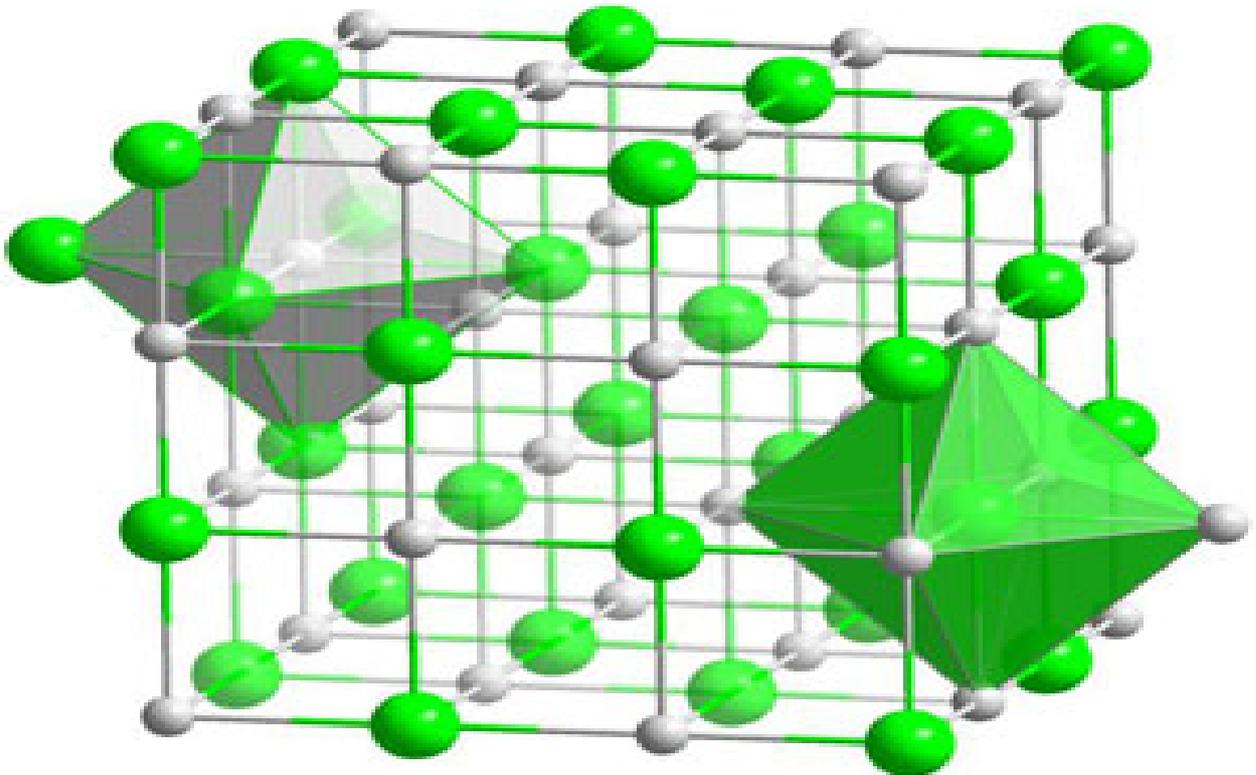


SAID BENSAADA
N.BENDRIHEM
OUMAIMA BENSAADA

SCIENCE DES MATERIAUX

Deuxième partie



PREFACE

Les matériaux en général et les métaux en particulier constituent un rôle important pour tout développement industriel ou progrès technologique. Une grande partie de l'activité économique des pays industrialisés est rattachée aux matériaux. Vu les exigences de l'industrie moderne, de nombreux programmes de recherche sont en route pour le développement d'autres matériaux plus performants et moins coûteux tels que les composites, les céramiques, les polymères etc...., mais les alliages métalliques occupent toujours une place importante, car les caractéristiques de ces derniers s'améliorent de jour en jour grâce aux recherches.

Les propriétés d'emploi des métaux et alliages sont déterminées en grande partie par la morphologie et le degré de dispersion des phases qui les constituent, c'est-à-dire par la microstructure. Aujourd'hui maîtriser les microstructures en vue d'optimiser telle ou telle propriété est réalisable par des traitements thermiques ou thermomécaniques appropriés, qui sont fondés sur les possibilités de transformations structurales.

Cette deuxième partie du présent ouvrage vient en complément de la première partie science des matériaux et expose clairement les fondements technologiques de l'élaboration des métaux non ferreux, leurs désignations ainsi que leurs transformations. On expose aussi les concepts définis par les lois d'usure, au regard des propriétés des matériaux, par les phénomènes de frottement courant entre surfaces déjà exposée dans la première partie, une notion fondamentale dans la construction mécanique étant insérée, celle de la dégradation des matériaux par les différents aspects des phénomènes de dégradations dues à la corrosion. le moulage et le soudage prennent une place très importante, car beaucoup de produits industriels sont élaborés grâce à ces deux procédés.

Les Co-auteurs

1. Métaux et alliages non ferreux

1.1. L'aluminium et ses alliages

L'aluminium est un élément du III^{ème} groupe de la classification de Mendelév, dont le nombre atomique est 13 et la masse atomique 26,98 (environ 27). L'aluminium possède un réseau cubique à faces centrées à équidistance : $a = 4,0412 \text{ \AA}$, sa caractéristique la plus importante est la faible densité $2,7 \text{ g/cm}^3$ (celle du fer $7,8 \text{ g/cm}^3$ et celle du cuivre 9 g/cm^3). L'aluminium représente environ 7,5 % en masse dans l'écorce terrestre.

L'aluminium et ses alliages prennent encore aujourd'hui une place importante dans les différents domaines de l'industrie. Son utilisation s'accroît de jour en jour grâce à ses propriétés particulières qu'il présente :

- Légèreté et bonne résistance, ce qui facilite son utilisation dans la construction mécanique.
- Bonne conductivité de chaleur et d'électricité.
- Bonne tenue à la corrosion grâce à la formation en surface d'une pellicule très fine, $\approx 0,7 \text{ \mu m}$, et très résistante de Al_2O_3 , (plus l'aluminium est pur plus sa tenue à la corrosion est élevée). L'aluminium, en contact avec l'oxygène de l'air, forme très vite une couche d'oxyde Al_2O_3 qui protège le métal contre les attaques chimiques. Cette pellicule est non soluble dans l'eau, donc l'aluminium est très résistant contre l'influence atmosphérique et il est très utilisé surtout dans l'industrie chimique et alimentaire.
- Possibilité facile de déformation et de soudage.

1.2. Elaboration de l'aluminium

Le minerai utilisé pour l'élaboration de l'aluminium est la bauxite, c'est un oxyde d'aluminium contenant des impuretés tels que la silice, l'oxyde de fer et l'oxyde de titane. Le constituant essentiel est l'aluminium hydraté sous différentes formes : $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ et $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Les deux types de bauxites sont :

- Les bauxites rouges dont la teneur en oxyde de fer est relativement élevée.
- Les bauxites blanches, qui contiennent peu de fer, mais beaucoup de silice.

Le plus souvent, on utilise les bauxites rouges pour l'élaboration de l'aluminium en raison de leur faible teneur en silice ($< 5\%$).

La composition chimique moyenne d'une bauxite rouge est la suivante :

Al_2O_3 : 53 %, SiO_2 : 4 %, H_2O : 13 %, Fe_2O_3 : 25 %, TiO_2 : 3 %

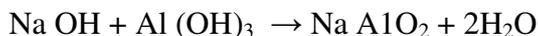
Les bauxites blanches servent à la fabrication de ciment, d'abrasif et de produits réfractaires. La bauxite se prépare le plus souvent selon le procédé BAYER et selon les étapes suivantes :

a. Concassage de la bauxite :

La bauxite est concassée et éventuellement broyée après séchage.

b. Attaque de la bauxite par la soude (Na OH) concentrée :

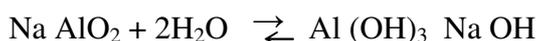
L'opération s'effectue dans des autoclaves à une température $T = 170^\circ\text{C}$ et une pression de 7 atmosphères. La bauxite est dissoute sous forme d'aluminate de sodium. Le fer ne se dissout pas, tandis que l'acide silicique passe dans les silicates de Na et Al :



Ce qui entraîne une perte en Al et NaOH. L'opération se fait généralement en marche continue par passage à travers une série d'autoclaves pour une durée de 6 à 8 heures. La lessive obtenue contient en plus de la soude concentrée, 270g de Al_2O_3 par litre.

c. Séparation de l'aluminate de sodium et précipitation de l'alumine :

La lessive est extraite des autoclaves pour être diluée afin d'obtenir une bonne concentration du reste de la solution et de la boue. Après dilution, concentration et filtrage, on obtient une liqueur claire dans laquelle l'aluminium est dissous, elle est envoyée ensuite aux réservoirs de précipitation où s'effectue à 60°C , l'opération inverse de la réaction de dissolution :



La cristallisation de $\text{Al}(\text{OH})_3$ pur, s'effectue très lentement. En cinq jours, il y a dépôt d'environ 60 % de l'alumine contenue dans l'aluminate. Pour accélérer le processus de dépôt, on ajoute à la liqueur claire, de l'hydroxyde d'aluminium solide (moyens de génération).

A la fin, $\text{Al}(\text{OH})_3$ cristallisé, est aspiré et filtré de la lessive et séché, ensuite acheminé vers les fours rotatifs. Le résidu de filtration subit l'opération de concentration par évaporation avant d'être utilisé comme soude concentrée.

d. Calcination de l'alumine :

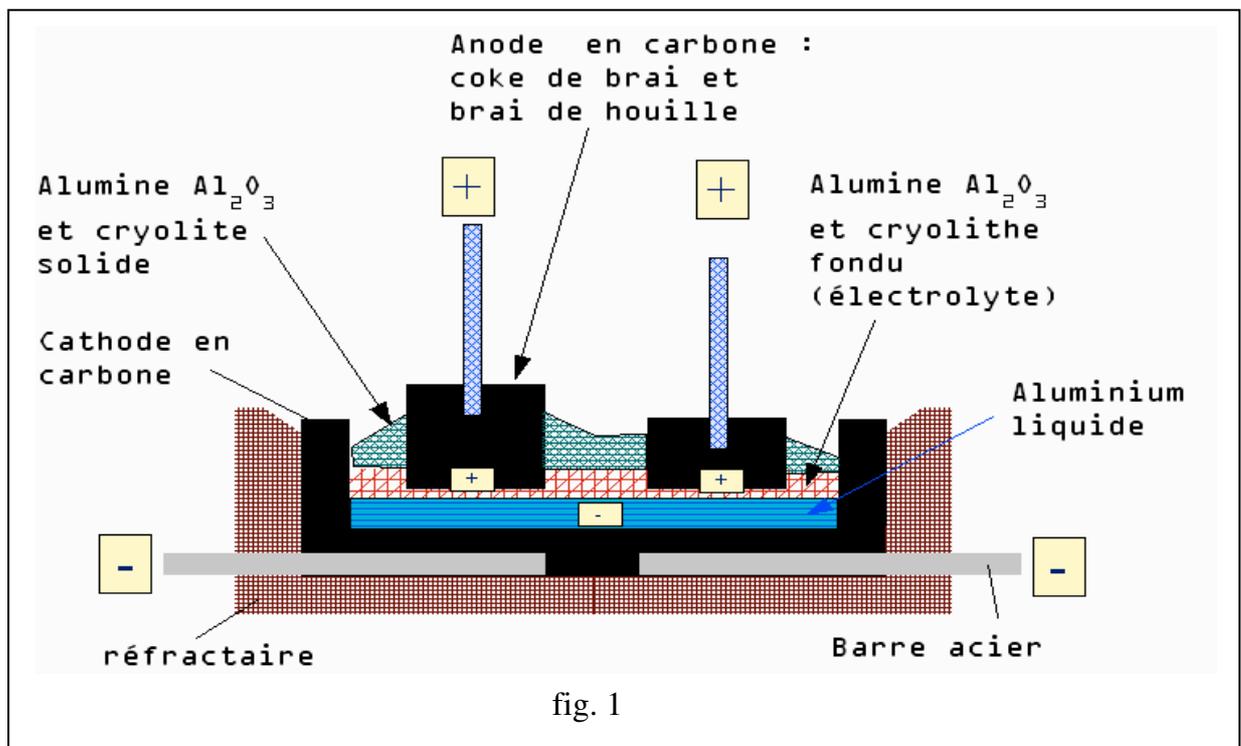
L'aluminium hydraté, après séchage, subit une calcination dans les fours rotatifs à une température de 1200°C , on obtient de l'alumine avec une teneur en Al_2O_3 de 99,2 à 99,5 %.

e. Electrolyse de l'alumine :

Du fait de la grande affinité de l'aluminium pour l'oxygène, l'aluminium ne peut être réduit par les réducteurs habituels (C ou Co) et l'on a recours à l'électrolyse. La décomposition

électrolytique de l'alumine, s'effectue dans un bain de cryolite Na_3AlF_6 , à une température de 920 à 950°C. La cryolite pure, se fond à 1000°C, alors que l'alumine fond à 2000°C.

Durant l'électrolyse, la cryolite dissout de l'alumine, à cet effet on ajoute du Al_2F_3 pour la neutralisation des éléments alcalins accompagnant l'alumine, ainsi que pour avoir un électrolyte à caractère acide faible et enfin pour diminuer la température de fusion de l'électrolyte. L'une des exigences envers la composition chimique de l'alumine est surtout la teneur de Fe_2O_3 , qui doit être inférieure à 0,04 % et celle de $\text{SiO}_2 < 0,3$ %, car ces deux composés sont plus nobles que l'aluminium et peuvent être séparés avec l'aluminium durant l'électrolyse. Ce qui diminue la pureté de l'alumine est l'électrolyse proprement dite, effectuée dans un four, (fig. 1), avec une masse en carbone jouant le rôle de cathode et fermant le fond du four à la partie supérieure, où sont placées les anodes (anodes précuites ou anodes continues).



La tension de travail est de 4,5 volts et l'ampérage est de 30.000 à 100.000 Ampères. L'aluminium s'accumule sur le fond du four et forme pratiquement la cathode et de temps en temps, il est recueilli et coulé en lingots ou dans des mélangeurs. Pour l'élaboration d'une tonne d'aluminium, on a besoin de :

- 2000 kg d'alumine.
- 30 kg de cryolite.
- 30 kg de fluorure d'alumine.
- 550 kg d'anode en carbone.

- 15 à 20 MWH de charge électrique.

L'aluminium obtenu a une pureté de 99,2 à 99,9 % et les impuretés essentielles sont : Fe et Si et en faible quantité, Cu, Mg, Ti, Na. Pour l'élaboration de l'aluminium pur à 99,99 %, il est nécessaire de procéder à une deuxième électrolyse. L'aluminium pur, possède une résistance chimique très élevée. Les alliages d'aluminium à grande résistance sont plaqués par de l'aluminium pur, afin de combiner la bonne résistance à la corrosion avec la résistance de l'alliage. L'aluminium pur, peut avoir un éclat grâce aux différents procédés de trempage. L'oxydation anodique est le traitement superficiel le plus important pour l'aluminium. Il s'agit du renforcement du film d'oxyde naturel par la voie électrolytique, donc l'augmentation de l'action de protection contre la corrosion et l'amélioration de la dureté et du comportement contre l'usure. Dans le tableau ci-dessous est indiqué la composition chimique de l'aluminium pur selon TGL

Type	Quantité en %						
	Total	Fe	Si	Cu	Zn	Ti	Autres
Al 99,99 R	0,01	0,005	0,005	0,003	0,005	0,002	0,001
Al 99,95 R	0,05	0,025	0,020	0,015	0,005	0,005	0,005
Al 99,9 R	0,10	0,05	0,04	0,03	0,005	0,01	0,001
Al 99,8	0,20	0,12	0,10	0,01	0,04	0,03	0,01
Al 99,7	0,30	0,16	0,10	0,01	0,05	0,03	0,01
Al 99,5	0,50	0,40	0,16	0,02	0,06	0,03	0,01
Al 99,4	0,60	0,50	0,30	0,02	0,07	0,03	0,03
Al 99,0	1,00	0,60	0,40	0,02	0,08	0,03	0,04
E-Al	0,50	0,40	0,10	0,02	0,040	*	0,01

Remarque :

$Ti + Mn + Cr + V \leq 0,03$

$Mn, V, Cr \leq 0,010$

1.3. Caractéristiques de l'aluminium

1.3.1. Caractéristiques physiques

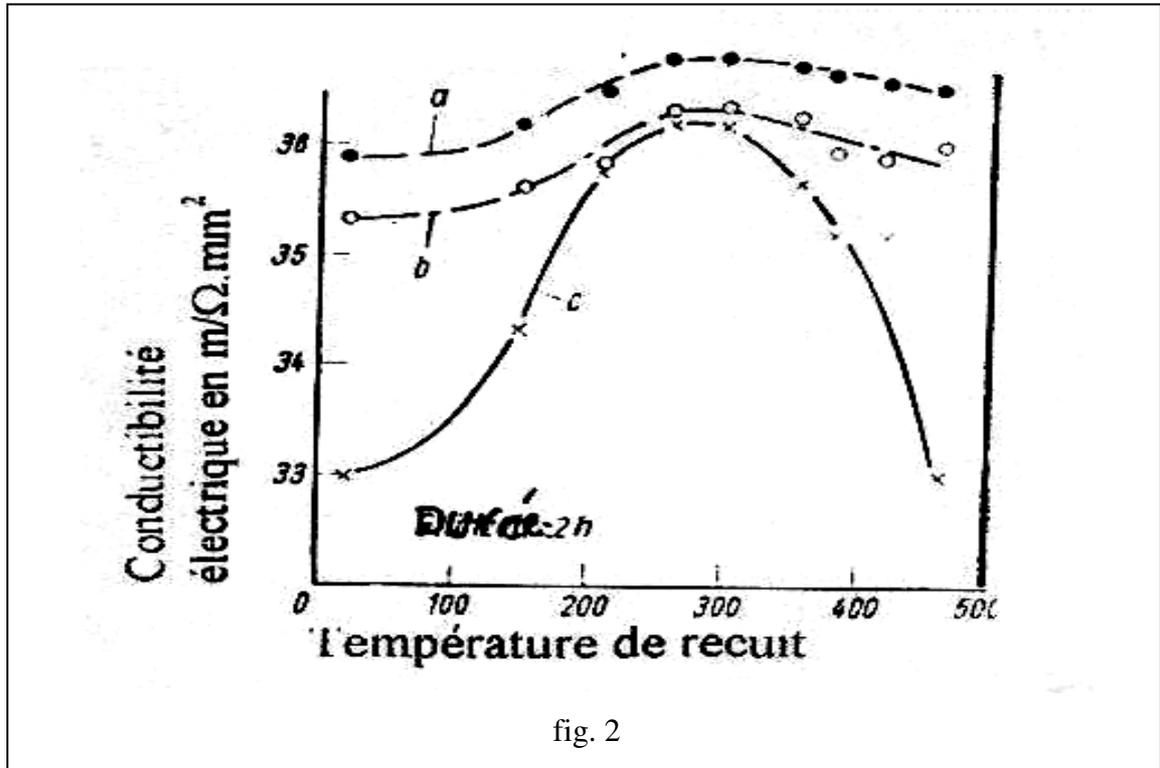
- Température de fusion : 660°C.
- Point d'ébullition : 2060°C.
- Chaleur spécifique :
 - A 20°C : 0,214 cal/g°C
 - A 100°C : 0,223 cal/g°C
 - A 500°C : 0,266 cal/g°C
- Conductibilité thermique : (c'est un excellent conducteur de chaleur)
 - A 0°C : 0,50 cal/cm.s°C.
 - A 100°C : 0,51 cal/cm.s°C.
 - A 200°C : 0,52 cal/cm.s°C.
- Résistivité à l'état pur $2,63 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$.
- Allongement linéaire : 20 à 100°C : $24 \cdot 10^{-6} / ^\circ C$ et jusqu'à 600°C : $28,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ C$.
- Densité (à 20°C) : $2,7 \text{ g/cm}^3$.
- Conductibilité électrique : (65% de celle du cuivre pour l'aluminium pur à 99,5 %). La conductibilité électrique de l'aluminium diminue lorsque les impuretés augmentent.

L'aluminium, grâce à sa résistivité, est surtout utilisé pour la fabrication de chaudière et d'ustensiles de cuisine. Lorsqu'il est poli, c'est un métal blanc et brillant et possède un grand pouvoir de réflexion, on l'utilise comme réflecteur pour chauffage et éclairage ou surface réfléchissante des miroirs de télescopes. La capacité de réflexion peut atteindre jusqu'à 90 %.

Un conducteur d'aluminium, comparé avec un autre en cuivre, peut avoir la même résistance, la moitié de son poids, mais 1,3 fois plus grand. Donc l'utilisation de l'aluminium dans l'électrotechnique est très limitée à cause du diamètre des conducteurs.

Les figures ci-dessous, montrent :

- **Figure 2** : la dépendance de la conductibilité électrique en fonction de la température de recuit.
 - Courbe a : 0,13 % Si et 0,30 % Fe.
 - Courbe b : 0,12 % Si et 0,50 % Fe.
 - Courbe c : 0,64 % Si et 0,10 % Fe.



- **Figure 3 :** l'influence des différents éléments d'alliages, dissous dans les cristaux mixtes, sur la conductibilité spécifique de l'aluminium à $T = 20^\circ C$.
- **Figure 4 :** l'influence du degré de pureté de l'aluminium sur la résistance spécifique électrique et sur la conductibilité électrique.

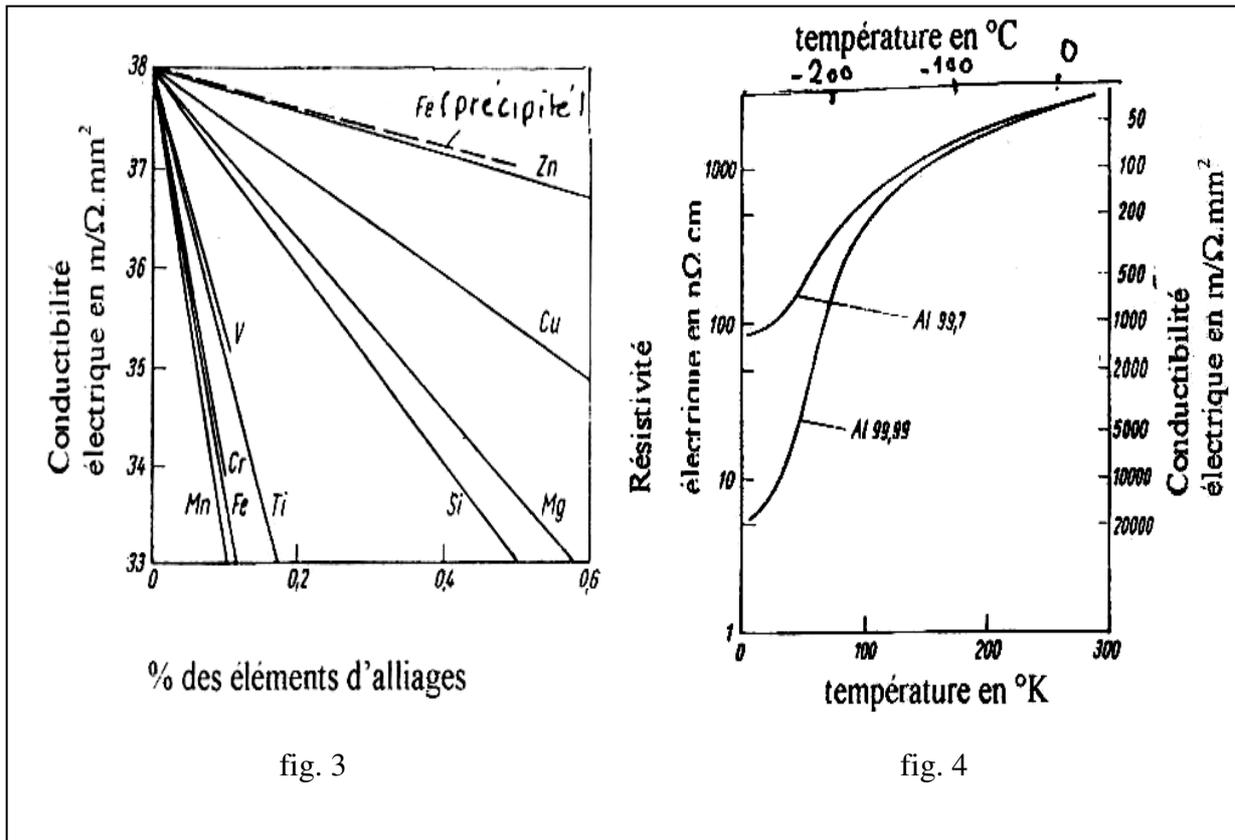


fig. 3

fig. 4

1.3.2. Caractéristiques mécaniques

A cause de sa structure du type CFC, l'aluminium pur est très bien déformable à froid et à chaud, il est donc très ductile. Cette plasticité élevée à l'état recuit rend très aisé le corroyage, par contre, son usinage étant mal aisé. L'aluminium se prête bien à toutes les modalités de soudage sous gaz inerte tels que l'argon ou l'hélium (gaz de protection), sinon l'aluminium s'oxyde facilement et forme une pellicule de Al_2O_3 .

Sa faible dureté et sa faible limite élastique sont défavorables pour son emploi en mécanique. Les propriétés mécaniques de l'aluminium dépendent :

- Des traitements mécaniques (forgeage, laminage, etc.).
- Des traitements thermiques (trempe, recuit, etc.).
- Des éléments d'addition (Fe, Cu, Mn, Zn, Mg, Si).

