissement**

Ce recuit consiste à maintenir le métal à quelques dizaines de degrés au-dessous du point de transformation  $AC_1$  et a pour but de faciliter l'usinage.

**g- Recuit de détente**

Ce recuit a pour but le relâchement des contraintes internes dues à la solidification (pièces de moulage) ou à des opérations mécaniques (usinage) ou de soudage. Ce recuit s'effectue généralement vers 600 - 650 °C.

**h- Recuit d'hypertrempe (cas des aciers inoxydables austénitiques)**

Ce recuit est effectué à une température généralement supérieure à 1000°C et suivi d'un refroidissement rapide (eau, air pulsé) afin d'éviter la précipitation de phases intermédiaires.

## 1.7 Les essais mécaniques de dureté

Les essais habituels de dureté sont simples, rapides, et généralement non destructifs ; ils offrent donc un moyen très commode, et très utilisé dans les ateliers, pour vérifier l'évolution des propriétés d'une pièce métallique, notamment lors des traitements thermiques et mécaniques, ou pour contrôler la conformité des fournitures. De plus, la dureté permet d'apprécier, dans une certaine mesure, la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion, la conservation du poli, la difficulté d'usinage, etc

### a- Essai de dureté Brinell

Dans l'essai proposé par Brinell, le pénétrateur est une bille polie en acier trempé ou en carbure de tungstène. Son diamètre  $D$  vaut normalement 10 mm, mais aussi 5 mm, 2,5 mm et 1 mm. Elle est appliquée sur le métal avec une charge  $F$  (normalement 3 000 kgf).

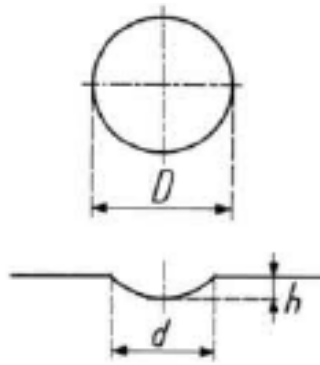
Après suppression de la charge, elle laisse dans le métal une empreinte circulaire permanente dont on mesure le diamètre  $d$ , d'autant plus grand que la bille a pénétré plus profondément dans le métal, donc que celui-ci est moins dur (figure 1-1).

Cette mesure peut se faire à 0,05 mm près à l'aide d'une réglette spéciale dite *réglette Le Châtelier*, soit, beaucoup plus souvent, avec une lunette à oculaire micrométrique d'un grossissement de l'ordre de 20. La dureté s'exprime par le rapport de la charge  $F$  à la surface  $S$  de la calotte sphérique imprimée dans le métal (la formule 1-1):[8]

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{2 * 0.105F}{\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (1-1)$$

D'après la formule (1.1), il faut maintenir le rapport  $F/D^2$  constant.

À l'origine, la norme avait prévu que  $F$ , exprimée en kilogrammes force, Serait égale à  $30 D^2$ , soit pour une bille de 10 mm de diamètre (c'est-à-dire la bille normale)  $F = 3\,000$  kgf et pour une bille de 5 mm, 750 kgf. La modification du système d'unités a perturbé le rapport simple et maintenant, au lieu de 3 000 kgf, la force  $F$  est de :



**Fig.(1.20) :** Essai de dureté Brinell. [20]

### b- Essais de dureté Rockwell

L'essai consiste à mesurer l'enfoncement rémanent d'un pénétrateur, appuyé sous faible charge sur la surface à essayer, après application d'une surcharge dans des conditions bien précisées, fig.(1.2). L'essai se ramène à une mesure de longueur, exprimée en unités correspondant chacune à 0,002 mm. Le pénétrateur employé est :

- un cône de diamant (essai C) de section circulaire, d'angle au sommet  $120^\circ$ , à pointe arrondie sphérique (rayon de 0,2 mm) ;
- une bille d'acier trempé, polie, de diamètre 1,587 mm (1/16 de pouce) (essais B ou F) ou 3,175 mm (essai E).

La précharge  $F_0$  est, dans tous les cas, de 98 N. Les surcharges  $F_1$  sont de 490, 882, 1 372 N, d'où les charges d'essais  $F$  de 588, 980, 1 470 N pour les essais F, B et E, C respectivement.