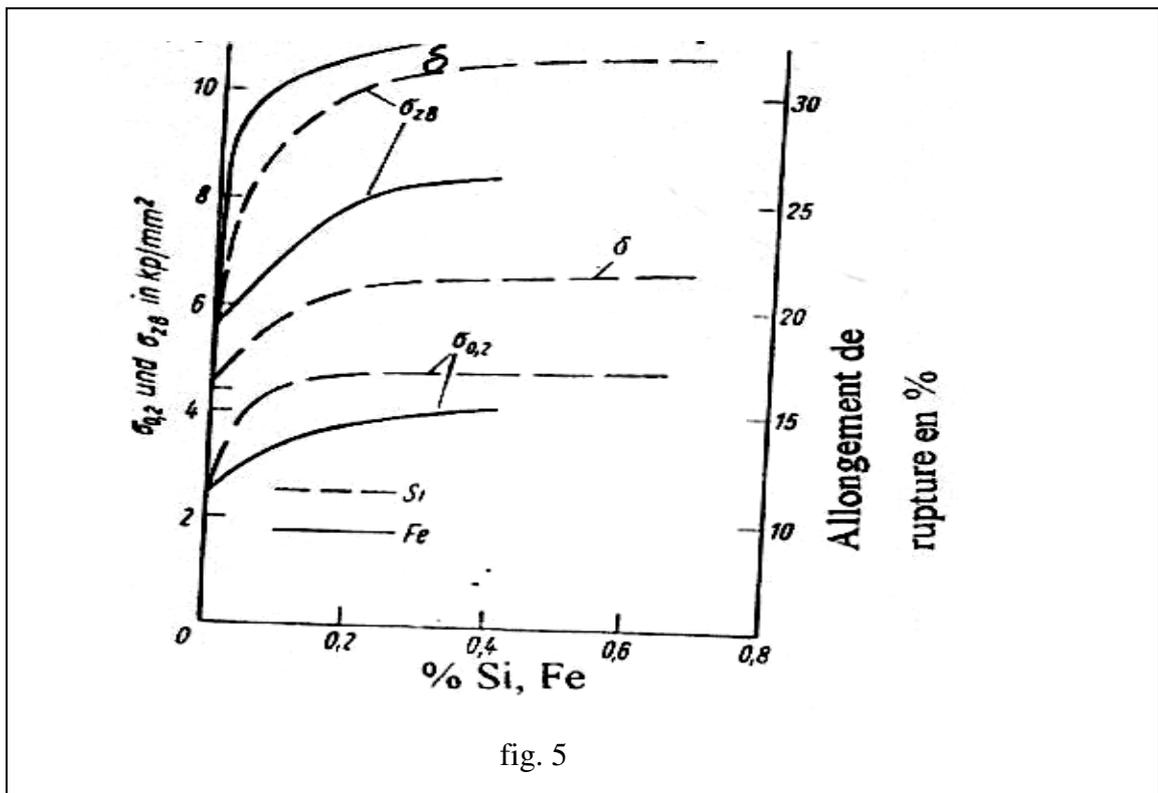
A titre d'exemple :

- Les propriétés mécaniques de l'aluminium (99,6 %) coulé sont :
 - R (résistance à la traction) = 70 à 100 N/mm².
 - $R_{0,002}$ (limite élastique) = 30 à 40 N/mm².
 - A (allongement) = 15 à 25 %.
 - HB (dureté brinell) = 15 à 25 HB.
 - E (module d'élasticité) = 67500 N/mm².

- Les propriétés mécaniques de l'aluminium (haute pureté) recuit :
 - $R = 50 \text{ N/mm}^2$.
 - $R_{0,002} = 15 \text{ N/mm}^2$.
 - $A = 50 \%$.
 - $E = 71000 \text{ N/mm}^2$.

Une déformation plastique à froid de l'aluminium industriel augmente sa charge de rupture jusqu'à 150 N/mm^2 mais l'allongement baisse jusqu'à 6% .

L'influence du fer et du silicium sur les propriétés mécaniques de l'aluminium à l'état de recristallisation (après un traitement thermique de 5 heures à 420°C) est montrée sur la figure 5.



Le silicium augmente la limite d'élasticité et la résistance de l'aluminium plus que le fer. Tandis que le fer améliore l'allongement, cela est expliqué par la précipitation des particules fines et hétérogènes de Al_3Fe dans l'alliage binaire Al-Fe, qui seront transformés en grain fins lors du recuit de recristallisation.

Les grains fins donnent essentiellement une plasticité meilleure que celle des gros grains. Le fer stabilise la grosseur des gros grains de recristallisation et améliore les propriétés mécaniques et surtout la valeur de l'allongement et celle de rupture. Le cuivre aussi améliore la résistance, tandis que le zinc et le magnésium, avec de petites concentrations, ne montrent aucun effet.

A cause de la faible résistance à l'état recuit d'adoucissement, les produits en aluminium pur et très pur subissent un durcissement à froid répété.

- Al 99,99 % : $\sigma_{0,2} = 15$ à 25 N/mm^2 et $\sigma_{ZB} = 40$ à 60 N/mm^2 .
- Al 99,5 % : $\sigma_{0,2} = 35$ à 45 N/mm^2 et $\sigma_{ZB} = 70$ à 90 N/mm^2 .

1.3.3. Tenue à la corrosion

Le phénomène de la tenue à la corrosion est expliqué par la formation d'une pellicule ($\approx 0,7 \mu\text{m}$) non soluble dans l'eau et protégeant le métal contre les milieux oxydants et une éventuelle attaque chimique. L'aluminium est très résistant contre l'influence atmosphérique et contre beaucoup de produits de l'industrie chimique et alimentaire.

Le tableau ci-dessous donne une idée sur la tenue de la corrosion de l'aluminium et de ses alliages (sans couche de protection) pour les différents milieux.

Milieu	Al 99,5 %		Al Mg		Al Cu Mg	
	2	3	1	2	3	5
Eau de mer	2	3	1	2	3	5
Viande	1		-		-	
glace	1		1		2	
Fréon	1		1		-	
Eau distillée	1	2	1	2	-	
Essence	1		1		1	3
Gasoil	1		1		1	
Plâtre	1	2	-		-	
Matériaux de construction	3	6	-		-	
Atmosphère et industrie	2	3	3	2	3	
Eau de fleuve	1	2	1		3	
Acétylène	1		-		2	3
Ammoniaque	1	2	1	2	-	

Alcool éthylique sans eau	5		-		-	
Alcool éthylique avec eau	1	2	-		-	
Ethane	1		1		-	
Produit alimentaire	1		-		-	
Légende						
1. Bon résistant	2. Résistant		3. Peu résistant			
4. Encore utilisable	5. Presque résistant		6. Non résistant			

1.4. Alliages d'aluminium

1.4.1. Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de l'aluminium

L'aluminium pur, non allié possède des propriétés mécaniques faibles, afin d'améliorer ces propriétés, on est conduit à ajouter les éléments d'addition lors de sa fusion, tels que Mg, Mn, Cu, Si, Ni, Ti, Zn, Co, etc. Ces éléments entrent en solution solide ou formant des précipités qui entraînent des composition d'alliages industriels. L'avantage des alliages d'aluminium est qu'ils permettent d'avoir une bonne résistance mécanique tout en conservant une faible masse volumique.

a. Addition de Mg : Les alliages formés, possèdent une résistance mécanique moyenne. Ils sont utilisés dans le domaine de placage, lorsque avec l'aluminium, il s'avère difficile. Ils sont faciles à polir et conservent longtemps leur poli à cause de la haute résistance chimique.

b. Addition de (Mg + Mn) : Ces deux éléments augmentent la résistance mécanique sans modifier la déformabilité. Ils se prêtent bien à l'emboutissage et au polissage.

c. Addition (le (Cu + Si) : Ce sont des alliages de fonderie, présentant une bonne coulabilité et conviennent surtout pour les pièces compliquées.

d. Addition de (Co + Ti + Zn) : Accroissent la résistance mécanique sans altérer la coulabilité, l'addition de Cu et de Zn facilite l'usinage.

e. Addition de (Mg + Zn + Cu) : Ils sont aptes aux traitements mécaniques et présentent une résistance mécanique maximum. La présence de cuivre les rend durcissables à chaud.

1.4.2. Traitements thermiques des alliages d'aluminium

Pour assurer le durcissement des alliages d'aluminium, a recourt à la trempe et au vieillissement. Les structures hors d'équilibre et les défauts de structure produits par la déformation qui dégradent la plasticité de l'alliage sont éliminés en appliquant le recuit.

1.4.2.1. Trempe et vieillissement

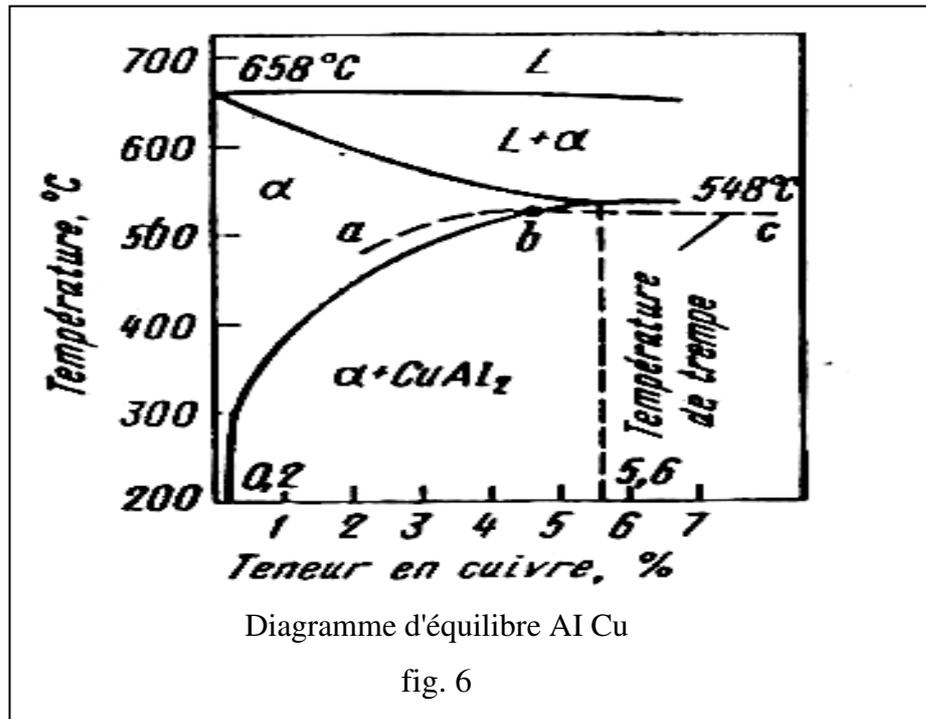
Avec l'abaissement de la température, la solubilité dans l'aluminium, de la plupart des composants, diminue, ce qui permet d'utiliser la trempe et le vieillissement pour durcir les alliages.

a. Trempe des alliages d'aluminium :

La trempe structurale des alliages d'aluminium a des buts et des effets totalement différents de la trempe martensitique des aciers. Le cycle thermique de ce traitement comprend :

- Le chauffage jusqu'à la température de dissolution totale ou partielle des phases intermétalliques en excès dans l'aluminium.
- Le maintien à cette température.
- Le refroidissement suffisamment rapide (hypertrempe) jusqu'à la température ambiante pour obtenir un solide sursaturé.
- Le maintien isotherme ultérieur qui conduit au durcissement de l'alliage. Celui-ci est réalisé, soit à la température ambiante (vieillissement naturel ou maturation), soit à une température supérieure (appelé vieillissement artificiel ou simplement vieillissement).

Pour mieux comprendre les mécanismes de durcissement structurel engendré par la trempe, prenons l'exemple de l'alliage Al 4 %-Cu. D'après le diagramme Al-Cu, (fig. 6), la trempe des alliages Al-Cu est déterminée par la ligne abc qui passe au dessus de la ligne de solubilité limite des alliages contenant une teneur en cuivre < 5,6 % et au dessous de ligne eutectique (584°C) pour les alliages contenant une plus grande quantité de cuivre (> 5,6%). Lors de la chauffe pour trempe des alliages titrant 5,6 % Cu, la phase excédentaire en Al_2 se dissout complètement et le refroidissement rapide ultérieur ne fixe que la solution solide α sursaturée qui contient autant de cuivre qu'il y a dans l'alliage. Pour une teneur en cuivre > 5,6 %, la structure des alliages après trempe, se composera de solution solide α sursaturée dont la composition correspond au point b et de cristaux de la combinaison $CuAl_2$ non dissoute au chauffage.



La durée de séjour, à la température de trempe nécessaire pour la dissolution des phases intermétalliques, dépend de l'état structural de l'alliage, du type de four et de l'épaisseur de la pièce.

Exemple : pour des épaisseurs 0,5 à 150 mm, le temps de chauffage étant de :

- Fours de salpêtres : séjour de 10 à 80 min.
- Four électrique à circulation forcée d'air : séjour 30 à 210 min.
- **Pièces moulées : 2 à 15 heures.**

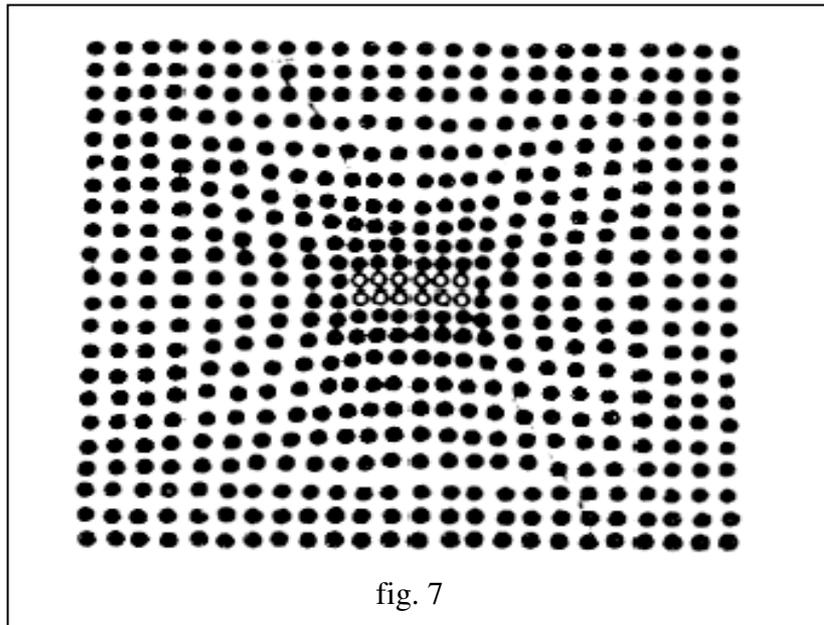
Après la trempe, les alliages de forge sont refroidis à l'eau froide et les moulages de forme à l'eau portée de 50 à 100°C, pour éliminer le gauchissement et la formation de tapures. Après la trempe, les alliages, tout en possédant une faible résistance (R , $R_{0,002}$), acquièrent une élasticité élevée (A , Z).

b. Vieillissement des alliages trempés :

La trempe est suivie d'un vieillissement qui représente est un maintien à l'ambiante pendant quelques jours (maturation) ou un maintien pendant 10 à 24 heures à une température accrue (vieillissement artificiel ou par revenu). Le vieillissement s'accompagne de décomposition de la solution solide sursaturée qui va de pair avec le durcissement de l'alliage.

Si la distribution des atomes de cuivre dans le réseau de l'alliage est statiquement uniforme, la décomposition de la solution solide sursaturée se produit en plusieurs stades, en fonction de la température et de la durée du vieillissement.

Le vieillissement naturel (maturation à 20°C) ou artificiel (durcissement par le revenu à basses températures, inférieures à 100 ou 150°C), ne révèle pas la décomposition de la solution solide avec isolation de la phase en excès à ces températures. Les atomes de cuivre se déplacent seulement à l'intérieur du réseau cristallin de la solution solide α à de très faibles distances et s'accumulent suivant les plans {100} en agrégats bidimensionnels lamellaires ou disques dits zones de **GUINIER-PRESTON (GP1)** comme le montre la figure 7.



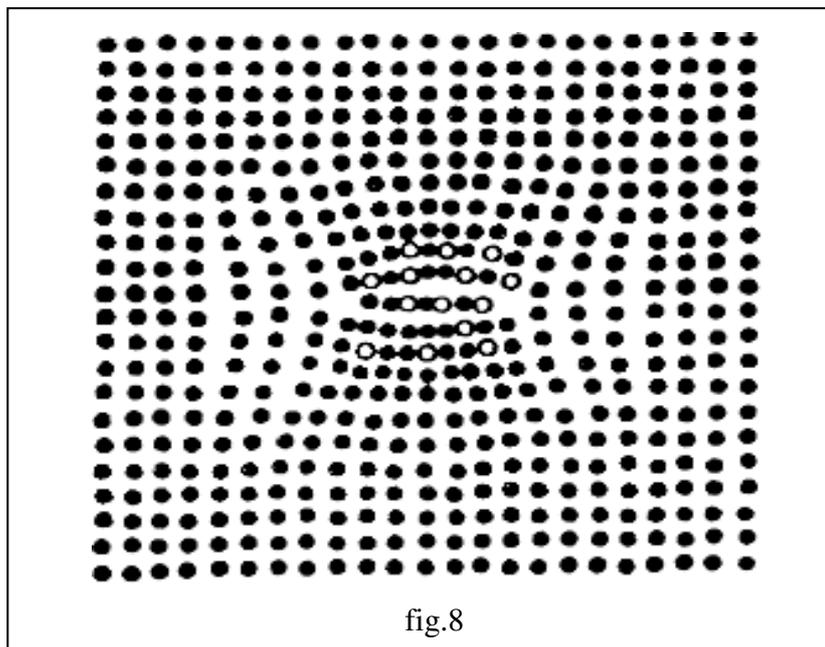
Au sein de chaque cristal, ces zones longues de quelques dizaines d'angströms (30 à 60 Å) et de 5 à 10 Å d'épaisseur se répartissent plus ou moins régulièrement. La concentration du cuivre dans les zones GP1 est plus faible que dans CuAl_2 (54 %).

En portant l'alliage après maturation en quelques secondes ou minutes à 230 ou 270°C et en le refroidissant rapidement, on supprime totalement le durcissement et l'alliage acquiert à nouveau les propriétés qu'il avait directement après trempe. Ce phénomène a reçu le nom de restauration. L'adoucissement à la restauration est dû au fait qu'à ces températures, les zones GP1 sont instables et c'est pourquoi elles se dissolvent dans la solution solide, alors que les atomes de cuivre se redistribuent de nouveau plus ou moins régulièrement dans le volume de chaque cristal de la solution solide, tout comme après la trempe.

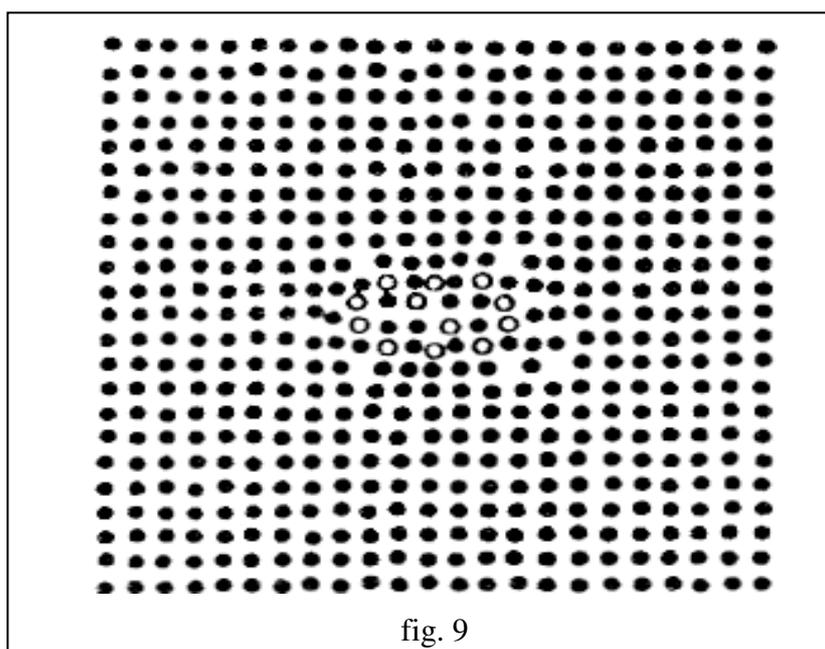
Le maintien ultérieur de l'alliage à l'ambiante, conduit à nouveau à la formation des zones GP1 et à son durcissement. Pourtant après la restauration et le vieillissement qui la suit, les propriétés anticorrosives de l'alliage se dégradent, ce qui rend plus difficile l'utilisation de la restauration dans des buts pratiques.

Le séjour durable à 100°C, ou pendant quelques heures à 150°C, conduit à la formation des

grandes zones de Guinier Preston GP2, (fig.8) (10 à 40 Å d'épaisseur et 20 à 300 Å de diamètre) avec une structure ordonnée différente de celle de la solution solde α .

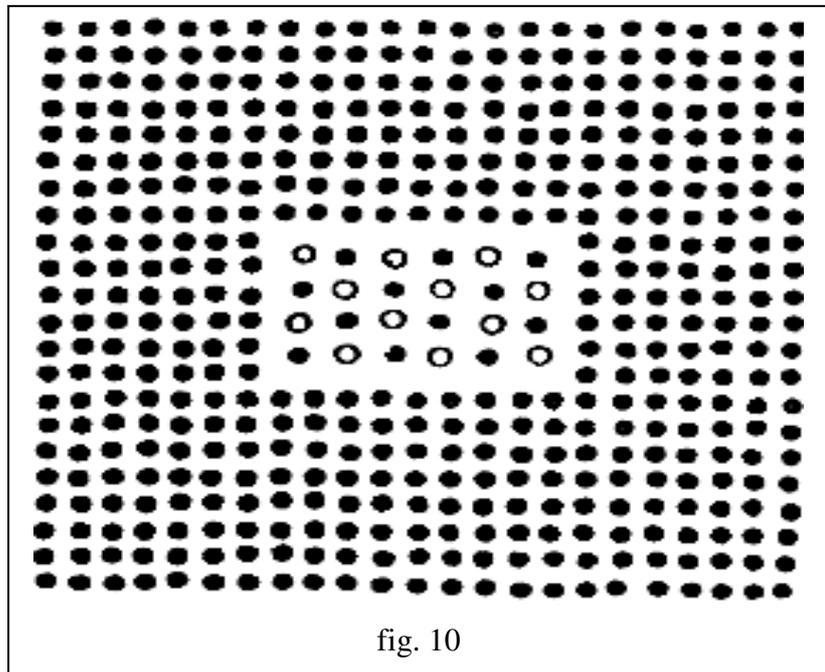
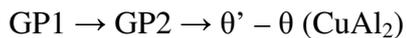


La concentration du cuivre dans ces zones correspond à la teneur dans CuAl_2 . Avec l'augmentation de la température de vieillissement, le processus de diffusion, transformations structurales ainsi que le durcissement lui-même, deviennent plus rapides. Le maintien pendant plusieurs heures aux températures 150 à 200°C, conduit au droit des zones GP2, à la formation de particules dispersées (lamelles fines) de la phase θ' intermédiaire dont la composition chimique (CuAl_2) alors que son réseau cristallin est différent, (fig.9).



La phase θ est liée par cohésion à la solution solide (fig.10) ; L'augmentation de la température jusqu'à 200 à 250°C, provoque la coalescence de la phase métastable et la formation de la phase stable, de la sorte, la maturation ne donne lieu qu'à la formation des zones GP1.

Dans le cas du vieillissement par revenu, la succession des transformations structurales peut être schématisée de la forme suivante.



Cela ne signifie, pourtant pas qu'une formation se transforme « sur place » en une autre. Il se peut que l'apparition de la formation ou de la phase successive se produit après dissolution de la formation initiale. Le meilleur durcissement des alliages s'obtient avec les alliages MgZn_2 , Mg_2Si et la phase S (Al_2CuMg) de structure complexe et de composition différente de celle de la solution solide α .

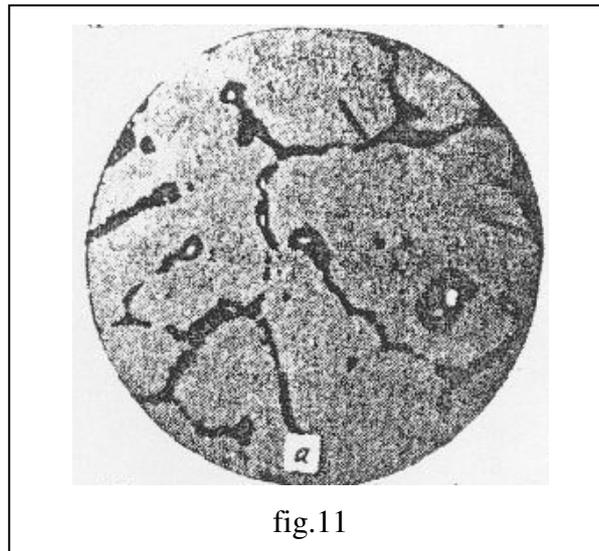
1.4.2.2. Recuit des alliages d'aluminium

Ses modalités sont :

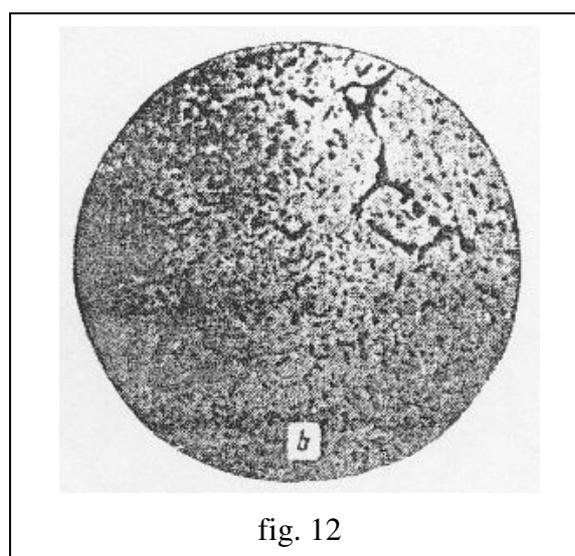
- Recuit d'homogénéisation.
- Recuit de recristallisation.
- Recuit d'adoucissement (après trempe et vieillissement préalable)

a. Recuit d'homogénéisation

Ce traitement est appliqué aux lingots avant corroyage pour éliminer la ségrégation dendritique qui conduit à la formation d'une solution solide inhomogène et au dépôt des inclusions eutectiques fragiles hors d'équilibre CuAl_2 , Al_2CuMg (phase 5), Mg_2Si , $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ (phase T), etc... aux joints des grains et entre les branches de dendrites, (fig.11).



Au cours de l'homogénéisation, la composition des cristallites de la solution solide est uniformisée, alors que les combinaisons intermétalliques se déposent sous forme de fines inclusions secondaires uniformément réparties, (fig. 12)



Il s'ensuit que la plasticité de l'alliage coulé s'améliore, ce qui permet d'augmenter le degré de corroyage lors du formage à chaud, la vitesse de filage et diminuer les rebuts technologiques.

L'homogénéisation contribue à l'obtention d'une structure à grains fins dans les tôles recuites et diminue l'aptitude à la corrosion sous tension. Le cycle thermique de ce recuit comprend :

- Un chauffage jusqu'à une température élevée de 450 à 520°C.
- Un maintien qui varie de 4 à 40 heures.
- Un refroidissement lent ou dans le four.

b. Recuit de recristallisation

Le recuit de recristallisation consiste à chauffer l'alliage déformé jusqu'aux températures supérieures à celles de la fin de recristallisation primaire. On l'applique pour supprimer l'érouissage et obtenir un grain fin. Dans la plupart des alliages d'aluminium, lorsque la déformation atteint 50 à 75 %, la température de début de recristallisation s'échelonne de 290 à 400°C. La température de recuit de recristallisation varie suivant la composition de l'alliage de 350 à 500°C et le maintien de 0,5 à 2,0 heures.

Après le recuit de recristallisation des alliages non durcis par traitement thermique, la vitesse de refroidissement est choisie arbitrairement. Pour les alliages durcis par traitement thermique, la vitesse de refroidissement allant jusqu'à 200 à 250°C doit être inférieure ou égale à 30°C/h. Le recuit comme opération intermédiaire est appliqué dans le travail à froid ou entre le corroyage à chaud et à froid.

Le recuit incomplet est une modalité de recuit de recristallisation. Il permet d'obtenir des propriétés intermédiaires entre l'état écroui et recristallisé. Dans ce cas, la température de recuit doit être inférieure à celle de la fin de recristallisation pour assurer l'obtention d'une structure sous forme de polygone, ou partiellement recristallisée, qui supprime en partie l'érouissage. Le plus souvent, le recuit est appliqué dans le cas des alliages de forge et de laminage non soumis au durcissement per trempe et vieillissement.

c. Recuit d'adoucissement des alliages ayant subi la trempe et le vieillissement

Il est effectué à une température de 350 à 450°C avec un séjour de 1 à 2 h. Ces températures assurent la décomposition complète de la solution solide sursaturée et la coalescence des phases qui durcissent. La vitesse de refroidissement ne doit pas dépasser 30°C/h. Après le recuit, l'alliage possède une faible charge de rupture, une plasticité suffisante et une résistance élevée à la corrosion sous tension.

1.4.3. Propriétés des alliages d'aluminium

Les principales caractéristiques des alliages d'aluminium sont :

a. Résistance à chaud : D'une certaine manière, on peut dire que la résistance à chaud est assez faible au delà de 150°C, sauf pour les alliages Al-Cu où l'on peut atteindre 300°C.

b. Résistance aux basses températures : Les alliages d'aluminium ont un réseau cristallin CFC, par conséquent, ils ne sont pas fragiles d'où leur application en cryogénie.

c. Résistance à la fatigue : De manière générale, le coefficient d'endurance R_m est de l'ordre de 0,5 pour les alliages non trempant et de (0,25 à 0,30) pour les alliages trempant.

d. Résistance à la corrosion : Comme pour l'aluminium pur; les alliages d'aluminium sont protégés contre la corrosion grâce à la formation d'une pellicule de Al_2O_3 . La protection anti-corrosion peut être améliorée par anodisation. Les risques de corrosion à craindre dépendent des éléments d'addition.

- Corrosion galvanique à craindre en présence du fer.
- Corrosion de type intergranulaire et sous tension, à craindre en présence d'additions telles que Cu, Mn, Mg + Si et Mg + Zn

e. Mise en forme : Les alliages d'aluminium sont faciles à laminier et emboutir. En particulier les alliages Al-Mg sont très appropriés au filage à chaud.

f. Soudage : De manière générale, le soudage est facile grâce à la couche protectrice d'alumine (procédés de soudage sous gaz protecteur TIG ou sous vide).

1.4.4. Classification des alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium les plus répandus sont Al-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Mg-Si, ainsi que Al-Zn-Mg-Cu. A l'état d'équilibre, tous ces alliages forment une solution solide faiblement alliée et des phases intermétalliques $CuAl_2$, (phase θ), Mg_2Si , Al_2CuMg (phase S), Al_6CuMg_4 (phase T). Al_3Mg_2 , $Al_3Mg_3Zn_3$ (phase T) Tous les alliages d'aluminium peuvent être rangés en trois groupes :

1. Alliages corroyés : destinés à la forge et le laminage, ils sont prévus pour l'obtention des demi-produits (tôles, plaques, feuillets, barres. Profilés, tubes, etc.), ainsi que des pièces de forge et estampées produites par laminage, pressage, forgeage et estampage.

2. Alliages de fonderies : prévus pour le moulage des formes.

3. Alliages frittés : élaborés par frittage suivant la méthode de métallurgie des poudres.

1.4.4.1. Alliages corroyés avec et sans durcissement structural

Ils sont obtenus, fondus dans des fours à induction, car grâce au mouvement du bain induit qu'on obtient un mélange homogène, c'est à dire, une répartition homogène des éléments d'addition. Le magnésium et le zinc possèdent pratiquement un point de fusion inférieur à celui de l'alliage d'aluminium de $750^\circ C$, sont ajoutés sous forme de métaux, cependant le Cu, Si, Mn sont introduits sous forme d'alliages, car ils possèdent un point de fusion inférieur à $750^\circ C$. Suivant l'aptitude au durcissement par traitement thermique, les alliages

corroyés sont classés en deux types :

- Alliages sans durcissement structural (non trempant).
- Alliages avec durcissement structural (trempant).

A. Alliages sans durcissement structural

Ce sont les alliages à base de Mn et Mg tels que Al-Mn, Al-Mg, Al-Mg-Mn (alliages de forge et d'estampage). Leur durcissement naturel est dû à la formation d'une solution solide et dans une moindre mesure aux phases en excès.

Leurs compositions chimiques et propriétés mécaniques sont données sur le tableau ci-dessous selon la norme GOST.

Nuance	Composition chimique (%)		Propriétés mécaniques		
	Mn	Mg	R (kgf/mm ²)	R _{0,002} (kgf/mm ²)	A (%)
AMH	1,0 à 1,6	-	13 (17)	5 (13)	23 (10)
AMr2	0,2 à 0,6	1,8 à 2,8	20 (25)	10 (20)	23 (10)
AMr3	0,3 à 0,6	3,2 à 3,8	22	11	20
AMr5	0,3 à 0,6	4,8 à 5,8	30	15	20
AMr6	0,5 à 0,8	5,8 à 6,8	30 (40)	15 (30)	18 (10)

Ces types d'alliages se présentent bien au travail à froid (estampage, cintrage, etc.), au soudage et possèdent une tenue à la corrosion élevée. La limite élastique et la résistance à la traction augmentent et l'allongement diminue. Au delà de la température de 150°C, le long séjour conduit à la diminution de la résistance.

Un recuit de recristallisation entre 350 à 450°C peut produire un retour à l'état doux. Pour obtenir une structure à grains fins lors de la recristallisation, il est exigé au préalable une déformation allant jusqu'à 50 %. Leur usinage à l'état recuit est très difficile.

a. Alliage Al-Mn

La teneur en manganèse est de 1,0 à 1,6 %. La résistance à la traction est supérieure que celle de l'aluminium pur, malgré que les propriétés de déformation sont identiques. La tenue à la corrosion est aussi meilleure que celle de l'aluminium pur. Une meilleure usinabilité peut être

obtenue grâce à l'addition de magnésium (0,2 à 0,3) %, de titane ou de chrome. Le manganèse augmente aussi la température de recristallisation, l'addition d'une faible teneur en Mn permet d'augmenter nettement la résistance mécanique des alliages.

L'alliage Al-Mn est une solution solide de manganèse dans l'aluminium qui comporte également une faible quantité de particules de la combinaison Al_6Mn , voir diagramme d'équilibre partiel Al-Mn, (fig.13). Ils sont utilisés pour les toitures, coffrages, revêtements, réservoirs, ustensiles de cuisine, etc.

Caractéristiques des nuances 3003 et 3004 à l'état recuit.

Nuances	Composition	Rm (MPa)	A (%)
A – MI 3003	(1 à 1,5) % Mn (0,05 à 0,2) % Cu	100 à 130	25
A – MIG 3004	(1 à 1,5) % Mn < 0,25 % Cu	120 à 160	22

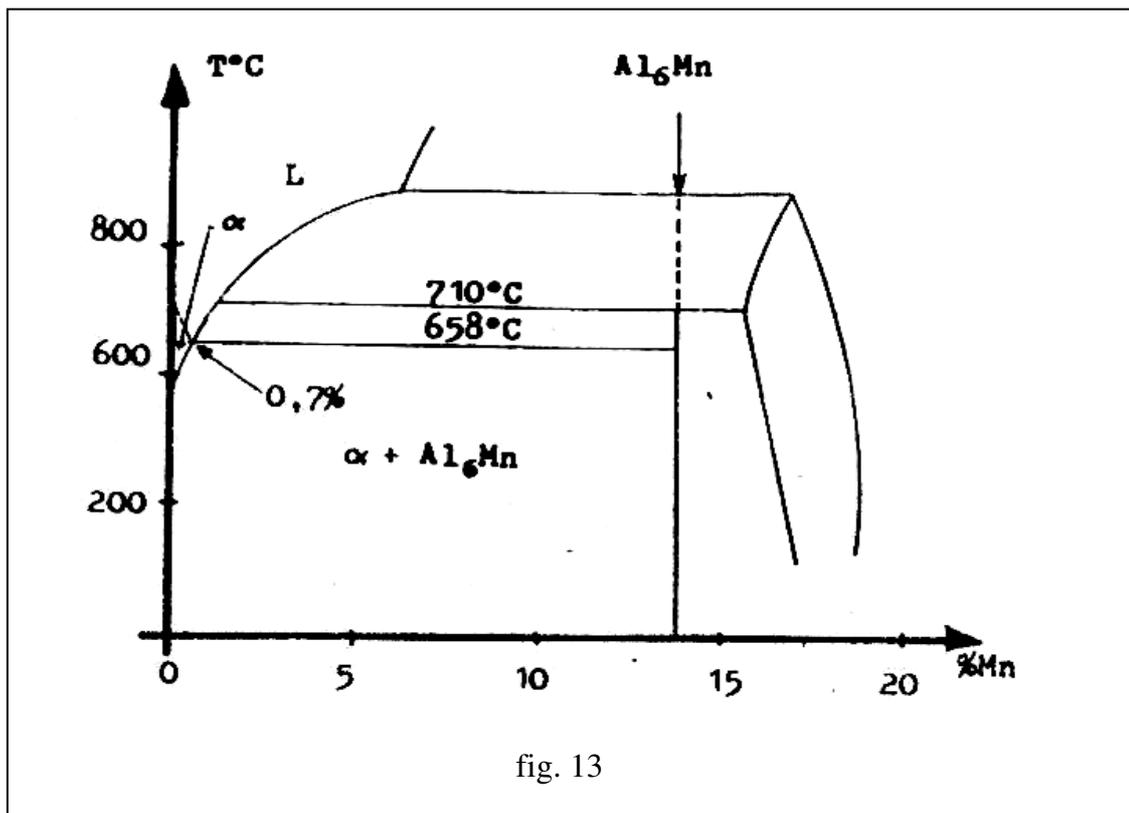


fig. 13

b. Alliage Al-Mg

A ce groupe appartiennent les alliages avec une teneur en magnésium de 0,2 à 7,2 % et une teneur en Mn de 0,2 à 0,8 %. Ces alliages sont caractérisés par une résistance (stabilité) élevée contre l'eau salée. Les alliages avec une teneur en Mn jusqu'à 5 % s'adaptent bien à l'oxydation anodique à cause de leur structure fine et homogène. Les alliages avec une teneur > 5 % en Mn se laissent difficilement travailler et posent des problèmes aux soudages et s'inclinent devant la corrosion intercrystalline et sous tension. Les alliages à 7 % Mn sont caractérisés par de bonnes propriétés de surface.

A l'état d'équilibre, après refroidissement, les alliages Al-Mg sont biphasés $\alpha + \beta$, (Al_3Mg_2). Pourtant la haute stabilité de la solution solide et la faible vitesse de diffusion du Magnésium dans l'aluminium font que même, après refroidissement lent, ils ne contiennent pas de phase excédentaire et se composent d'équilibre partiel Al-Mg, (fig.14).

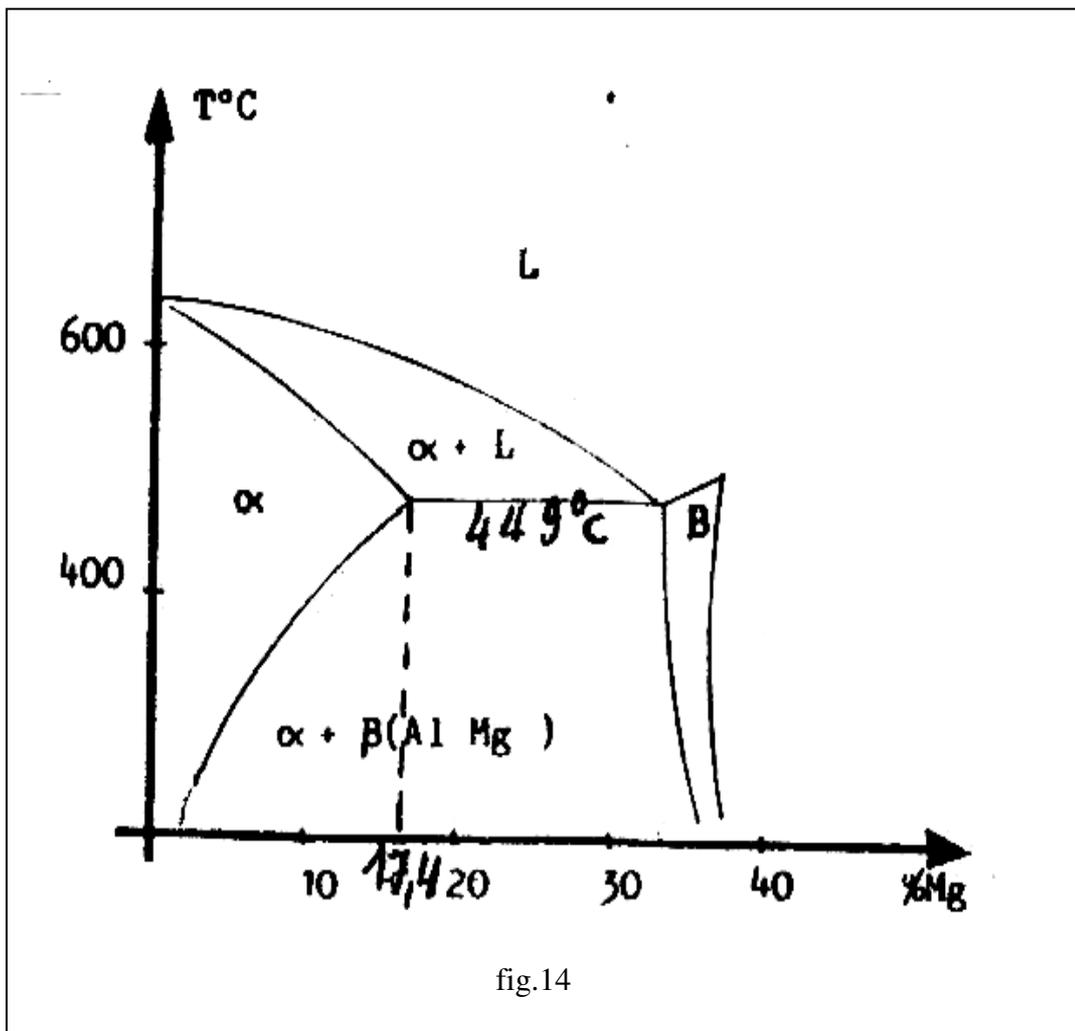


fig.14

Quand les alliages Al-Mg sont à l'état d'équilibre, la solubilité du magnésium dans la phase α est

d'environ 15 % à 450°C mais elle se réduit jusqu'à 2 % à la température ambiante.

A basse température, la précipitation de la phase β ne donne pas un durcissement structural appréciable. Les alliages Al-Mg sont en général limités à 5 % Mg en raison des difficultés de mise en œuvre et de transformation. La variation des propriétés mécaniques de l'aluminium en fonction de la teneur en Mg est donnée sur la figure 15.

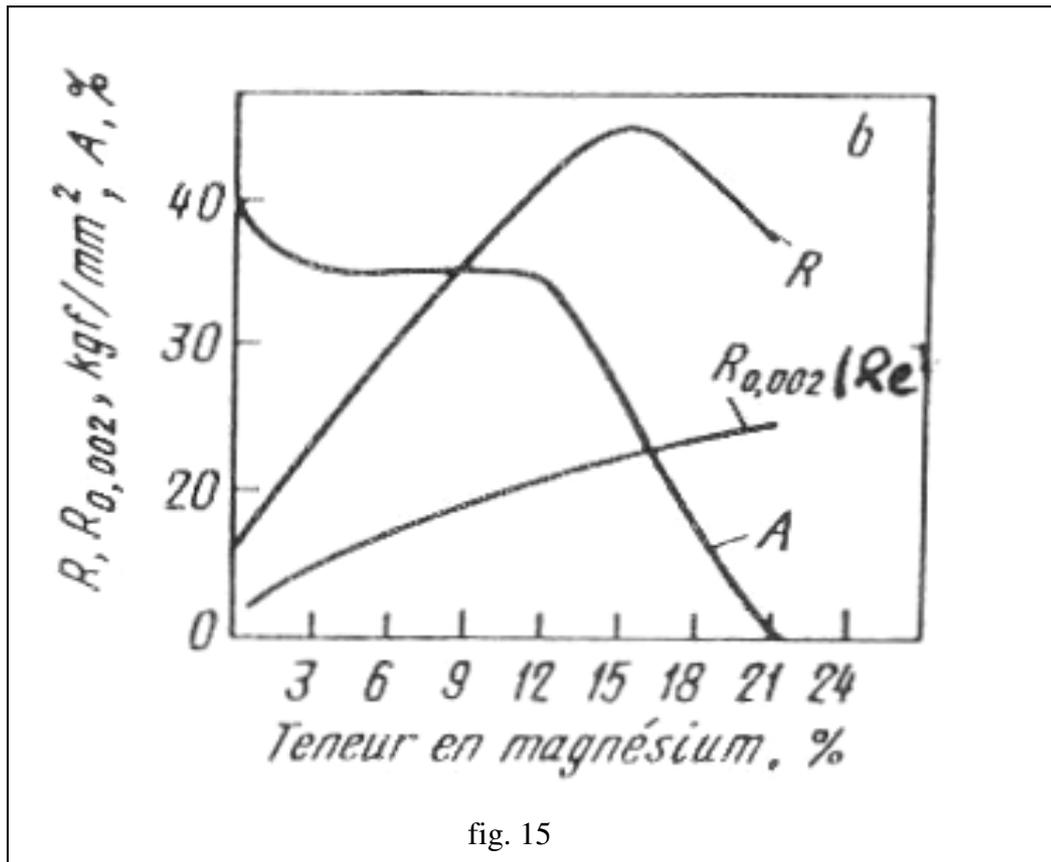


fig. 15

Le magnésium accroît fortement la résistance à la rupture jusqu'à 15 %, accroît moyennement la limite élastique et réduit brutalement l'allongement au delà de 12% Mg. Les alliages Al-Mg sont utilisés dans l'industrie automobile, aviation, navales, et pour des buts décoratifs.

c. Alliage Al-Mg-Mn

Ces alliages contiennent de 1,6 à 2,5 % Mg et de 0,5 à 1,5 % Mn. Ils possèdent une excellente résistance contre l'eau salée. L'addition d'une faible quantité de chrome (0,2 à 0,5) % peut éviter les difficultés qui se posent lors du travail du métal, la formation d'une structure à gros grains et la formations des fissures de soudage. Ces types d'alliages sont utilisés surtout dans la construction navale, l'aviation, dans l'industrie chimique et alimentaire.

B. Alliages avec durcissement structural (alliages de forge et de laminage)

Le durcissement des alliages d'aluminium a été découvert en 1906 par l'allemand Alfred Wilhr dans le système Al-Cu-Mg. Il est très connu aujourd'hui pour plusieurs alliages. Le but de ce traitement est d'augmenter la résistance mécanique et la résistance à l'usure du matériau.

Les différents alliages d'aluminium destinés au durcissement sont : AlCuMg, AlMgSi, AlZnMg, AlZnMgCu, leur composition chimique est indiquée sur le tableau ci-dessous selon TGL.

Types	% d'éléments d'alliages				% d'éléments d'admixture						
	Mg	Si	Cu	Mn	Si	Cu	Mn	Fe	Zn	Ti	autres
AlMgSi0,5	0,4 à 0,9	0,3 à 0,7	-	-	-	0,05	0,10	0,4	0,2	0,2	0,05
AlMgSi 1	0,7 à 1,5	0,7 à 1,5	-	0,05 à 1	-	0,10	-	0,5	0,2	0,2	0,05
AlCu4Mg1	0,4 à 1,1	0,2 à 0,7	3,5 à 4,8	0,4 à 1,0	-	-	-	0,7	0,3	0,2	0,05
AlCu4Mg2	1,2 à 1,8	-	3,9 à 4,8	0,4 à 1,1	0,5	-	-	0,5	0,3	0,2	0,05
AlCu3Mg	0,6 à 1,3	-	2,8 à 3,5	0,3 à 1,0	0,6	-	-	0,7	0,6	0,2	0,05
AlZnMgCu0,5	2,4 à 3,8	-	0,4 à 1,0	0,1 à 0,6	0,5	-	-	0,5	-	0,1	0,05

En plus Cr : 0,1 à 0,3 %.

Dans le passé, on utilisait surtout les alliages à haute résistance, tels que AlCuMg et AlZnCu, avec une limite de rupture $> 400 \text{ N/mm}^2$, surtout dans le domaine de l'aviation, mais au cours

des dernières années, il s'est développée la production de l'alliage AlMgSi avec une résistance moyenne utilisée surtout pour les produits pressés. Techniquement on utilise aussi le durcissement pour CuCr, CuZr, CuCrZr, CuBe, PbCaNa, etc. et même pour les aciers alliés

Conditions pour le durcissement d'un alliage

- La diminution de la température décroissance de la solubilité des éléments d'alliages dans le métal de base.
- Il existe des cristaux mixtes homogènes à haute température qui doivent être surfusionnés à la température ambiante. Donc il n'est pas permis pendant le refroidissement brusque à leur décomposition en phase équilibrée.
- Une troisième condition plus importante c'est que le système en question doit accepter d'être durci. Il y a une série d'alliages qui remplissent les deux conditions, mais ne montrent aucun durcissement.

Un alliage d'Al-Cu avec 4 % Cu, avec recuit d'homogénéisation à 500°C, ensuite à partir de cette température, il est refroidi à l'eau (refroidissement brusque), cet alliage montre une augmentation de la dureté jusqu'à un certain niveau (plateau), ensuite de nouveau jusqu'au maximum, après dépassement du maximum, elle chute, (fig. 16). La première augmentation de la dureté jusqu'au plateau est désignée comme durcissement à froid, la seconde comme durcissement à chaud.

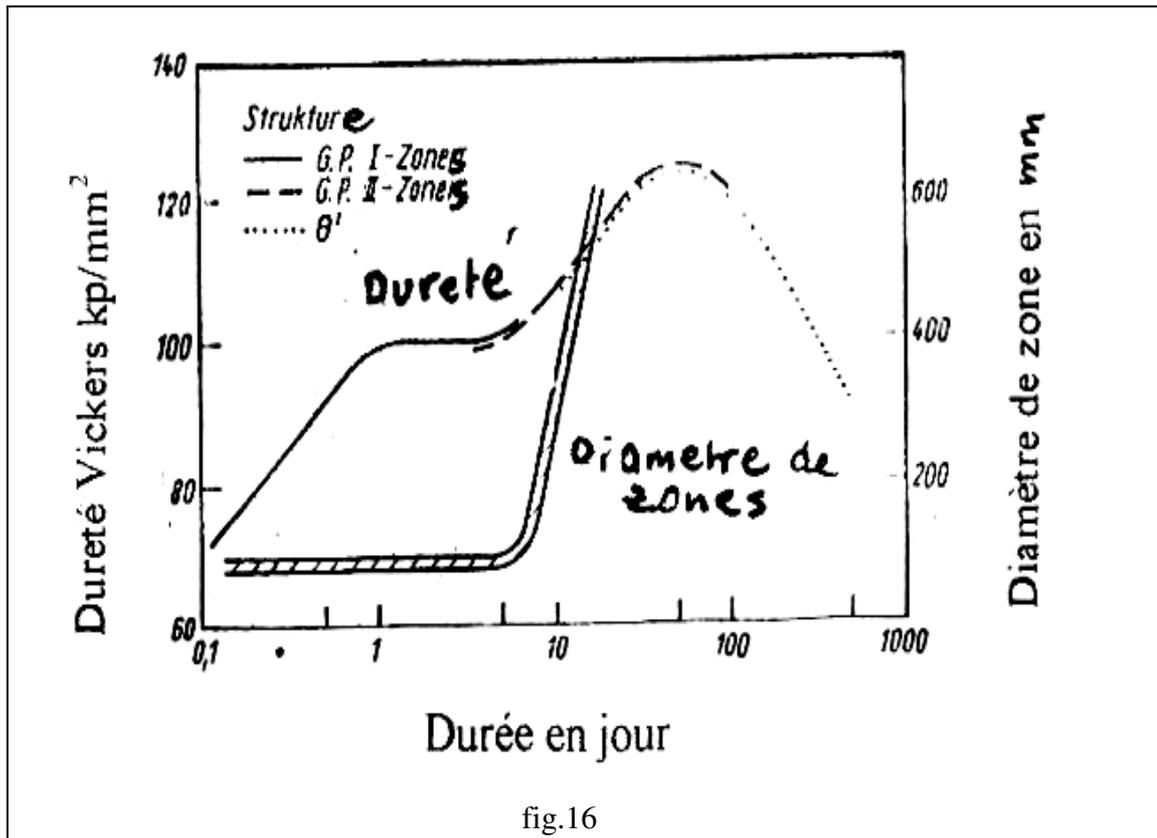


fig.16

A partir de ce processus, on peut expliquer un tel phénomène. Par le recuit à 500°C, les atomes de cuivre sont statiquement répartis dans le réseau cristallin de l'aluminium. Si on refroidit brusquement, à partir de cette température, les cristaux mixtes ne se décomposent pas et la répartition atomique reste conservée, mais avec le temps, les atomes de cuivre se rassemblent par le processus de diffusion dans le réseau d'aluminium.