### c- Echelle Rockwell C (HRC)

Cône diamant et charge de 1470 N pour les métaux durs ayant une résistance supérieure à 1 000 N/mm<sup>2</sup> ;

### d- Echelle Rockwell B (HRB)

Une bille d'acier de 1,59 mm de diamètre environ et charge de 980 N, pour les aciers dont la résistance est comprise entre 340 et 1 000 N/mm<sup>2</sup>. La mesure comporte trois étapes :

- mise en contact du pénétrateur et de la surface, sous la précharge  $F_0$ , avec mise au zéro de l'indicateur d'enfoncement ;
- imposition de la surcharge  $F_1$  permettant d'atteindre la charge d'essai ( $F = F_0 + F_1$ ) ;
- retour à la pré charge et lecture de l'indicateur d'enfoncement.

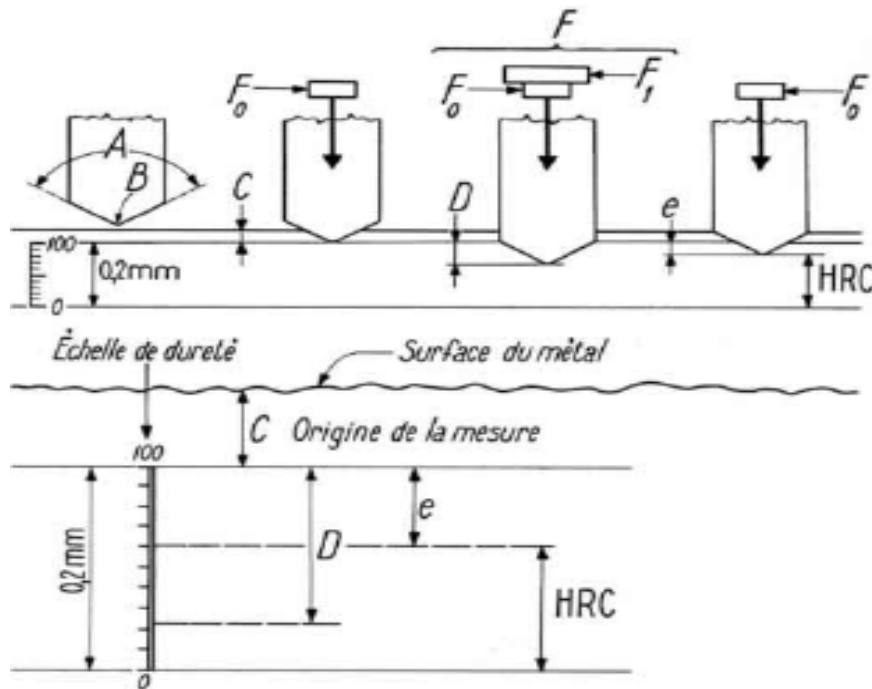


Fig.(1.21): Essai de dureté Rockwel [21]

#### e- Essai de dureté Vickers

Le principe est le même que celui de l'essai Brinell mais le pénétrateur est, dans ce cas, une pyramide de diamant à base carrée ; l'angle entre deux faces opposées est de 136°, choisi pour avoir une correspondance avec l'échelle de dureté Brinell. L'avantage d'un pénétrateur pyramidal (comme d'un pénétrateur conique) est que la loi de similitude est automatiquement respectée et, quand on fait varier la charge, on obtient des empreintes géométriquement semblables entre elles, donc des valeurs identiques pour la dureté. De plus, l'avantage du diamant est l'absence de déformation du pénétrateur quand on mesure des duretés élevées. Le diamant laisse une empreinte carrée et l'on mesure la longueur de la diagonale de l'empreinte (ou la moyenne des deux diagonales) à 0,002 mm près, grâce à un microscope micrométrique (grossissement 120) lié à la machine, et pouvant venir automatiquement se placer au-dessus de l'empreinte. La dureté Vickers HV est le quotient de la charge d'essai  $F$  (49, 98, 196, 294, 490, 784, 980 N) par l'aire de l'empreinte de diagonale  $d$ , c'est-à-dire :

$$HV = \frac{2 * 0.102 * F * \sin(136^\circ / 2)}{d^2} \quad (1.2)$$

$$HV = 1.8544 * 0.102 * F / d^2$$

Les tables, fournies par les différents constructeurs, donnent directement HV en fonction de  $F$  et de  $d$ . La charge utilisée le plus couramment est 294 N (30 kgf). Cependant, la gamme des charges utilisables (49 à 980 N) (5 à 100 kgf) permet d'appliquer cette méthode dans toute l'échelle des duretés et avec toutes les dimensions d'échantillons, en choisissant la charge donnant une empreinte telle que la diagonale  $d$  soit plus grande que 0,4 mm, mais inférieure aux deux tiers de l'épaisseur. Dans ces conditions, le symbole HV est suivi de la charge utilisée (en kgf) et du temps de maintien (en s) : HV 30/20. [22]