Dans les zones de couches à atome unique, l'allongement de la surface provoque des tensions internes dans le réseau, ces dernières présentent à l'extérieur une augmentation de la résistance et de la dureté du matériau. Le processus de durcissement n'est pas très clair pour la majorité des alliages à part l'alliage Al-Cu-Mg. Donc on comprend par traitement de durcissement, un recuit d'homogénéisation suivi par un refroidissement brusque (à l'eau) aux températures ambiantes ou élevées. Techniquement on distingue le durcissement à froid ou à chaud :

- Le durcissement à froid est un traitement de durcissement avec vieillissement à température ambiante.
- Le durcissement à chaud s'effectue à température élevée

a. Alliage Al-Cu-Mg

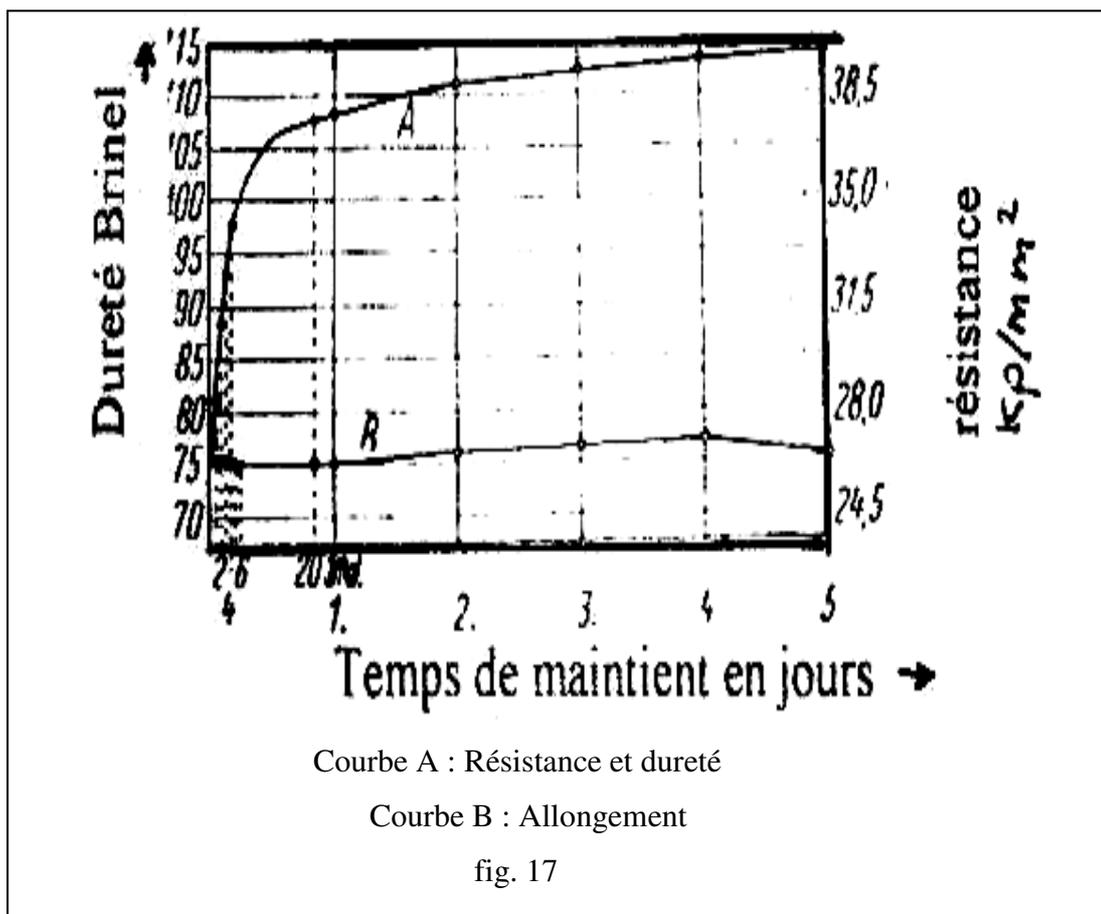
Les alliages Al-Cu-Mg sont des alliages à hautes résistance mécanique, ils contiennent environ 2 à 4,9 % Cu, 0,2 à 1,8 Mg, 0,2 à 1,1 Mn et dans certains cas, 0,2 à 0,6 % Si et sont caractérisés par une résistance élevée lorsqu'ils subissent la trempe et le revenu.

Ils présentent une bonne tenue à chaud, mais une soudabilité et une résistance à la corrosion

faibles à cause de la teneur élevée en Cu, à cet effet ces types d'alliages sont toujours plaqués avec de l'aluminium pur. Les propriétés mécaniques de l'aluminium et de ses alliages ne peuvent atteindre celles des aciers, mais on essaie toujours de trouver un traitement thermique convenable pour l'amélioration des propriétés mécaniques. En 1906, l'allemand Alfred Wilm a réussi après plusieurs années de recherches, d'améliorer la dureté et la résistance de l'alliage Al-Cu-Mg par durcissement structural et un brevet d'invention a été déposé sous le nom de "Duralumin". Donc on peut améliorer la dureté et les propriétés mécaniques (résistance à la rupture) d'un alliage d'Al-Cu-Mg. avec la composition chimique de 4,2 % Cu, 0,52 % Mg, 0,6 % Mn et le reste Al avec des inclusions (Fe, Si, etc.), bien que le manganèse ne fait pas partie des phases durcissantes, sa présence dans les alliages est utile. Il améliore la tenue du Duralumin à la corrosion et sa présence sous forme de particules dispersées de la phase T ($Al_{12}Mn_2Cu$), augmente la température de recristallisation et améliore les propriétés mécaniques. Le Duralumin contient aussi comme inclusions le fer et le silicium, le fer diminue la résistance et la plasticité du Duralumin. En se liant au cuivre, le fer affaiblit au vieillissement, l'effet durcissant, c'est pourquoi la teneur en fer ne doit pas dépasser 0,5 à 0,7 %. Le silicium contribue à la dégradation de la résistance, mais participe au durcissement avec une faible proportion. L'alliage possède, à l'état initial, une résistance de 16 à 22 kp/mm^2 , une dureté de 40 à 60 kp/mm^2 , un allongement de 15 à 25 %. Si on fait le recuit de cet alliage à $T = 500^\circ C$ pour une durée de maintien de 15 min, suivie d'un refroidissement brusque (à l'eau),

on obtient une amélioration des propriétés mécaniques tels que l'augmentation de la résistance à 32 kp/mm^2 , de la dureté à 78 kp/mm^2 et l'allongement reste près de 25 %.

Sur la figure 17, on peut constater l'élévation des propriétés mécaniques (résistance et dureté) en fonction du temps de maintien. On remarque que l'allongement reste presque invariable.



La résistance (ténacité) de cet alliage peut encore augmenter en faisant subir à l'alliage une déformation à froid, on obtient un alliage avec des propriétés équivalentes à celles d'un acier de construction à résistance moyenne, c'est à dire on atteint une résistance à la rupture équivalente à 55 kp/mm^2 , un allongement d'environ 10 % et un bon rapport de la limite élastique. Ce type de traitement thermique est utilisé pour certains alliages métalliques dans le système Al-Cu, (fig.18).

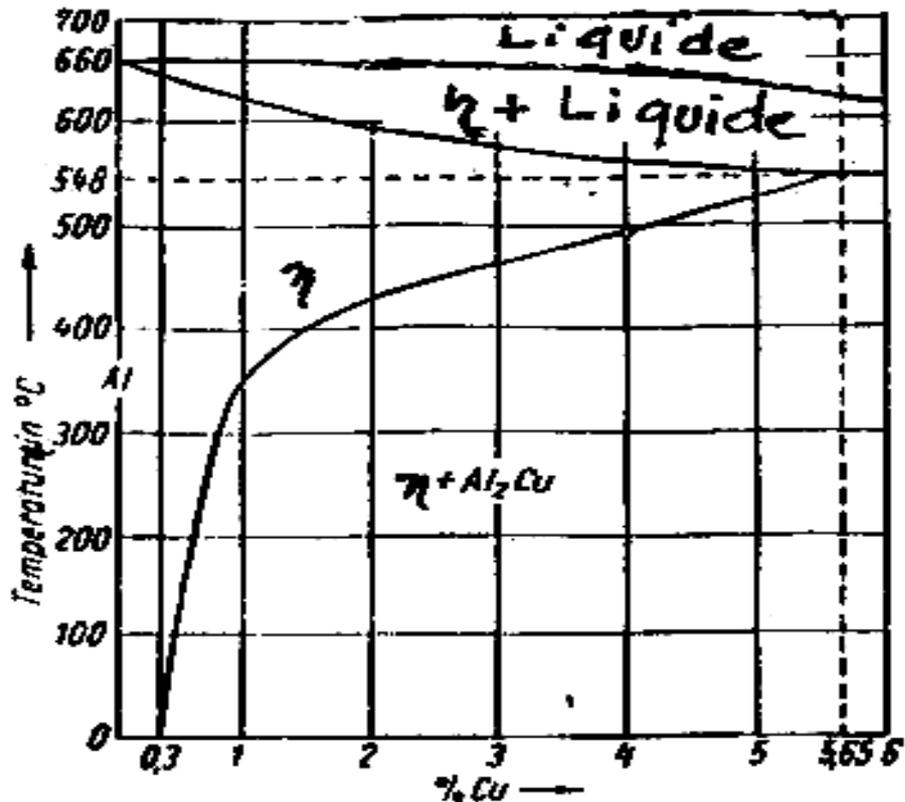


fig. 18

On reconnaît que l'aluminium possède une certaine solubilité pour le cuivre, c'est à dire dans le cristal d'aluminium, les atomes d'aluminium peuvent être remplacés par des atomes de cuivre. La solubilité est maximale à 5,65 % de Cu et à $T = 548^{\circ}\text{C}$.

A température ambiante, un alliage avec 4% de Cu se compose de cristaux mixtes Al-Cu avec une teneur inférieure à 0,5 % de Cu et d'une liaison intermétallique Al_2Cu . Un tel alliage, s'il est porté à la température de 550°C , les cristaux mixtes Al-Cu sont en situation d'absorber une grande partie du cuivre, ensuite la liaison Al_2Cu sera dissoute et on aura uniquement le présence de cristaux mixtes Al-Cu avec une teneur de 4 %.

Cette dépendance entre la température et la solubilité est une condition pur le vieillissement. Maintenant si on refroidit lentement l'alliage homogène à partir de $T = 550^{\circ}\text{C}$ on a une précipitation de nouveau Al_2Cu correspondant à une solubilité qui baisse, mais on refroidit brusquement à l'eau. L'alliage homogène, dans ce cas, le cuivre reste dans les cristaux: mixtes, c'est à dire on obtient une solution sursaturée. Cet état est instable et les atomes de cuivre cherchent à se diffuser des cristaux mixtes. L'augmentation de la dureté et de la résistance ont pour cause le phénomène de l'état instable. Donc on peut retenir que :

- Dans l'état stable on a la formation d'une phase de cristaux mixtes avec solubilité décroissante pour des températures décroissantes.

- Lors du chauffage dans le domaine de solubilité élevée avec ensuite le refroidissement induit la formation de cristaux mixtes sursaturés par surfusion.

Dans le tableau ci-dessous, on peut constater que les propriétés mécaniques de l'alliage diminuent avec l'augmentation de la section (S) des barres ou l'épaisseur (E) des tôles.

Alliage	Produit	$\sigma_{0,2}$ (kp/mm ²)	σ_{ZB} (kp/mm ²)	δ (%)	HB (kp/mm ²)
AlCuMg1	Barre				
	S ≤ 2000 mm ²	26	38	12	100
	S = 2000 à 8000 mm ²	27	40	10	100
	S ≥ 8000 mm ²	22	36	8	90
	Tôle				
	E = 1 à 10 mm	27	40	15	100
	E = 10 à 20 mm	24	38	14	90
AlCuMg2	Barre				
	S = 500 à 2000 mm ²	31	45	9	115
	S = 2000 à 8000 mm ²	34	48	8	125
	S ≥ 8000 mm ²	25	40	6	105
	Tôle				
	E = 1 à 6 mm	29	44	14	110
	E = 6 à 10 mm	28	43	12	110
E = 10 à 20 mm	26	41	10	110	

Cela est expliqué par l'influence de la vitesse de refroidissement exigée pour la surfusion des cristaux mixtes homogènes à haute température lors du refroidissement.

Avec l'augmentation de la section de la surface du matériau, la chaleur à évacuer est très importante et le refroidissement à l'intérieur du matériau (cœur) se ralentit, ce qui provoque lors du refroidissement une décomposition d'une partie des cristaux mixtes et lors du processus de durcissement, on n'a pas la présence de la totalité de la concentration de l'alliage et on ne peut pas atteindre une augmentation de la résistance, donc on a la présence d'un alliage avec une faible concentration en éléments durcissant.

Donc il est très important de surveiller (utiliser) un refroidissement brusque surtout pour les alliages Al-Cu-Mg.

Le Duralumin livré en tôles, est protégé contre la corrosion par plaquage, c'est à dire par l'apport d'une couche fine d'aluminium très pur. L'épaisseur d'une telle couche doit être au moins de 4 % de l'épaisseur de la tôle. Le plaquage diminue sensiblement la résistance et la charge de rupture des tôles.

b. Alliage Al-Si-Mg (alliage Avial)

Ces alliages ont une très bonne aptitude à la transformation à chaud, ils sont très résistants à la corrosion. Leur durcissement est du à la précipitation de la phase durcissante Mg_2Si . Ce groupe d'alliage comprend les alliages avec 0,4 à 1,4 % Mg, 0,3 à 1,6 % Si et de 0 à 1 % Mn.

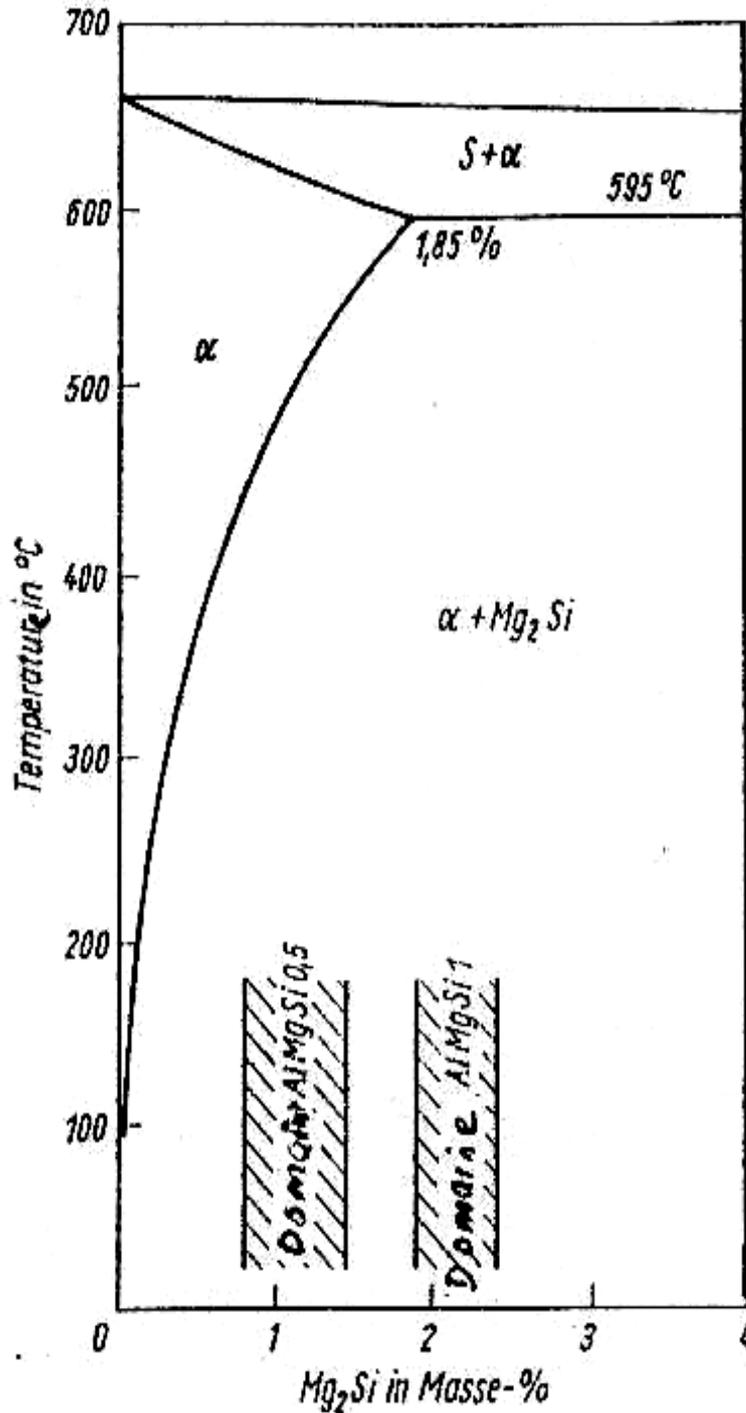


fig. 19

Les alliages avec des concentrations 0,5 % Si, 0,7 % Mg sont utilisés pour des buts décoratifs, fils et câbles électriques, tandis que les alliages avec 1,1 % Si et 1,0 % Mg sont utilisés en construction navale, aviation, mécanique de précision, électrotechnique et les pièces qui imposent une plasticité élevée à chaud et à froid.

De bonnes propriétés peuvent être atteintes lorsque la composition du Mg₂Si correspond au rapport de Mg/Si = 1,7. Un surplus de silicium peut améliorer la résistance mais diminuer la tenue à la corrosion et la ténacité. Leur diagramme d'équilibre est donné par la figure 19.

Les alliages Al-Si-Mg sont moins résistants que le Duralumin mais ils ont une meilleure plasticité à froid et à chaud, ils se soudent bien et leur limite de fatigue est élevée.

Le recuit de dissolution s'effectue à une température de 500 à 540°C suivi d'un refroidissement brusque. Le durcissement à chaud s'effectue à une température de 140 à 160°C.

c. Alliage Al-Zn-Mg

Les alliages appartenant à ce groupe ont la composition chimique suivante :

- Zn : 4 à 5 %
- Mg : 0,5 à 3,5 %
- Mn : 0 à 1 %
- Cr : 0 à 0,3 %

L'alliage avec 4 à 5 % Zn , 0,5 à 1,5 % Mg, 0 à 1 % Mn et 0 à 0,3% Cr se durcit automatiquement selon le recuit de dissolution à la température de 350 à 500°C, une trempe à l'eau n'est pas exigée.

La dureté maximale est atteinte après un séjour de 30 jours. Un durcissement à chaud à des températures de 120 à 140°C peut donner des valeurs de résistance élevées.

Après chauffage, par exemple lors du soudage, il y a renouvellement de l'effet de durcissement. L'alliage possède de bonnes propriétés de déformation et oxydable anodiquement à cause de sa structure homogène.

Une couche supplémentaire de protection contre les actions de corrosion est nécessaire.

Les phases durcissantes de cet alliage sont $MgZn_2$ et $Al_2Mg_3Zn_3$. Avec l'augmentation de la teneur en Zn et Mg, la résistance de l'alliage croît, alors que la plasticité et la tenue à la corrosion diminuent. La tenue à la corrosion et les propriétés mécaniques peuvent être améliorés par l'addition de faibles quantités de manganèse, de chrome et de vanadium ou par un refroidissement lent jusqu'à moyen.

d. Alliage Al-Zn-Mg-Cu

Ce type d'alliage représente une suite développée des alliages Al-Zn-Mg, c'est un alliage à haute résistance. L'addition du cuivre et du manganèse augment la résistance mécanique, suivant la composition, on atteint des valeurs de 46 à 54 kp/mm².

La bonne tenue à la corrosion est obtenue aussi par l'addition de Mn, Cr, Va ou par le plaquage. Comme matériaux de plaquage, on utilise un alliage d'aluminium contenant du zinc (1 à 3) %. Le recuit de dissolution s'effectue près de 450 à 470°C avec trempe à l'eau. La valeur de résistance maximale est atteinte par un durcissement à chaud de 120 à 140°C.

Les phases durcissantes de cet alliage sont : $MgZn_2$, la phase T ($Al_2Mg_3Zn_3$) et la phase S (Al_2CuMg). Avec l'augmentation de la teneur en Zn et Mg, la résistance de l'alliage croît, alors que leur plasticité et tenue à la corrosion diminuent. Ils ont une bonne plasticité à chaud et se prêtent relativement bien au corroyage à froid après recuit.

L'alliage avec 3,8 à 5,2 % Zn, 2,4 à 3,8 % Mg, 0,4 à 1,0 % Cu, 0,1 à 0,4 % Mn et 0,1 à 0,3 % Cr à une résistance à la traction de 46 à 50 kp/mm² et est utilisé dans le domaine de construction à sollicitation élevée, aviation, machines, exploitation minière.

Un alliage avec 5,1 à 6,1 % Zn, 2,1 à 2,9 % Mg, 1,2 à 2 % Cu, 0 à 0,3 % Mn, 0,18 à 0,4 % Cr à une résistance à la traction de 50 à 54 kp/mm² est utilisé dans le domaine de l'aviation, le matériel roulant et les machines complexes. La composition chimique et les caractéristiques mécaniques principales de l'alliage Al-Zn-Mg-Cu sont données dans le tableau ci-dessous.

Cu (%)	Mg (%)	Mn (%)	Si (%)	Zn (%)	Cr (%)	R _{0,002} (Kp/mm ²)	R (Kp/mm ²)	A (%)
1,4 à 2,8	0,4 à 1,0	0,4 à 1,0	0,7 à 1,2	5 à 8,6	0,1 à 0,25	53 à 63	56 à 57	7 à 8

1.5. Alliages d'aluminium de fonderie (moulage)

Une grande partie des besoins en aluminium est utilisée comme pièce de fonderie. La matière première utilisée pour l'obtention des alliages d'aluminium de fonderie est, le plus souvent, la matière secondaire tels que déchets, rebuts d'aluminium, etc. Dans certains pays, elle est basée sur 70 % de la production.

Avant, on utilisait comme alliages d'aluminium de fonderie, les alliages d'aluminium avec des teneurs élevées en Cu ou Zn, alors qu'aujourd'hui, l'alliage le plus utilisé, est l'alliage d'Al-Si avec des additions en magnésium et cuivre.

Les alliages prévus pour le moulage, doivent posséder une coulabilité élevée, un retrait relativement faible, une faible aptitude à la fissuration à chaud et à la porosité et de bonnes propriétés mécaniques avec une résistance élevée à la corrosion.

Les principaux alliages de fonderie avec leurs compositions chimiques sont indiqués sur le tableau ci-dessous selon TGL.

Types	% d'éléments d'alliages				% d'autres éléments					
	Mg	Si	Mn	Cu	Ti	Fe	Zn	Ni	Cu	Pb+Sn
G-Al Mg3	2,0 à 4,0	0,5 à 1,3	0,05 à 0,5			0,5	0,10		0,05	
G-Al Mg3dek	2,0 à 4,0	≤ 0,5	0,05 à 0,5			0,5	0,10		0,05	
G-Al Mg5	3,5 à 5,5	0,5 à 1,3	0,05 à 0,5			0,5	0,10		0,05	
G-Al Si 5 Mg	1,35 à 0,6	4,5 à 6,0	0,15 à 0,5		0,15	0,5	0,10		0,05	
G-Al Si 7 Mg	0,25 à 0,5	6,5 à 8,0	0,15 à 0,5		0,15	0,5	0,10		0,05	
G-Al Si 10 Mg	0,2 à 0,4	8,5 à 10,5	0,15 à 0,5		0,15	0,6	0,10		0,05	
G- AlSi10Mg(Cu)	0,2 à 0,4	8,5 à 11,5	0,2 à 0,5		0,15	0,6	0,5	0,3	0,5	0,2
G-Al Si 6 Cu	0,25 à 0,55	5,5 à 7,0	0,2 à 0,5	1,0 à 2,0	0,15	0,6	0,5	0,2		0,1
G-Al Si 7 Cu1	0,25 à 0,6	6,5 à 8,0	0,2 à 0,5	1,0 à 2,0	0,15	0,8	1,0	0,3		0,3
G-Al Si 7 Cu2	0,2 à 0,7	6,5 à 8,0	0,2 à 0,5	1,0 à 2,0	0,15	0,9	1,2	0,3		0,3

Les propriétés mécaniques, ainsi que le type de moulage pour lequel elles sont destinées, sont représentées dans le tableau suivant.

Désignation	Type de moulage	Etat	$\sigma_{0,2}$	σ_{ZB}	δ	HB	σ_{bW}	$\sigma_{0,2}$ 300 h 200°C
			(Kp/mm ²)		(%)	(Kp/mm ²)		
G-Al Mg3	Sable	S.T.	8 (7)	14 (13)	3 (3)	50 (50)	6	9
	Sable	T.C.	13 (12)	21 (16)	2 (2)	72 (65)	8	
	Coquille	S.T.	9 (7)	15 (14)	3 (3)	50 (50)	7	
	Coquille	T.C.	15 (12)	22 (18)	4 (2)	70 (65)	8,5	
G-Al Mg5	Sable	S.T.	8,5 (8)	15 (13)	2 (1)	55 (55)	6	8
	Coquille	S.T.	9 (8)	17 (14)	3 (1)	60 (55)	7,5	
G-AlSi5Mg	Sable	S.T.	10 (9)	14 (13)	1 (0,5)	55 (55)	6	
	Sable	T.A.	14 (12)	18 (14)	2 (1)	70 (70)	7,5	
	Sable	T.C.	20 (16)	22 (17)	1 (0,5)	80 à 110	7,5	
	Coquille	S.T.	12 (10)	16 (14)	1,5 (1)	60 (60)	7	
	Coquille	T.A.	16 (13)	20 (17)	2 (1)	70 (70)	8,5	
	Coquille	T.C.	22 (18)	24 (19)	1 (0,5)	90 à 115	8,5	
G-AlSi6Cu	Sable	S.T.	11 (9)	16 (15)	1 (1)	70 (65)	6,5	8,5
	Sable	T.A.	15 (15)	21 (18)	1,5 (1)	80 (75)	8	7
	Sable	T.C.	18 (16)	22 (19)	0,6 (,05)	90 à 115	8,5	6,5
	Coquille	S.T.	12 (11)	19 (17)	2 (1)	75(70)	8,5	5,5
	Coquille	T.A.	16 (16)	23 (20)	2 (1)	90 (80)	9,5	
	Coquille	T.C.	20 (18)	24 (22)	0,8 (0,6)	95 à 120	9,5	
G-AlSi7Cu2	Sable	S.T.	12 (11)	17 (14)	0,6 (0,4)	75 (70)		
	Sable	T.A.	17 (13)	19 (15)	0,3	85 (80)		
	Coquille	S.T.	14 (12)	19 (15)	0,8 (0,4)	80 (75)		
	Coquille	T.A.	18 (14)	20 (15)	0,4	85 (80)		
	Pression	S.T.	14	20	1	80		

G-<chem>AlSi10Mg</chem>	Sable	T.A.	18 (17)	20 (20)	1,2 (1)	80 :110	10	
	Coquille	S.T.	11 (10)	20 (18)	2 (1)	65 (60)	9	
	Coquille	T.A.	20 (18)	24 (22)	1,2 (1)	85 à 115	11	5,5
	Pression	S.T.	12	21	1,5	70	7,5	
S.T. : Sans Traitement								
T.C. : Traitement à Chaud								
T.A. : Traitement A Froid								

Les propriétés de fonderie d'un alliage sont élevés lorsque sa structure comporte un eutectique. Un eutectique se forme dans de nombreux alliages dont la teneur en éléments additionnés est supérieure à la solubilité limite dans l'aluminium. C'est ce qui détermine la teneur en éléments plus élevés dans les alliages de fonderie que dans les alliages corroyables.

Le plus souvent, on emploie les alliages AlSi, AlCu, AlMg additionnés d'une faible quantité de cuivre et de magnésium (AlSi), de silicium (AlMg), de manganèse, nickel et chrome (AlCu).

Pour affiner les grains, et par suite, améliorer les propriétés mécaniques, on introduit les inoculants (Ti, Zr, B, Cl, V, etc.).

De nombreuses pièces coulées soumises au traitement thermique. suivant le caractère de la pièce et les conditions de son service, on a recourt à l'une des modalités de traitements thermiques suivantes :

a. Vieillessement par revenu (T1) : (notation conventionnelle T1) T = 170 à 180°C pendant un séjour de 5 à 20 h et sans trempe préalable, destiné au renforcement de la résistance et amélioration de l'usinage.

b. Recuit (T2) : T ≈ 300°C, séjour de 5 à 10 h, refroidissement à l'air, destiné à supprimer les contraintes produites par la coulée. ainsi que les contraintes résiduelles dues à l'usinage, il augmente légèrement la plasticité.

c. Trempe et maturation (T3, T4) : T = 510 à 545°C, trempe à l'eau chaude (40 à 100°C). Après la trempe, les pièces coulées sont maintenues un temps assez long à l'ambiante. Le régime T₁ correspond à la trempe et maturation.

d. Trempe et vieillissement par revenu de courte durée (T5) : (2 à 3) h, à 175°C. Ces températures et durées font que le vieillissement n'est pas complet. Destinés à l'augmentation de la résistance tout en gardant la plasticité élevée.

e. Trempe et vieillissement par revenu complet (T6) : $T = 200^{\circ}\text{C}$, séjour de 3 à 5h, assurent une résistance maximale mais diminuent la plasticité.

f. Trempe et revenu de stabilisation (T7) : $T = 230$ à 250°C pendant 3 à 10 h, appliqués pour stabiliser la structure et les changements volumiques de la pièce coulée tout en conservant une résistance suffisante.

g. Trempe et revenu d'adoucissement (T8) : $T = 240$ à 260°C durant 3 à 5h, la température élevée du revenu diminue sensiblement la résistance mais augmente la plasticité et la stabilité des dimensions.

1.5.1. Alliages Al-Si

Ces alliages portent le nom de "silumines", lesquels s'apparentent quand à leur composition à un alliage eutectique, leur coulabilité est très élevée et les moulages obtenus sont plus denses. Ils sont destinés à la coulée sous pression.

Sur le diagramme d'équilibre Al-Si (fig.20), on peut constater que la solidification commence par une cristallisation des cristaux mixtes riches en aluminium α et se termine par la cristallisation de l'eutectique $\alpha + \beta$ (Si) et éventuellement, avec d'autres phases formées par d'autres éléments.

La phase (Si) est présente en se déposant d'abord sous forme de gros cristaux aciculaires (en forme d'aiguilles), qui jouent le rôle d'entailles internes dans la solution solide α plastique, les propriétés mécaniques de cette structure sont faibles.

Plus près de l'alliage eutectique, se trouvent le plus souvent les cristaux primaires de silicium, c'est à dire, il y a accumulation (excès) de cristaux de silicium, qui ne sont pas fondus et lors de la recristallisation, ils agissent comme germes cristallins pour la cristallisation du silicium.

Donc avec l'augmentation du chauffage du bain métallique ainsi que l'augmentation de la vitesse de refroidissement, on obtient une solidification normale de l'eutectique, c'est à dire une cristallisation couplée $\alpha +$ (Si) est atteinte. Une telle cristallisation est obtenue aussi par le traitement du bain métallique en ajoutant des inoculants tels que le sodium.

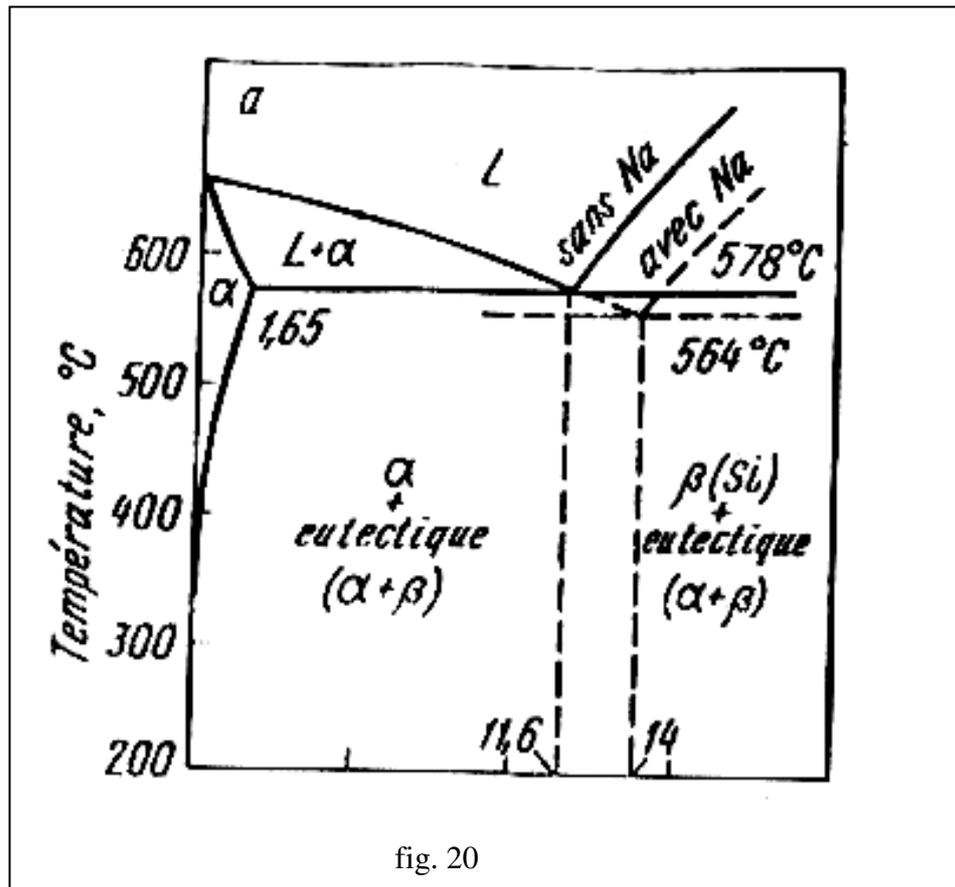


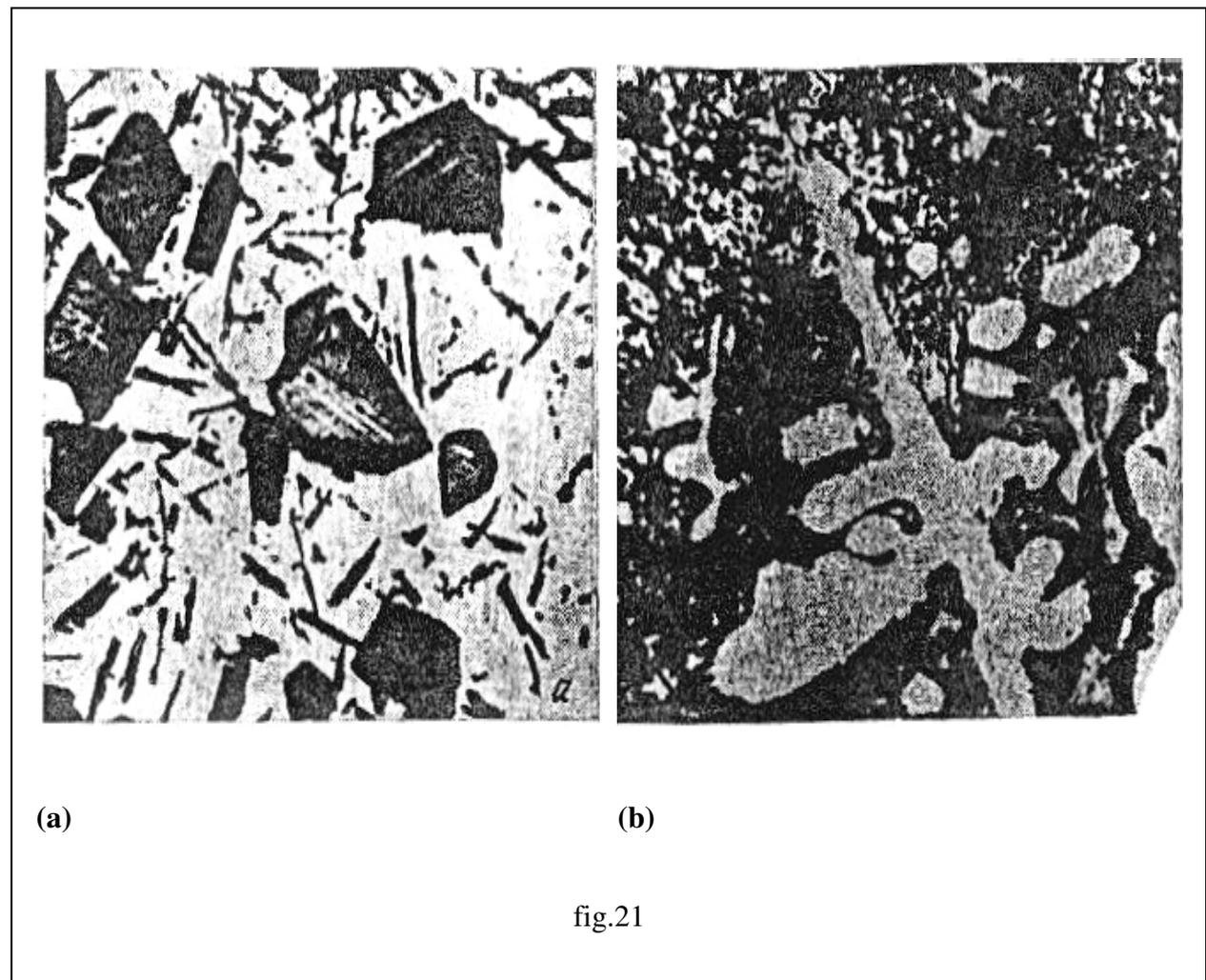
fig. 20

Cette observation est faite en premier par A. Pacz en 1921 sur un alliage eutectique Al-Si (silumin) et elle est connue sous le nom de «effet silumin». Il s'agit de l'affinage de la structure et l'élimination des cristaux de silicium en excès. Les silumines sont inoculés au sodium (0,05 à 0,08) %, par addition au bain de sels de 67 % NaF et 33 % NaCl. Le traitement d'affinage du bain métallique, proprement, dit s'effectue de la manière suivante.

De 730 à 750°C, on plonge une quantité (0,25 % du bain métallique) et le sel d'affinage dans le bain métallique, après sa fusion, on mélange et après dépôt du sel, on l'extrait du bain, ensuite à l'aide d'une cloche de plongée, on ajoute du sodium propre (0,03 à 0,06) %. Ce dernier s'évapore en agissant sur le bain métallique et à la fin, on refait le traitement du bain une dernière fois avec une quantité (0,75%) et après un temps très court, c'est à dire juste après son introduction, on procède à la coulée du métal. Ce traitement doit être effectué directement avant la coulée du métal car le sodium, peut brûler en quittant le bain et son effet sera diminué.

La quantité de sodium exigée pour la coulée en sable est importante par rapport celle exigée dans la coulée en coquille, car la solidification rapide dans la coquille donne une cristallisation eutectique. En présence du sodium, les lignes du diagramme d'équilibre se déplacent et l'alliage hypereutectique devient hypoeutectique.

Dans ce cas au lieu du silicium excédentaire, on observe dans la structure de l'alliage, l'apparition de cristaux de la solution α comme le montre les figures 21 a (avant modification) et 21 b (après modification).



Dans ces conditions l'eutectique acquiert une structure plus fine et se compose de petits cristaux des solutions β (Si) et α .

Pendant la solidification, les cristaux de silicium se couvrent d'une pellicule de siliciure de sodium (Na_2Si) qui rend difficile leur croissance. Cette structure inoculée améliore les propriétés mécaniques de l'alliage (fig. 22) dont la courbe 1 est modifiée et la courbe 2 non modifiée.

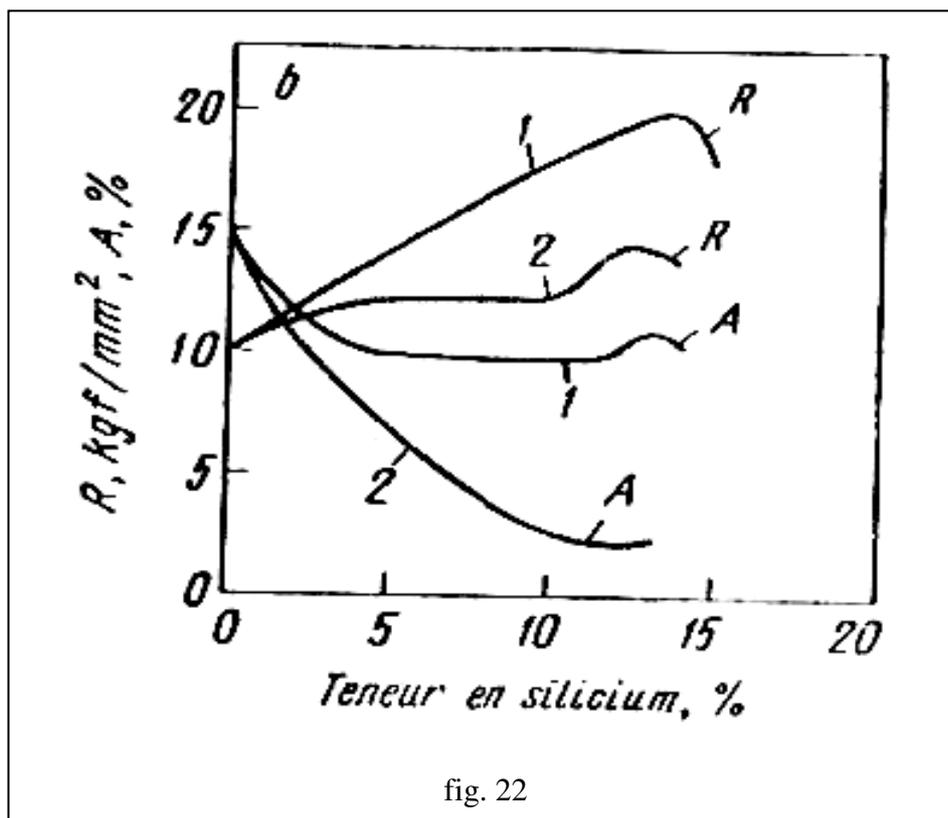


fig. 22

L'alliage Al-Si ne contenant pas de Mg, Mn, ne subit pas le traitement thermique de durcissement. Les alliages hypoeutectiques additionnés de manganèse en plus de l'inoculation, peuvent être durcis par un traitement thermique. La phase durcissante est Mg_2Si . L'introduction simultanée de magnésium et de cuivre peut donner lieu à la formation des phases $CuAl_2$ et $W(Al_xMg_5Cu_4Si_4)$.

Les pièces en alliage contenant du Mg et Mn, sollicitées par des charges moyennes, subissent seulement le vieillissement par revenu (T1), alors que les grosses pièces très changées, (carters des compresseurs, carters et bloc cylindres des moteurs), la trempe et le vieillissement par revenu (T6). Les pièces coulées en alliages contenant du Mg, imposant une plasticité accrue, sont soumises à la trempe (T4) et pour augmenter leur résistance, à la trempe et au vieillissement (T6). Lorsqu'il importe d'obtenir une plasticité élevée et une stabilité des dimensions, la trempe est suivie de revenu à 250°C pendant 3 à 5 h.

Les principaux types d'alliages Al-Si figurent sur le tableau ci-dessous, selon TGL.

Désignation	Composition (%)	Addition (%)	Limite 0,2 (Kp/mm ²)	Résistance Traction R (Kp/mm ²)	Allongement rupture (%)	HB (Kp/mm ²)	Résistance flexion alternée (Kp/mm ²)
Poids spécifique : 2,65 Kg/dm³							
G-ALSi12	Si:11,0 à 13,5	Fe : 0,6 Ti :	8 à 9 (7)	17 à 22 (16)	8 à 4 (2)	50 à 60 (45)	5,5 à 6,5
G-ALSi12g	Mn : 0 à 0,5	0,15 Zn :	9 à 10 (8)	18 à 22 (16)	10 à 6 (5)	50 à 60 (50)	8,5 à 10
GK-ALSi12	Al : reste SiFe > 0,4	0,10 Cu :	9 à 11 (9)	20 à 26 (16)	7 à 3 (2)	55 à 70 (50)	7 à 8
GK-ALSi12g	→ Mn > 0,25	0,05 Mg :0,05	9 à 11 (9)	20 à 26 (16)	10 à 6 (4)	50 à 60 (50)	9 à 10
Poids spécifique : 2,65 Kg/dm³							
G-ALSi10Mg	Si: 9,0 à 11,0	Fe : 0,6	9 à 11 (8)	18 à 24 (17)	5 à 2 (2)	55 à 65 (55)	6,5 à 7,5
G-ALSi10Mga	Mg : 0,2 à 0,4	Ti : 0,15	17 à 26 (17)	22 à 20 (20)	4 à 1 (1)	80 à 110 (75)	9 à 11
GK-ALSi10Mg	Mn : 0 à 0,5	Zn : 0,10	11 à 15 (10)	20 à 26 (18)	4 à 1 (1)	65 à 85 (60)	8 à 10
GK-ALSi10Mga	Al : reste SiFe > 0,4	Cu : 0,05	20 à 28 (18)	24 à 32 (22)	4 à 1 (1)	85 à 110 (80)	10 à 11
Poids spécifique : 2,70 Kg/dm³							
G-ALSi15Mg	Si: 4,5 à 6,0	Fe : 0,5	10 à 13 (9)	14 à 18 (13)	3 à 1 (0,5)	55 à 70 (55)	6 à 6,5
G-ALSi15Mgka	Mg : 0,5 à 0,8	Zn : 0,10	15 à 18 (12)	18 à 25 (14)	5 à 2 (1)	70 à 85 (70)	7 à 7,5

G- AlSi15Mga	Mn : 0 à 0,5	Cu : 0,05	22 à 29 (16)	24 à 30 (17)	2 à 0,5(0,5)	80 à 110 (80)	7 à 7,5
GK- AlSi15Mg	Ti : 0 à 0,20		12 à 16 (10)	16 à 20 (14)	4 à 1,5 (1)	90 à 75 (60)	7 à 7,5
GK.AiSi15M gka	Al : reste SiFe > 0,4		16 à 19 (13)	21 à 27 (17)	6 à 2 (1)	70 à 90 (70)	8 à 8,5
GK- AlSi15Mga	→ Mn > 0,25		24 à 29 (18)	26 à 30 (19)	3 à 1 (0,5)	90 à 110 (90)	8 à 8,5

1.5.2. Alliages Al-Mg

Les alliages Al-Mg possèdent de faibles propriétés de fonderie du fait qu'ils ne contiennent pas d'eutectique. Leur propriété caractéristique est la bonne tenue à la corrosion et leurs propriétés mécaniques sont accrues avec une usinabilité élevée. L'addition à l'alliage Al-Mg (9,5 à 11,5) % Mg et d'inoculants (Ti, Zr), améliorent les propriétés mécaniques, alors que le béryllium diminue l'oxydabilité de la fusion, ce qui permet de la conduire sans flux de protection. Le magnésium accroît fortement la résistance des alliages (fig.23) jusqu'à 12 ou 14 %, avec le Mg, la plasticité change peu mais ensuite elle se dégrade brusquement.

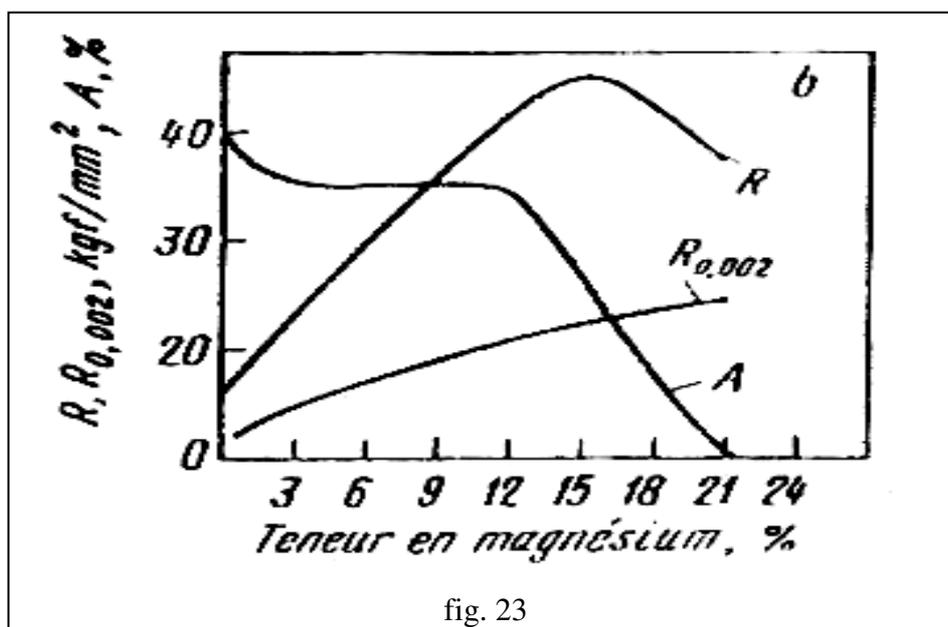
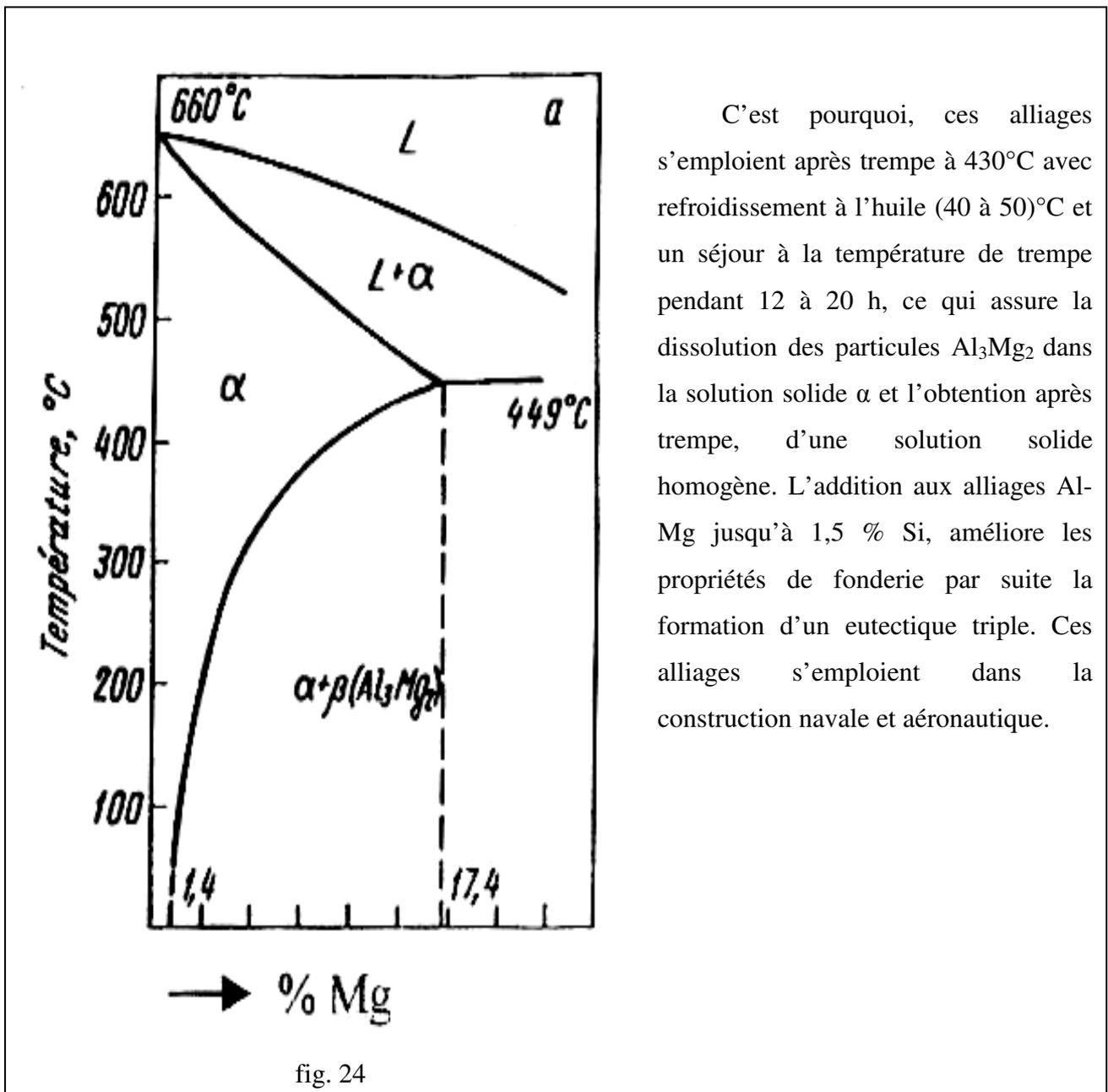


fig. 23

Les alliages Al-Mg sont en plus additionnés de manganèse qui forme des particules dispersées Al₆Mn, durcit l'alliage et affine le grain. Ces types d'alliages sont prévus pour les pièces travaillant dans une atmosphère humide, par exemple dans la construction navale et aéronautique. La structure de ces alliages, se compose de solution solide α et d'inclusions

grossières de particules Al_3Mg_2 qui se déposent aux joints de grains en fragilisant l'alliage, (fig. 24).



C'est pourquoi, ces alliages s'emploient après trempe à 430°C avec refroidissement à l'huile (40 à 50)°C et un séjour à la température de trempe pendant 12 à 20 h, ce qui assure la dissolution des particules Al_3Mg_2 dans la solution solide α et l'obtention après trempe, d'une solution solide homogène. L'addition aux alliages Al-Mg jusqu'à 1,5 % Si, améliore les propriétés de fonderie par suite la formation d'un eutectique triple. Ces alliages s'emploient dans la construction navale et aéronautique.

fig. 24

Les principaux types d'alliages Al-Mg sont donnés sur le tableau ci-dessous selon TGL.

Désignation	Composition (%)	Addition (%)	Limite 0,2 (Kp/mm ²)	Résistance Traction R (Kp/mm ²)	Allongement rupture (%)	HB (Kp/mm ²)	Résistance flexion alternée Kp/mm ²
Poids spécifique : 2,7 Kg/dm ³							
G-Al Mg3	Mg : 2,0 à 4,0	Fe : 0,5 Zn :	8 à 10 (7)	14 à 19 (13)	8 à 3 (3)	50 à 60 (50)	6 à 6,5
G-Al Mg3a	Si : 0 à 1,3 Mn : 0 à	0,10 Cu :	13 à 16 (12)	21 à 28 (16)	8 à 2 (2)	70 à 90 (65)	7,5 à 8
GK-Al Mg	0,5 Ti : 0 à	0,05	9 à 12 (7)	15 à 20 (14)	8 à 3 (3)	50 à 60 (50)	7 à 7,5
GK-Al Mg3a	0,20 Al : reste		15 à 18 (12)	22 à 33 (18)	15 à 4 (2)	65 à 90 (65)	8 à 9
Poids spécifique : 2,6 Kg/dm ³							
G-Al Mg5	Mg : 4,0 à 5,5	Fe : 0,5 Zn :	9 à 10 (9)	16 à 19 (13)	5 à 2 (1)	55 à 70 (55)	6 à 6,5
GK-Al Mg5	Si : 0,5 à 1,5 Mn : 0 à	0,10 Cu : 0,05	9 à 10 (9)	17 à 25 (14)	8 à 3 (1)	60 à 80 (55)	7 à 7,5
	0,5 Ti : 0 à						
	0,20 Al : reste						
Poids spécifique : 2,65 Kg/dm ³							

G-Al Mg5 Cu	Mg : 4,0 à 5,5	Fe : 0,5 Zn :	9 à 10	16 à 19 (9)	5 à 3 (1)	55 à 70 (55)	
	Si : 0,5 à 1,5	0,10	9 à 10 (9)	17 à 25 (14)	8 à 2 (2)	60 à 80 (55)	
	Cu : 0,4 à 0,6						
	Mn : 0 à 0,5						
	Ti : 0 à 0,20						
	Al : reste						

1.5.3. Alliages Al-Cu

Leur composition chimique et les caractéristiques mécaniques principales sont données dans le tableau suivant.

Mn (%)	Cu (%)	Autres et Ti (%)	R (Kp/mm ²)	R _{0,002} (Kp/mm ²)	A (%)
0,6 à 1	4,5 à 5,3	0,25 à 0,45	24	16	7

Ces alliages possèdent, après traitement thermique, de hautes propriétés mécaniques à l'ambiante et aux températures élevées et se prêtent bien à l'usinage. Leurs propriétés de fonderie sont basses (grand retrait, aptitude à la fissuration à chaud). L'alliage s'emploie pour la fabrication des moulages de petites pièces de formes simples (armatures, supports).

Pour obtenir une résistance accrue après la trempe, les moulages sont soumis au revenu à 150°C pendant 2 à 4 heures. La présence dans la solution solide du manganèse et la formation dans le volume du grain des phases intermétalliques, augmentent la résistance à chaud. L'addition du titane affine le grain.

Le durcissement de l'alliage s'obtient par trempe et vieillissement à 175°C pendant 3 à 5 h. Les alliages Al-Cu sont peu stables à la corrosion et pour parer à cet inconvénient, les pièces coulées subissent ordinairement l'anodisation.

1.5.4. Alliages Al-Si-Cu

Ce groupe d'alliages comprend les alliages avec une bonne coulabilité et de bonnes propriétés de

résistance. La tenue à la corrosion est faible, cela est dû à la présence du cuivre. Les alliages avec 6 % Si, \approx 3 % Cu, sont utilisés dans tous les domaines de construction des machines et des moteurs où ils existent uniquement des sollicitations moyennes. Les alliages avec une teneur de 12 % Si ne durcissent pas eux mêmes et ils sont utilisés pour les pièces compliquées.

1.6. Le cuivre et ses alliages

Le mot cuivre est dérivé du mot « cuprum » qui signifie métal de l'île de Chypre, où il fut découvert à l'état natif pendant l'antiquité. Son numéro atomique dans la classification de Mandéléév est 29, sa masse atomique 63.54. Le cuivre est un métal rouge à cassure rose.

La teneur totale de l'écorce terrestre en cuivre, est relativement faible (0,01 % en masse). Dans la nature on le trouve à l'état natif plus souvent que les autres métaux. Les blocs de métal natif atteignent parfois des dimensions importantes. A cause de son existence à l'état natif et de la facilité de son usinage, il fut utilisé par l'homme avant tout autre métal.

1.6.1. Procédés d'élaboration et d'affinage du cuivre

La plus grande partie du cuivre est obtenue à partir des minerais de cuivre qui sont formés de sulfures et d'oxydes. Mais généralement 80 % du cuivre est obtenu à partir des sulfures tels que :

- Chalcopyrite : $\text{Cu}_2\text{S}, \text{FeS}_3$, qui est le répandu, il est d'une couleur jaune d'or.
- Chalcosine Cu_2S de couleur noire.
- Les oxydes :
 - Cuprite : Cu_2O .
 - Malchite : $\text{CuCO}_3, \text{Cu}(\text{OH})_2$.
 - Azurite : $\text{CuCO}_3, \text{Cu}(\text{OH})_2$.

Les minerais de cuivre contiennent toujours du fer en grande quantité sous forme de FeS_2 , et contiennent d'autres éléments tels que Sb, As, Pb, Bi, Au, Ag, Ni. Ce qui rend la teneur du cuivre très faible dans les minerais.

Les procédés métallurgiques d'élaboration du cuivre se différencient selon la composition chimique du minerai de cuivre. Il existe deux types de procédés :

- Procédé par voie sèche.
- Procédé par voie humide.

Dans cette partie on abordera que le premier procédé.

Procédé par voie sèche :

Ce procédé est le plus important et opère sur des minerais dont la teneur minimale en métal après concentration avoisine 15 %. Plusieurs phases peuvent être distinguées dans ce procédé.

a. Concentration du minerai :

Les minerais de cuivre sont très pauvres en cuivre (1 à 4) % et il est nécessaire de leur faire subir un traitement d'enrichissement. Le minerai est concentré ou enrichi par flottation afin d'éliminer une partie de la frange et d'amener la teneur en cuivre jusqu'à 25 %.

b. Elimination partielle du fer :

Le concentré du minerai, les additions et le coke sont enfoncées dans un four à cuve où ils sont fondus dans sa partie inférieure où une partie du fer est éliminée et passe dans la scorie et le soufre subit un grillage partiel. Après cette fusion, on obtient la charge fusionnée appelée matte, laquelle est rassemblée dans un avant-creuset ou elle est encore séparée de la scorie.

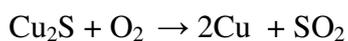
La matte contient entre 20 à 50 % de cuivre, 20 à 30 % de soufre et de 30 % de fer. Dans la scorie se trouvent de 0,2 à 0,4 % de cuivre. La grande quantité de fer et de soufre se trouvant dans la matte est éliminée par oxydation lors de son enfournement dans le convertisseur à tambour.

c. Oxydation de la matte :

L'oxydation de la matte appelée aussi convertissage, du nom de l'appareil utilisé, se fait en deux phases dans le même appareil. Durant la première phase s'effectue l'oxydation du sulfure de fer (élimination du fer) par soufflage d'air avec addition de SiO₂. L'oxyde de fer forme s'unit à la silice et est ainsi éliminée à l'état de scorie qui est par la suite évacuée.



Durant la deuxième phase, il reste uniquement Cu₂S (matte blanche) et l'oxydation continue par soufflage d'air afin de transformer le Cu₂S en cuivre brut.



Dans le convertisseur, on a besoin d'ajouter du combustible car la combustion du soufre fournit la chaleur nécessaire pour la fusion de la charge. Le cuivre brut obtenu contient 97 à 99 % de cuivre et une série d'éléments secondaires tels que : Fe, As, Pb, Ni, Ag, Au. Le cuivre brut est ensuite affiné dans un four.

d. Affinage du cuivre brut :

L'affinage du cuivre comporte généralement deux phases successives : l'affinage par voie sèche au celui électrolytique.

- Affinage par voie sèche au four :

Le cuivre brut est affiné dans un four à flamme après fusion, on a de l'air pour abaisser la teneur en Pb, Fe et le reste du soufre. L'antimoine et l'arsenic sont aussi partiellement oxydés. Durant cette opération, une grande quantité du cuivre est oxydée, ce qui donne du Cu₂O, lequel est

réduit à la fin de l'opération d'oxydation par addition du bois humide, ce qui provoque une formation de la vapeur d'eau et d'hydrogène carburé. Ce processus est appelé brossage.

Le cuivre obtenu après cette opération contient de 99 à 99,6 % de cuivre, une partie est coulée en blocs et en brames et porte le nom de cuivre affiné. L'autre partie est destinée à subir l'électrolyse et porte le nom de cuivre anodique.

- Affinage électrolytique :

L'affinage électrolytique du cuivre a deux buts essentiels :

- Obtenir du cuivre pur, ce qui conduit à l'augmentation de la conductibilité électrique et la capacité de déformation.

- **L'extraction des métaux purs (Au, Ag).**

L'électrolyse du cuivre s'effectue dans une solution d'acide sulfurique de 40 à 60°C avec une densité de 200A/m² (0,2 à 0,3) V. Le cuivre destiné à l'électrolyse est préparé sous forme de panneaux plats qui jouent le rôle d'anodes.

Le cuivre et les éléments qui l'accompagnent tels que Ni, Ph, Zn etc. sont dissous de l'anode dans l'électrolyte mais ne l'accompagnent pas dans la cathode à cause de leur potentiel de séparation (précipitation). Les autres éléments tels que Au, Ag, As et antimoine coulent lentement à partir de l'anode en formant une boue anodique, cette dernière est traitée pour en extraire l'argent et l'or. Un bon cuivre électrolytique, renferme jusqu'à 99,98 % Cu.

1.6.2. Cuivre pur (non allié)

C'est un métal rouge, plus ou moins foncé, présentant une cassure rose. L'application technique du cuivre, dans les différents domaines, est liée aux propriétés technologiques que présente ce métal tels que :

- Conductibilité thermique et électrique élevée.
- Bonnes propriétés de résistance.
- Bonne capacité de déformation.
- Bonne tenue à la corrosion.
- Bonne soudabilité.

Une amélioration des propriétés technologiques, mécaniques et de la tenue à la corrosion est obtenue par l'addition des éléments d'alliages tels que l'étain, le zinc, l'aluminium, le nickel, et d'autres éléments importants.

Une grande partie de la production de ce métal est utilisée à l'état pur et une faible partie comme alliage de cuivre. Grâce à son excellente conductibilité électrique et thermique, il est très utilisé

surtout dans le domaine de l'électrotechnique. Le cuivre ne pourra jamais être remplacé par l'aluminium à cause de ses bonnes propriétés de soudage et sa bonne flexibilité et sa grande conductibilité.

Le tableau, ci-dessous, montre les différents types de cuivre pur avec les pourcentages d'inclusions (éléments secondaires).

Désignation	Inclusions en %											
	O2	Bi	Sb	As	Sn	Ni	Fe	Pb	Zn	S	Ag	P
Cuivre électrique libre d'oxygène												
Se-Cu 99,97	0,000 3	0,00 1	0,00 2	0,00 2	0,00 2	0,00 2	0,00 5	0,00 3	0,00 2	0,00 5		0,00 2
Se-Cu 99,95	0,000 8	0,00 1	0,00 2	0,00 2	0,00 2	0,00 2	0,00 5	0,00 5	0,00 3		0,00 5	
Cuivre raffiné et désoxydé												
Dr-Cu 99,99	0,001	0,00 2	0,00 2	0,00 2	0,00 2	0,00 5	0,00 5	0,00 5	0,00 5	0,00 5	0,04	
Dr-Cu 99,97	0,002	0,00 5	0,01		0,2		0,01	-		-	0,04	
Dr-Cu 99,95	0,003	0,05	0,05	0,00 5	0,4	0,05	0,03	-	0,01	-	-	
Cuivre avec oxygène												
E-Cu 99,9	0,04	0,00 1	0,00 2	0,00 2	0,00 2	0,00 2	0,00 5	0,00 5	0,00 5	0,00 5	0,00 3	-
R-Cu 99,7	0,08	0,00 2	0,00 5	0,01	0,05	0,2	0,05	0,01	-	0,01	-	-
R-Cu 99,5	0,10	0,00 3	0,05	0,05	0,05	0,4	0,05	0,05	-	0,01	-	-
R-Cu 99,25	0,06	0,02	0,05		-		-	0,1	-	0,02	-	-

Les éléments secondaires dissous dans le cuivre, augmentent principalement la résistance spécifique électrique $R = 1/\rho$.

La figure 25 représente l'influence de certains éléments, comme impuretés ou éléments d'alliage, sur la conductibilité spécifique électrique.

La conductibilité électrique la plus élevée du cuivre, mesurée à la température de 20°C, est de 60,1 m/Ωmm².

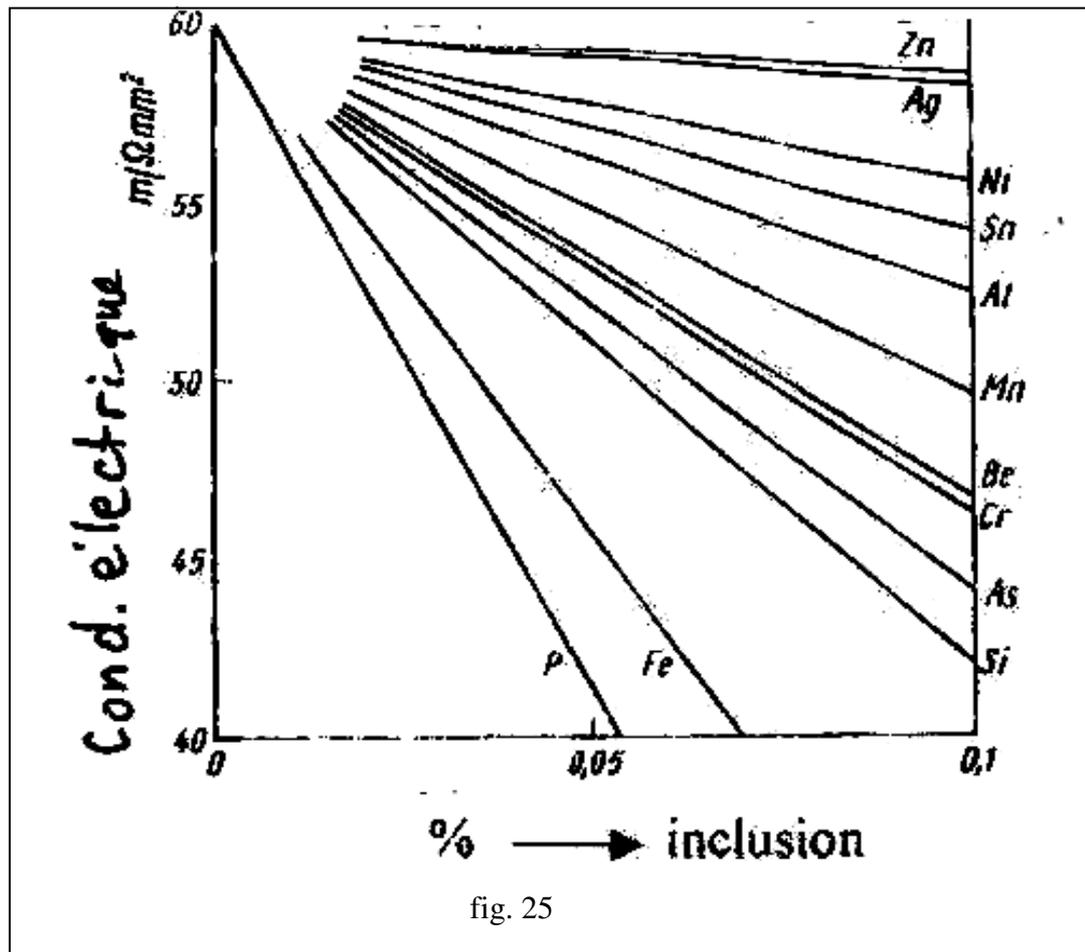


fig. 25

Les inclusions présentes dans le cuivre exercent une forte influence sur ses propriétés, selon leur action, elles peuvent être rangées dans l'ordre suivant :

a. Celles qui forment des solutions solides, Ni, Zn, Sb, Sn, Al, As, Fe, P, etc. :

Ces inclusions améliorent la résistance mais altèrent brusquement les conductibilités électriques et thermiques (surtout Sb et AS). C'est pourquoi, les conducteurs de courant se font en cuivre contenant $\leq 0,002$ % Sb et $\leq 0,002$ % As. De plus l'antimoine rend difficile la déformation à chaud.

b. Les inclusions de plomb, bismuth, etc. :

Elles sont pratiquement insolubles dans le cuivre et forment avec lui des eutectiques, facilement fusibles, qui, précipités aux joints de grains, rendent plus difficile le corroyage. La

figure 26 représente la microstructure du cuivre (a : avec addition de 0,2 % Bi et b : avec addition de 0,3 % Pb).

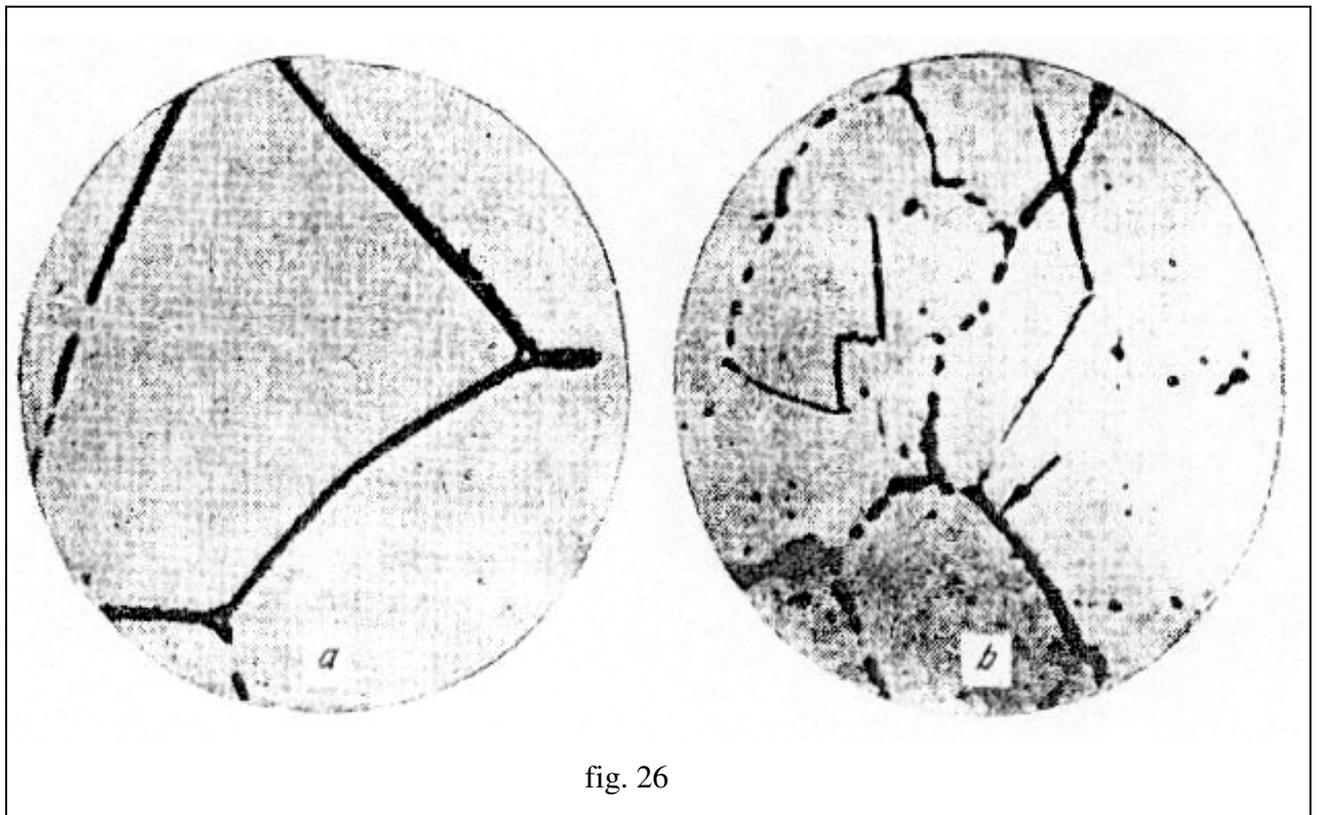


fig. 26

Lorsque la teneur en bismuth atteint 0,005 %, le corroyage à chaud désagrège le cuivre. Avec une teneur en bismuth encore plus élevée, le cuivre devient fragile à froid. Ces inclusions influent peu sur la coulabilité électrique.

c. Les inclusions d'oxygène et de soufre :

Elles forment avec le cuivre des combinaisons fragiles Cu_2O , Cu_2S , qui entrent dans la composition de l'eutectique, (fig.27).

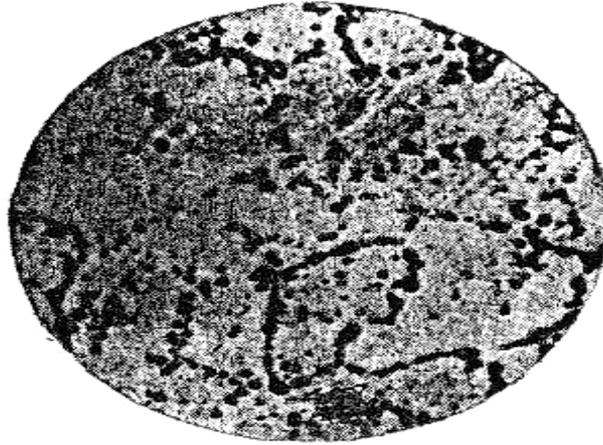
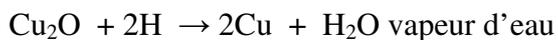


fig. 27

L'influence de ces inclusions sur la conductibilité électrique est faible. Le soufre améliore l'usinabilité. L'oxygène forme avec le cuivre un protoxyde et provoque la fragilisation par hydrogène.

Lorsque le cuivre est chauffé (recuit), dans une atmosphère contenant l'hydrogène ou d'autres gaz, ces derniers diffusent en profondeur. Si le cuivre comporte des inclusions Cu_2O , elles réagissent avec H_2 , en formant des vapeurs d'eau suivant la réaction :



Cette réaction s'accompagne d'augmentation de volume car les molécules H_2O (vapeur d'eau) ne peuvent pas se diffuser dans le réseau cristallin du cuivre, elles se rassemblent dans de petits espaces produisant ainsi une pression élevée et donne lieu à la formation de microfissures qui peuvent entraîner la rupture du métal, donc le métal devient fragile et une éventuelle déformation conduit à l'interruption des limites de grains (joints de grains).

Ce phénomène est connu sous la maladie d' H_2 et ne se manifeste pas lorsque le cuivre ne contient pas de Cu_2O où la totalité de l' O_2 est liée avec d'autres éléments. dont leurs oxydes sont réduits par H_2 comme par exemple le phosphore et le lithium. Donc il est recommandé d'effectuer le recuit du cuivre contenant du Cu_2O dans une atmosphère non réductrice.

Le soudage résiste bien à la corrosion dans les conditions atmosphériques ordinaires, dans l'eau douce, l'eau de mer et dans d'autres milieux agressifs. Mais sa tenue est mauvaise dans les gaz sulfureux et l'ammoniac.

Caractéristiques physiques du cuivre :

- Température de fusion : 1083°C .
- Réseau cristallin CFC ($a = 3,607\text{\AA}$) = $3,6 \cdot 10^{-8}$ cm.
- Point d'ébullition : 2350°C .

- Chaleur de fusion : 49,9 cal/g.
- Chaleur spécifique : $C_p_{20^\circ\text{C}} = 0,092 \text{ cal/g.yrd.}$
- Massé volumique à 20°C : $8,94 \text{ g/cm}^3$.
- Conductibilité thermique (20°C) : $0,941 \text{ cal/cm.S.grd} = 385 \text{ W}/\mu\text{k.}$
- Coefficient de dilatation linéaire (0 à 1083°C) = 2,25 %.
- Résistivité électrique (20°C) : $\rho = 1,724 \mu\Omega\text{cm} \approx 0,0175 \Omega\text{mm}^2.\text{m}^{-1}$.

Le cuivre est le meilleur conducteur de chaleur et d'électricité après l'argent (6 %), d'où son usage comme chaudière à évaporer, serpentins, cuves, fils et câbles pour transport d'énergie électrique, enroulements de dynamos, etc.

La conductibilité, du cuivre est influencée par la température, les traitements mécaniques et les inclusions. Pour le cuivre pur, elle peut diminuer pour des températures de 100°C jusqu'à 78 % de sa valeur à 20°C , de même que la déformation à froid provoque des distorsions de réseau, ce qui diminue la conductibilité. Les distorsions peuvent être égalisées par un traitement thermique à 450°C de même que les inclusions agissent aussi dans le même sens.

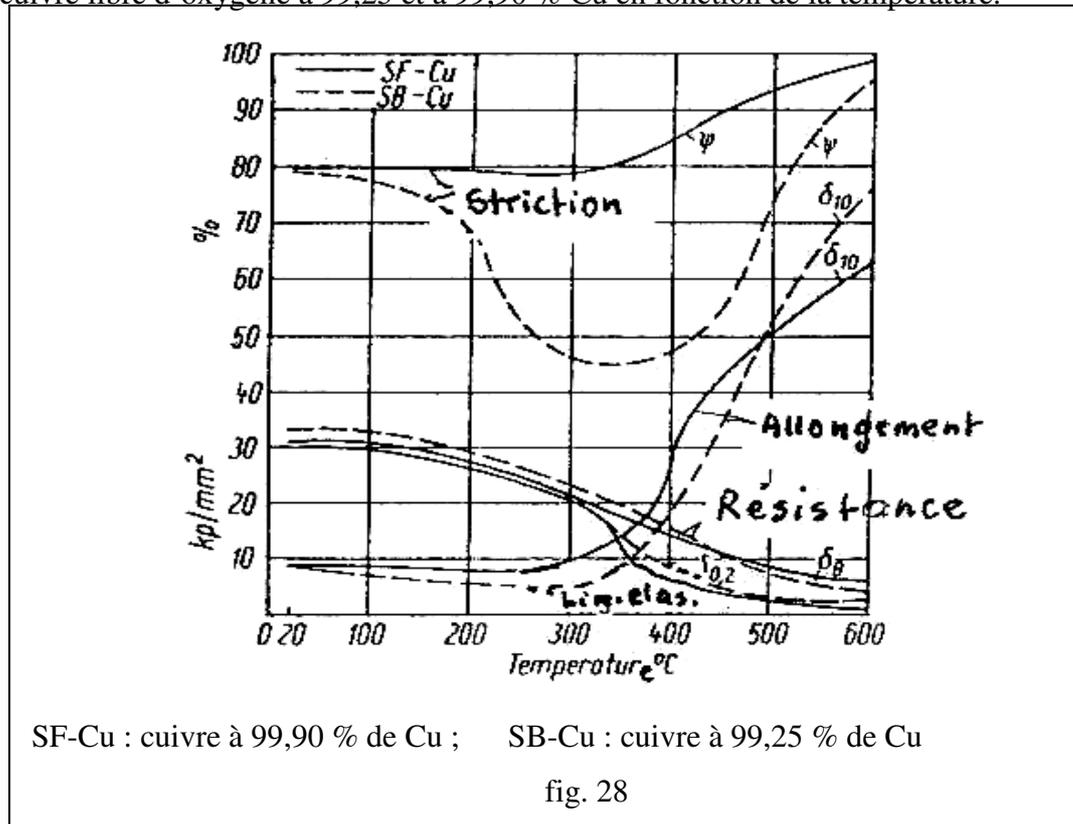
Caractéristiques mécaniques du cuivre :

Le cuivre est un matériau assez ductile et tenace, mais il est mou et de plus, il présente une faible limite élastique. C'est pour cette raison que dans beaucoup de cas, on l'utilise sous forme d'alliages. Le cuivre est malléable à froid et s'écrouit facilement. Il se prête aisément au corroyage, mais son usinage est mauvais. A cause de sa grande ténacité, au cours du travail à froid, on doit procéder à un recuit pour faire cesser l'écrouissage, mais on peut également effectuer le travail à chaud de manière que le recuit compense l'écrouissage. Un fort retrait rend mauvaises, ses propriétés de fonderie. Le cuivre se prête bien au brasage et fondage à l'étain. Le cuivre à faible teneur en oxygène est plus élastique, il est le matériau principal de la fabrication des conducteurs de courant. La fluidité du cuivre fondu lui permettrait d'être facilement coulé, mais les soufflures (gaz dissous SO_2 , CO_2 , ...) inévitables, rendent l'opération difficile. Le cuivre peut être forgé et laminé vers 600°C , mais nécessite des recuits au rouge sombre avec un refroidissement à l'eau.

Caractéristiques	Etat recuit	Etat écroui
Rm (traction) en N/mm^2	210	400
Re en N/mm^2	40	-
Module élasticité : E en N/mm^2	12 500	12 500

Allongement A en %	40	5
Dureté HB	45 à 60	90 à 110

Les propriétés mécaniques du cuivre (résistance), dépendent principalement du degré de déformation et de la température. Sur la figure 28, sont représentées les propriétés de résistance du cuivre libre d'oxygène à 99,25 et à 99,90 % Cu en fonction de la température.



1.6.3. Alliages de cuivre

Le cuivre pur n'est employé que pour ses propriétés de conductibilité électriques. Par contre, la présence d'inclusions même en très faibles proportions, change profondément ses propriétés. Parmi les inclusions, on peut citer brièvement :

- Celles qui forment des solutions solides : Ni, Zn, Sn, Al,
- Celles qui sont insolubles dans le cuivre : Pb, Bi.
- Celles qui forment avec le cuivre des combinaisons fragiles, (Cu_2O et Cu_2S) qui entrent dans la composition de l'eutectique.

Les alliages de cuivre possèdent de hautes propriétés mécaniques et technologiques et résistent bien à l'usure et à la corrosion.

Les alliages de cuivre sont classés en deux catégories :

- Cuivre faiblement allié.

- Cuivre fortement allié.

1.6.3.1. Cuivre faiblement allié

Ce sont les alliages de cuivre qui contiennent une teneur en éléments d'addition inférieure à 1 % (sauf celle du Béryllium qui peut atteindre 2 %). Ils restent en général bons conducteurs électriques, assez résistants à la corrosion et acquièrent des propriétés mécaniques améliorées par écrouissage ou durcissement structural.

Parmi les alliages de cuivre faiblement alliés, on distingue :

a. Alliage Cu-Ag (0.08 % Ag) :

L'argent, comme élément d'addition, augmente la température de recristallisation et la résistance au fluage. Cet alliage conserve ses propriétés jusqu'à 200°C et convient pour le bobinage de machines électriques tournantes.

b. Alliage Cu-Cd (0,7 à 1 % Cd) :

A l'état écroui, la résistance mécanique, la limite de fatigue et la limite de fluage sont très améliorées par rapport au cuivre pur. Il est utilisé pour des fils conducteurs, des électrodes de soudage et des ressorts conducteurs. Avec 1 % Cd et 0,15 % Sn, les propriétés mécaniques s'améliorent encore.

c. Alliage Cu-Te (0,3 à 0.9 % Te) :

L'addition de tellure, permet d'améliorer la résistance mécanique et l'usinabilité grâce aux tellures insolubles qui fragmentent les copeaux.

d. Alliage Cu-Cr (0,5 à 0,9 % Cr) :

Cet alliage est à durcissement structural (trempe à l'eau à 1000°C, revenu à 450°C). Ses propriétés se conservent jusqu'à 450°C. Sa résistance à la traction atteint 500 N/mm² et sa limite élastique 450 N/mm². Il est employé pour les électrodes de soudage par ponts, les contacteurs de puissance, etc.

e. Alliage Cu-Be (2 % Be) :

Alliage à durcissement structural (trempe à l'eau à 800°C, revenu à 320°C). Ses propriétés mécaniques sont très élevées et se conservent jusqu'à 300°C. Il est employé comme ressorts, rondelles, relais, membranes, etc.

f. Alliage Cu-As (0,5 % As) :

C'est un alliage très malléable à froid. Il est utilisé pour la fabrication des rouleaux d'imprimerie.

g. Alliage Cu-Ni-P (1 % Ni et 0,2 % P)

Utilisé après trempe à 93°C et revenu à 500°C, il possède une résistance à la traction de l'ordre de 700 N/mm².

1.6.3.2. Cuivre fortement allié

On distingue deux groupes essentiels d'alliages de cuivre fortement alliés :

- a. Les laitons : composés de cuivre et de zinc (Cu-Zn).
- b. Les bronzes : composés de cuivre et d'étain (Cu-Sn) et d'autres éléments parmi lesquels peut être le zinc mais combiné à d'autres éléments.

Les alliages de cuivre sont caractérisés par de bonnes propriétés mécaniques et technologiques et une bonne tenue à l'usure et à la corrosion.

1.6.3.3. Les laitons (Alliages Cu-Zn)

Le nom laiton est donné aux alliages doubles ou à composants multiples à base de cuivre dans lesquels, l'élément d'alliage principal est le zinc. Les laitons possèdent une couleur allant du rose au jaune suivant l'augmentation de la teneur en zinc.

L'augmentation de la teneur en zinc, fait disparaître la couleur rouge du cuivre en donnant la couleur jaune du laiton, cela est remarquable à partir environ de 15 % Zn. Le diagramme Cu-Zn est représenté sur la figure 29.

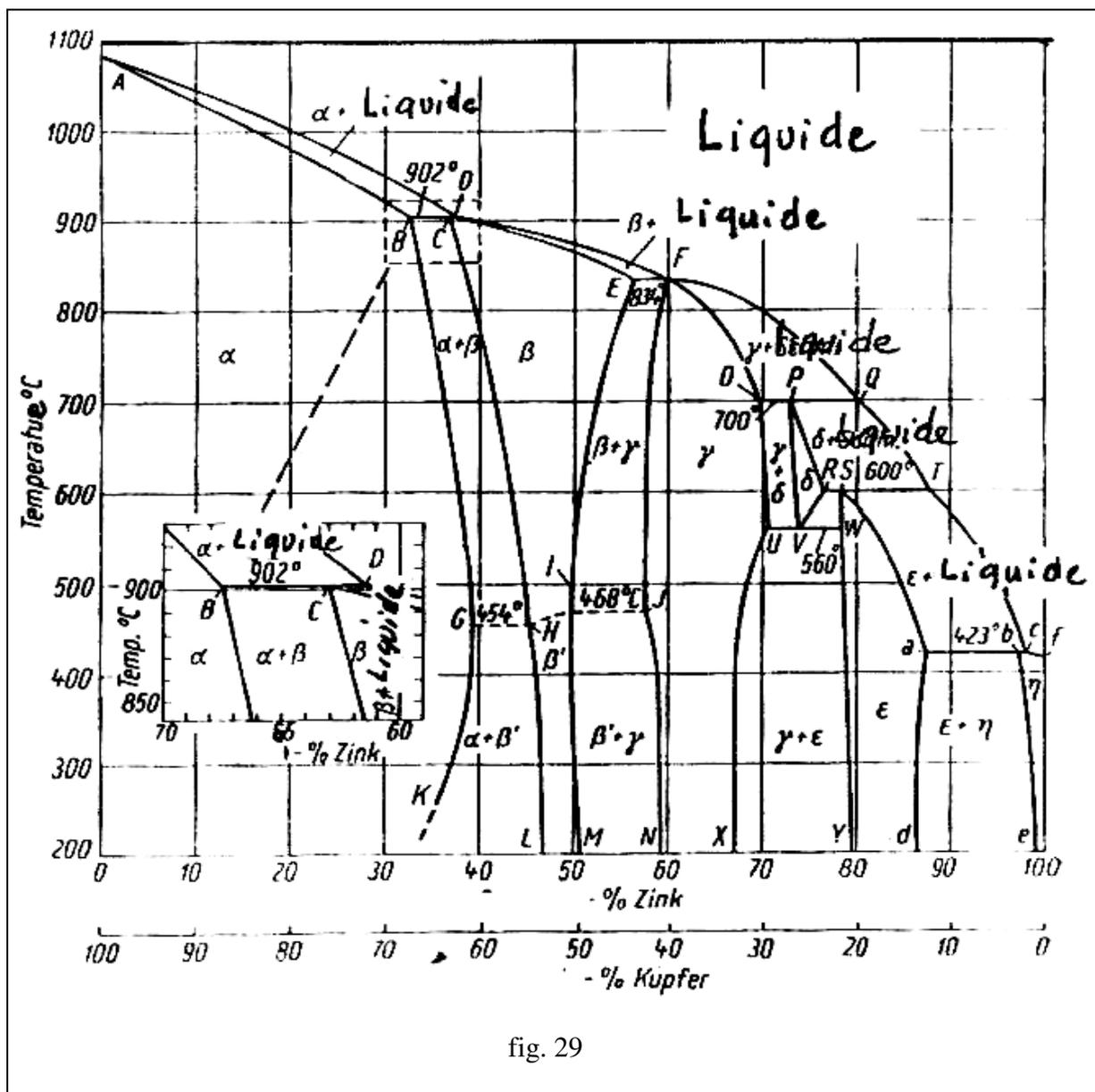
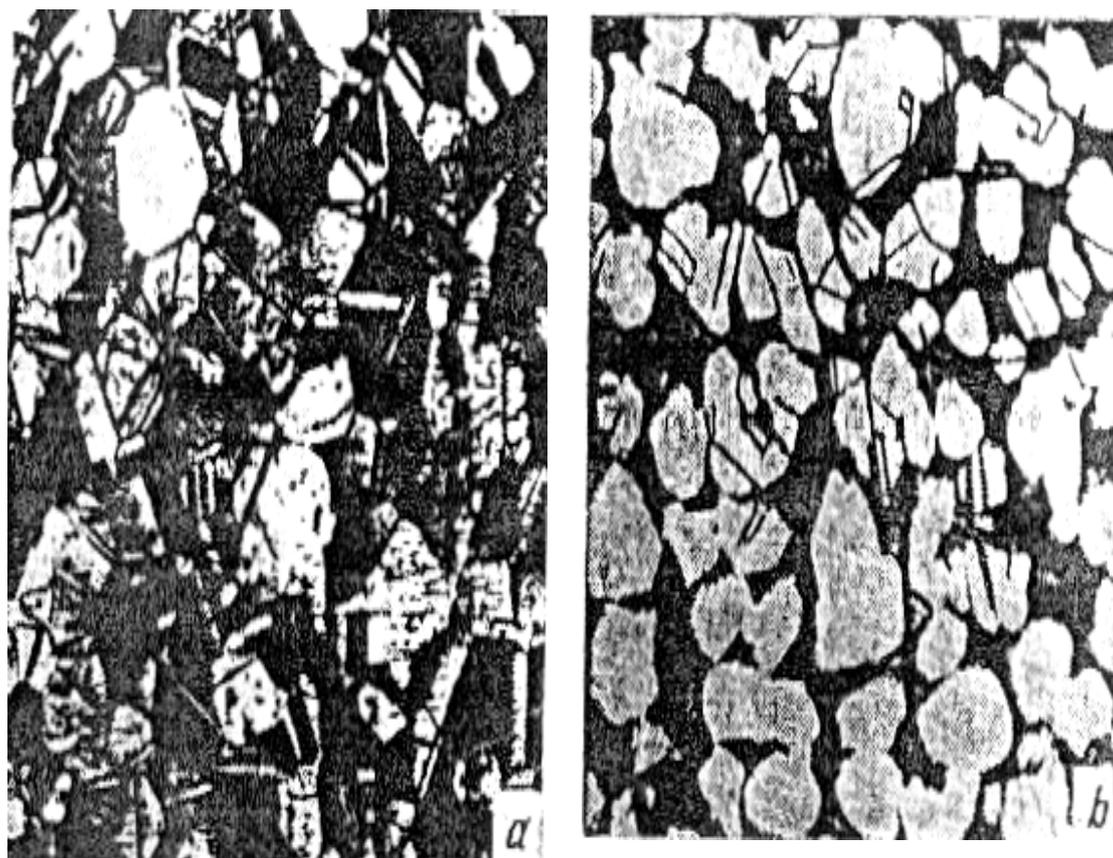


fig. 29

Jusqu'à 60 % Zn, il se compose de trois phases : α , β et γ . La solubilité maximale de zinc dans les cristaux mixtes α a pour valeur 39 %. La phase α est une solution de zinc dans le cuivre à réseau CFC de cuivre. Pour des teneurs de zinc élevées, il y a formation de la phase β avec réseau CC et aux températures élevées, la distribution des atomes de la phase β est désordonnée, en cet état la phase β est plastique. Aux températures inférieures à 454 ou 468°C, la disposition des atomes de cuivre et de zinc dans cette phase devient ordonnée et la phase est alors notée β' . A la différence de la phase β la phase β' est plus dure et plus fragile. A partir de 50 % de zinc, il y a formation de la phase γ avec un réseau compliqué et une grande fragilité, ce qui rend la déformation très mauvaise. En général, les alliages avec une teneur en zinc supérieure à 50 %, ne sont pas techniquement intéressants. Le plus souvent, la structure des laitons se compose de phase α ou $\alpha + \beta'$ (fig. 30).



a. Laiton α

b. Laiton $\alpha + \beta'$

fig. 30

Les différents types de laitons selon TGL, sont représentés sur le tableau ci-dessous.

Désignation		Composition en %								
Nouvelle	Ancienne	Cu	Pb	Zn	Fe	Sn	Al	Mn	Pb	Tot
CuZn40Pb2	Ms58	56,0 à 60,0	1,0 à 3,5	Reste	0,5	0,3	0,1	0,2	-	1,2
CuZn40	Ms60	59,0 à 62,0	-	Reste	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	1,0
CuZn39Pb	Ms60Pb	59,0 à 62,0	0,5 à 2,5	Reste	0,3	0,2	0,1	0,2	-	0,5
CuZn37	Ms6j	62,0 à 65,0	-	Reste	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,5
CuZn36Pb1	Ms63Pb	62,0 à 65,0	0,2 à 3,0	Reste	0,2	0,1	0,1	0,1	-	0,4

CuZn30	Ms70	69,0 à 72,0	-	Reste	0,1	0,1	0,1	0,1	0,03	0,3
CuZn20	Ms80	78,0 à 81,0	-	Reste	0,1	0,1	0,1	0,1	0,03	0,3
CuZn15	Ms85	84,0 à 86,0	-	Reste	0,1	0,1	0,1	0,1	0,03	0,3
CuZn10	Ms90	89,0 à 91,0	-	Reste	0,1	0,1	0,1	0,1	0,03	0,2
CuZn4	-	95,0 à 97,0	-	Reste	0,1	0,1	0,1	0,1	0,03	0,2

Sur le tableau ci-dessous sont données les valeurs des caractéristiques physiques principales des laitons en fonction du % Cu..

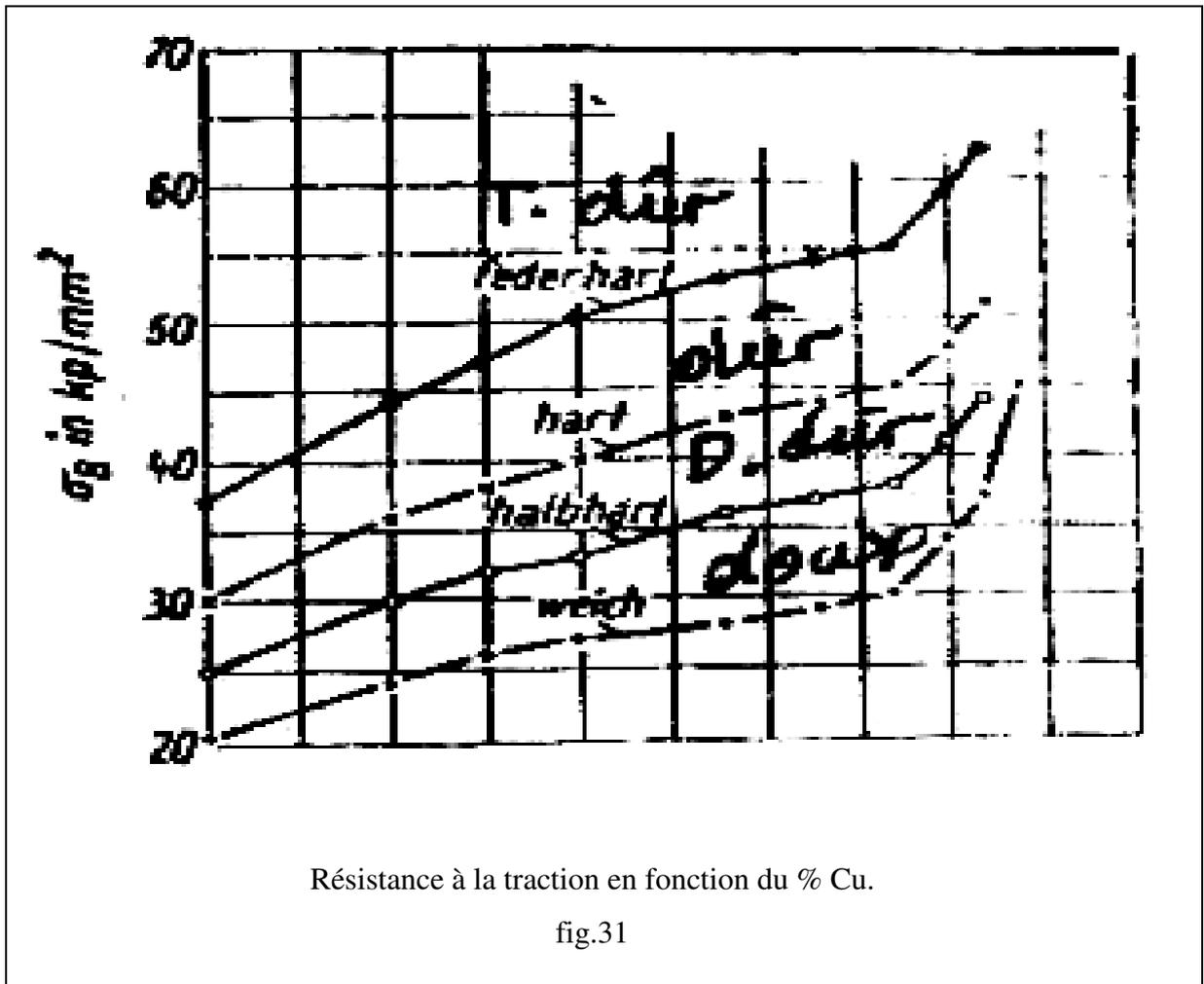
Cu	P	Coefficient d'allongement		Condition électrique	Condition de chaleur		Point de fusion		Point ébul. à 760 mm Hg
		10⁻⁶/ °C					°C		
%	g/cm³	25 à 100°C	25 à 300°C	m/Ωmm²	Cal/cm	s.grd			
				20°C	20°C	200°C	Sup.	Inf.	°C
90	8,80	17,4	18,3	25,5	0,42	0,51	1030	1045	1500
85	8,73	17,7	18,7	21,5	0,37	0,45	1005	1025	1300
80	8,67	18,0	19,1	19,0	0,34	0,41	980	1000	1240
72	8,56	18,5	19,8	16,5	0,30	0,37	980	960	1155
67	8,50	18,8	20,2	15	0,28	(0,35)	935	930	1130
63	8,47	19,0	20,6	15	0,27	(0,34)	902	910	1110
60	8,46	19,2	20,8	15	0,27		895	900	1100
58	8,44	19,3	20,9	15	0,27		890	895	1080
56	8,42	19,4	21,0	15	-		885	890	1070

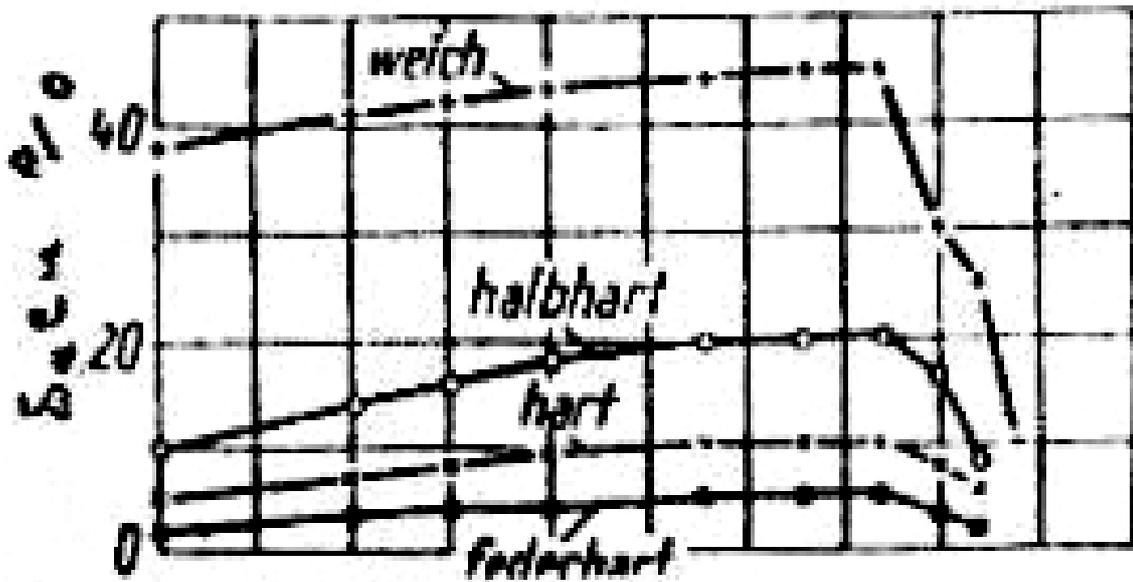
Les indications se rapportent à l'état doux du métal, la relation entre les valeurs de conductibilité électrique et conductibilité thermique est déterminée par la loi de Wiedmann Frauzshe. La conductibilité électrique est obtenue d'après la formule :

Conductibilité thermique = (0,04 à 0,016) x conductibilité électrique.

Les valeurs de la chaleur spécifique dans le domaine α , dépendant généralement de la teneur du cuivre. Ils augmentent avec l'augmentation de la teneur en zinc dans le domaine ($\alpha + \beta$) et idem avec l'augmentation de la température.

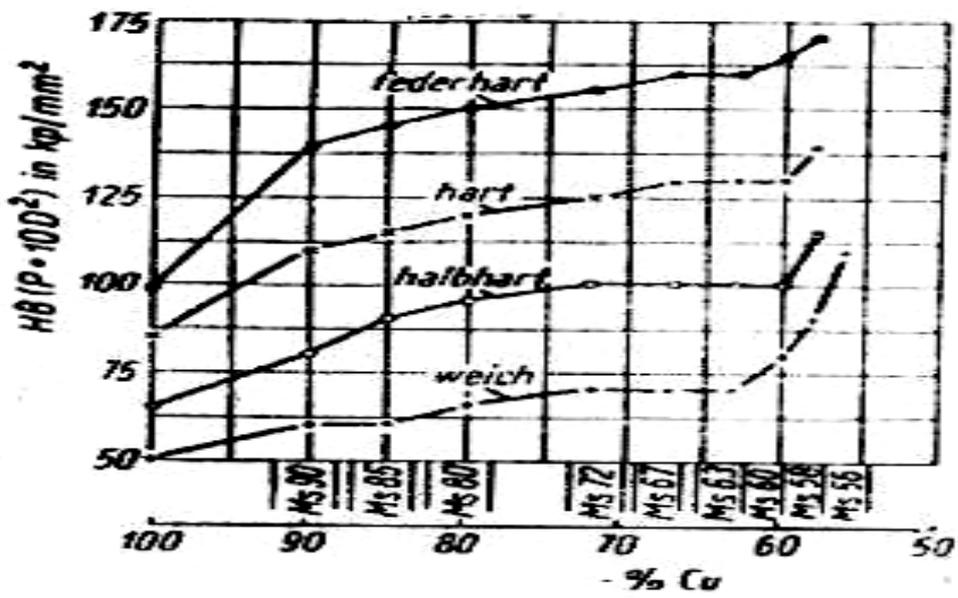
Les figures 31, 32 et 33 représentent, respectivement, la dépendance entre la résistance de traction, l'allongement et la dureté HB des différents états de durcissement avec le % Cu.





Allongement en fonction du % Cu.

fig.32



Dureté HB en fonction du % Cu.

fig.33

Les propriétés de résistance du laiton en fonction du % Zn sont représentées sur la figure 34.

Avec l'augmentation de la teneur en Zn dans les cristaux mixtes α , il y a augmentation de la résistance de traction et de l'allongement à la rupture.

Les laitons ne peuvent pas être durcis (durcissement par traitement thermique). Donc les propriétés mécaniques peuvent être améliorées uniquement grâce au durcissement par déformation (écrouissage).

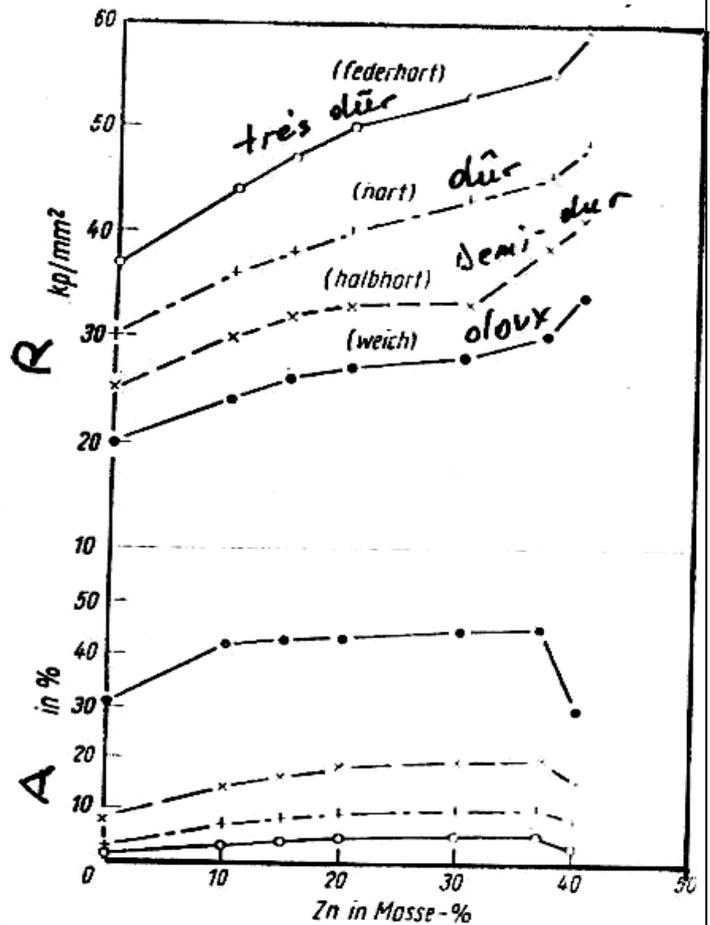
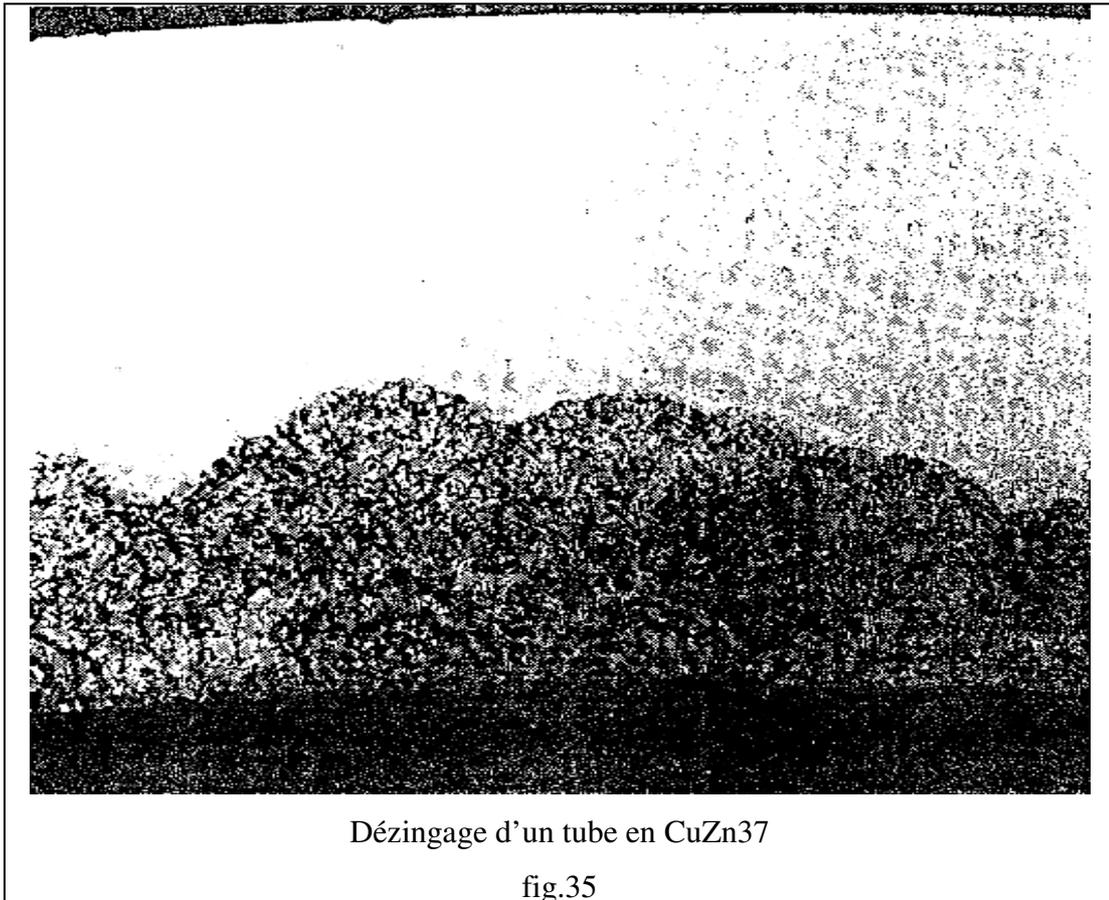


Fig.34

Le recuit d'adoucissement de ces alliages doit être effectué à des températures basses, car ces alliages ont tendance à la formation de structure à gros grains lors de la recristallisation. Cette tendance diminue avec l'augmentation de la teneur du zinc, les températures de recuit, en général ne doivent pas être choisies supérieures à 500°C.

Les alliages de Cu-Zn corroyés sont considérés comme de bons résistants à la corrosion, où le laiton β possède un bon rendement contre les attaques chimiques que le laiton α .

Une corrosion particulière « dézingage » apparaît dans le cas des alliages avec une teneur en zinc supérieure à 20 %, comme le montre la figure 35, où il y a dissolution, en premier lieu, des cristaux mixtes α .



Les alliages Cu-Zn sont sensibles contre la corrosion de criques de tension dans l'atmosphère et dans la solution d'ammoniac. Cette forme de corrosion est liée aux contraintes mécaniques internes et externes. Elle peut être évitée grâce au recuit de détente (décompression) à une température d'environ 250°C ou plus.

Les alliages Cu-Zn contenant du plomb sont utilisés surtout pour la fabrication des parties tournantes (boulons, écrous, pièces d'horloges).

Les alliages CuZn40 et CuZn37 sont déformables à froid et servent pour la fabrication d'écrous et de boulons. Les alliages CuZn30 et CuZn20 sont destinés pour la fabrication de conduites d'échangeurs de chaleur, corps, ressorts, conduites de manomètres, etc.

1.6.3.4. Les laitons spéciaux à composants multiples

Les laitons industriels contiennent environ (48 à 50) % Zn et se divisent en laitons homogènes ou laitons α et hétérogènes ou laitons ($\alpha + \beta'$) :

- Laitons homogènes ou laitons α avec une teneur en Cu de 100 à 62,5 % et se prêtent bien au corroyage à chaud et à froid.
- Laitons hétérogènes ou laitons ($\alpha + \beta'$) avec une teneur en cuivre jusqu'à 56 %. Ils sont peu plastiques à l'état froid et peuvent être soumis au corroyage à chaud.

Les laitons spéciaux sont des alliages à base de Cu et de Zn et alliés avec un ou plusieurs éléments d'addition tels que : Si, Al, Sn, Ni, Mn, Pb, Fe, As. L'introduction des éléments d'alliage, sauf le nickel, diminue la solubilité du zinc dans le cuivre et contribue à la formation de la phase β , c'est pourquoi en général, les laitons spéciaux sont considérés comme des laitons biphasés ($\alpha + \beta'$).

Le tableau, ci-dessous, donne une idée sur les différents types de laitons spéciaux ainsi que leur composition chimique selon TGL.

Désignation	Eléments d'alliage %			Inclusions en %						
	Cu	Zn	Composition	Al	Sn	Mn	Fe	Pb	Si	Autre
CuZn40MnPb	56 61	à Reste	0,4 à 2,0 Mn 1,0 à 2,0 Pb	0, 8	0,2	-	0,6	-	0,5	1,5
CuZn40Al1	56 61	à Reste	1,0 à 1,5 Al 1,5 à 2,2 Mn	-	0,2	-	1,0	1,0	0,5	2,0
CuZn40Al2Fe 1	56 61	à Reste	1,0 à 2,5 Al 0,2 à 3,0 Mn 0,5 à 1,5 Fe	-	0,1	-	-	0,8	0,3	1,0
CuZn35Al1Ni	57 62	à Reste	0,3 à 1,5 Al 1,5 à 2,5 Mn 2,0 à 3,0 Ni	-	0,1	-	0,5	0,5	0,05	1,0
CuZn29Al	67 71	à Reste	0,5 à 2,0 Al 0,3 à 0,7 Mn	-	0,2	1,0	0,5	0,02	-	1,0
CuZn21Al12	76 79	à Reste	1,8 à 2,5 Al 0,03 à 0,05 As+P	-	0,05	0,1	0,10	0,07	0,05	0,3

L'influence des éléments d'alliage sur les caractéristiques des laitons spéciaux se résume comme suit :

a. Le silicium (Si) : C'est l'élément le plus influant. Dans les laitons α , on peut dissoudre jusqu'à 4 % de Si. Sa solubilité diminue dans les cristaux mixtes avec l'augmentation de la teneur en zinc. Le silicium augmente la résistance à la corrosion, la résistance à la rupture, la résistance à la déformation et améliore la qualité de frottement pour des teneurs entre 0,3 et 0,6 % Si. Il y a formation de siliciures qui améliorent les qualités de frottement des liaisons ($\alpha + \beta'$).

b. L'aluminium (Al) : Il augmente la résistance, la limite élastique, la dureté et la bonne résistance à la corrosion par la formation d'une couche protectrice d'alumine en surface du métal. L'aluminium rend difficile la brasure, elle peut être réussit seulement par l'utilisation de matière fluidisante ou par brasage à l'argent d'une teneur d'environ 2 %.

c. L'étain (Sn) : Sa solubilité dans les laitons α est de 1,5 % à la température de 400°C, mais dans les laitons, on a seulement 0,4 % Sn. Alors que 1 % Sn, donne une excellente résistance à la corrosion, par la formation d'une couche de protection.

d. Le fer (Fe) : La solubilité du fer dans le cuivre dépend de la température et constitue une possibilité de durcissement à chaud. Les premières liaisons du fer agissent fortement sur la formation des grains et améliorent les propriétés mécaniques, (résistance à la traction et dureté). La teneur moyenne est de 0,5 à 1,5 %. Pour avoir une bonne tenue à la corrosion, la teneur en fer ne doit pas être supérieure à 0,5 % car le fer diminue la résistance à la corrosion.

e. Le manganèse (Mn) : Le manganèse agit semblablement comme le fer, sa solubilité dans les cristaux mixtes α est supérieure à celle du fer, permet l'utilisation de l'alliage dans les constructions maritimes en supportant de fortes pressions.

f. Le plomb (Pb) : Techniquement, on utilise des teneurs jusqu'à 3 % Pb. Il facilite l'usinage, dont notamment le décolletage et améliore les propriétés antifriction en restant insoluble sous forme de globules qui fragmentent les copeaux. Ces alliages sont utilisés pour la visserie, la robinetterie et les pièces d'horlogerie.

g. Le nickel (Ni) : On utilise des teneurs allant jusqu'à 3 %. Il donne à l'alliage une résistance mécanique élevée et une bonne résistance à la corrosion dans l'eau douce, l'eau de mer, la vapeur et les acides dilués.

h. Le phosphore et l'arsenic (P,As) : Le phosphore rend les laitons plus fluides. Sa liaison avec l'arsenic augmente la tenue à la corrosion par la formation d'une couche de revêtement. De manière générale, tous les éléments d'alliages, (sauf le plomb), augmentent la dureté et diminuent la plasticité du laiton.

Le tableau, ci-dessous, donne un aperçu sur les propriétés mécaniques des différents types de laitons spéciaux selon TGL.

Désignation	Etat	$\sigma_{0,2}$	R	A	HB	Applications
		(Kp/mm ²)	(%)	(%)	(Kp/mm ²)	
CuZn40MnPb	Barre étirée	20	45	18	130	Cage de roulement
CuZn40Al1	Barre pressée	20	45	15	120	Armatures, bielles de pistons
	Barre étirée	30	50	12	135	
CuZn40Al2Fe	Barre pressée	28	60	12	140	Résistance à la corrosion
CuZn35Al1Ni	Barre pressée	30	50	18	110	Construction navale
CuZn29Al	Tôle douce	10	37	50	75	Ressorts
	Tôle demi-dure	25	45	30	125	Résistance à la fatigue et à la corrosion
	Tôle dure	40	55	15	150	
	Tôle très dure	45	60	8	160	
	Tôle très dure +	50	65	5	170	
CuZn21Al2	Rec. Adoucis.	14	34	50		Condensateurs
	Demi-dur	20	40	40		Construction navale

1.6.3.5. Les bronzes (Alliages Cu-Sn)

Ce sont des alliages composés de Cu-Sn, dont la teneur en Sn est de 3 à 20 %. Jusqu'à 5 % Sn, ils possèdent une couleur rouge et elle passe au jaune à partir de 15 % de Sn. Ils sont utilisés surtout en fonderie grâce à leurs bonnes propriétés de moulage. Ils présentent une bonne tenue à la corrosion, mais de mauvaises qualités d'usinage. Dans la pratique, on utilise uniquement les bronzes avec une teneur en Sn jusqu'à 12 % car les alliages les plus riches en étain sont très fragiles. Le tableau, ci-dessous donne les différents types de bronzes selon TGL.

Désignation	Composition en %					Autres éléments en %			
	Sn	Zn	Pb	P	Cu	Fe	Pb	Zn	P
CuSn2	1,0 à 2,0	-	-	0 à 0,1	Reste	0,05	0,05	0,3	-
CuSn3	2,0 à 3,5	-	-	0 à 0,4	Reste	0,05	0,05	0,3	-
CuSn4	3,5 à 4,5	-	-	0 à 0,4	Reste	0,05	0,05	0,3	-
CuSn6	5,5 à 7,0	-	-	0 à 0,4	Reste	0,10	0,05	0,3	-
CuSn8	7,0 à 9,0	-	-	0 à 0,4	Reste	0,05	0,05	0,3	-
CuSn4Zn3	3,5 à 4,5	2,7 à 4,0	-	-	Reste	0,05	0,05	-	0,05
CuSn6Zn6	5,0 à 7,0	5,0 à 7,0	-	-	Reste	0,05	0,05	-	0,10
CuSn4Zn4Pb 4	3,0 à 5,0	3,0 à 5,0	3,0 à 5,0	-	Reste	0,05	-	-	0,05

Le diagramme d'équilibre de l'alliage de bronze est donné par la figure 36.

La phase α est une solution solide de l'étain dans le cuivre à réseau CFC. La solubilité limite atteint 15 %. Elle est malléable à chaud et à froid.

Les alliages de ce système forment des composés électroniques du type :

Phase β (Cu₅Sn).

Phase δ (Cu₃₁Sn₈).

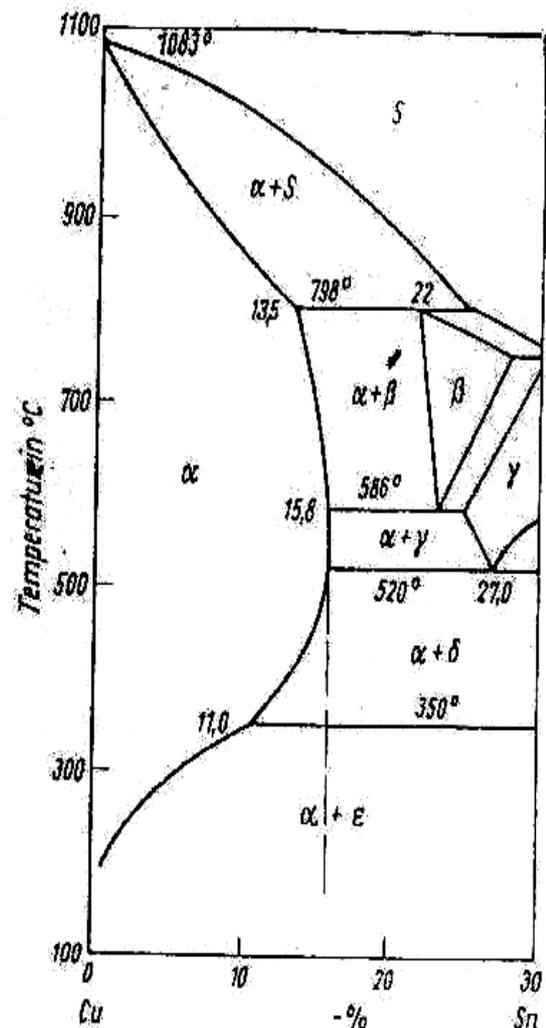
Phase ϵ (Cu₃Sn).

Phase γ (la nature n'est pas établie).

Le système Cu-Sn présente plusieurs transformations péritectiques et deux transformations de type eutectoïdes. A 588°C,

les cristaux de la phase β subissent une décomposition eutectoïde avec formation des phases α et γ , et à 520°C, les cristaux de la solution solide γ se décomposent en $\alpha + \delta$.

fig.36



A la température d'environ 530°C, la phase δ se décompose en solution solide α et une phase ϵ . Cependant cette transformation marche seulement dans les conditions d'un refroidissement très lent. Dans la pratique, on utilise seulement les alliages Cu-Sn à moins de 12 % de Sn car les alliages plus riches sont très fragiles à cause de la phase δ .

L'intervalle de température de cristallisation des bronzes à l'étain est très grande (Voir diagramme d'équilibre), il en résulte une tendance à la ségrégation (formation d'une porosité dispersée).

La ségrégation de cristaux peut être aussi observée dans les structures des alliages Cu-Sn moulés, cette dernière rend difficile le travail par déformation à chaud. Cela est expliqué par le phosphore en excès qui n'est pas lié avec l'oxygène et se trouve sous forme de Cu_3P , et qui forme avec l'eutectique du cuivre un eutectique fusible à 707 °C, ce qui provoque un danger de rupture à chaud.

Après déformation et recuit, les bronzes titrant à 4 ou 5 % Sn, ont une structure polyédrique et constituent essentiellement une solution solide α . La modification des propriétés mécaniques des bronzes en fonction de la teneur en Sn est donnée sur la figure 37.

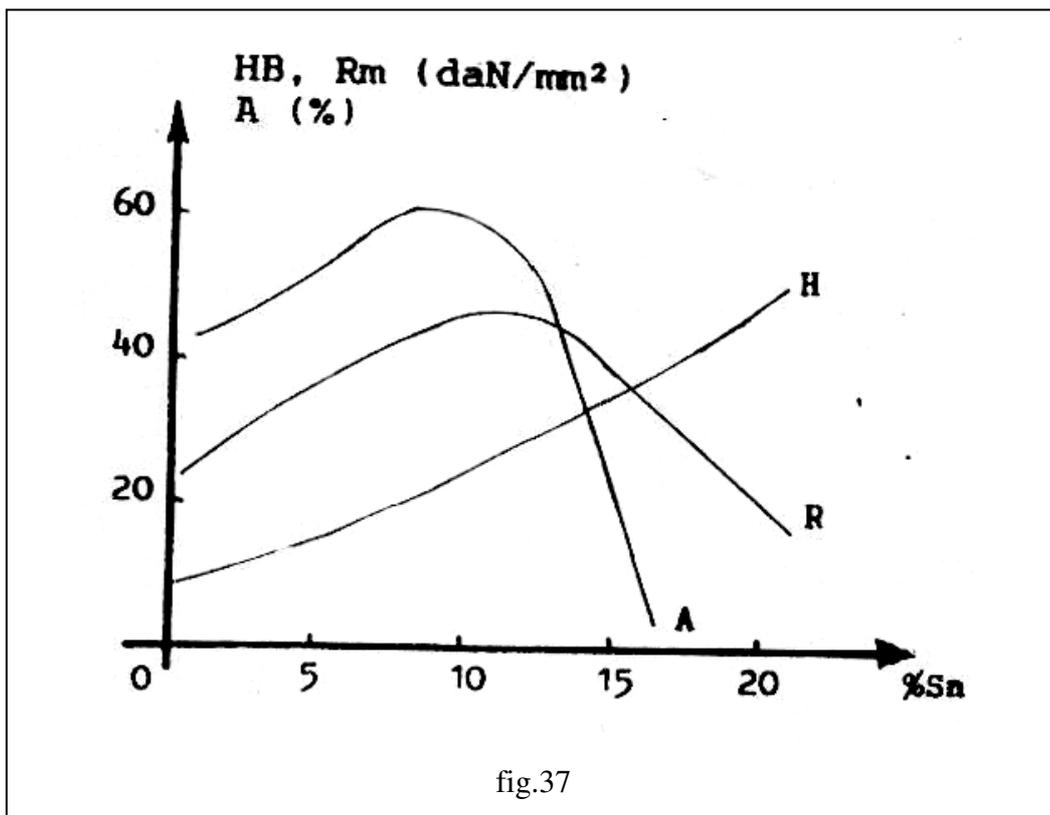


fig.37

La dureté (H) augmente régulièrement avec la teneur en Sn jusqu'à 13 % et s'accroît pour des volumes supérieurs. La résistance mécanique (R) augmente nettement dans le domaine de l'existence de la solution solide α et chute au delà.

Quant à l'allongement (A), il conserve son niveau élevé (environ 60 %) et reste constant jusqu'à 13 % Sn et diminue brutalement au delà, à cause de la grande fragilité de la phase δ .

L'homogénéisation de la structure des produits moulés et écrouis se fait avec un recuit à 700°C, suivi d'un refroidissement rapide. La trempe martensitique des bronzes s'opère au dessus de 600°C.

Les bronzes se divisent en deux groupes : les bronzes de corroyage et ceux de fonderie.

a. Les bronzes de corroyage :

La teneur en Sn est de 4 à 6 % et les autres teneurs maximales en P : 0,4 %, en Zn : 4 %, en Pb : 4,5 %. Ils sont élaborés sous formes de barres, plats, fils, aux états écrouis (durs) et recuits (doux). Ils sont destinés pour la fabrication des ressorts et des éléments élastiques. Les bronzes à l'étain, de corroyage, sont constitués de la solution α .

b. Les bronzes de fonderie :

Ils contiennent une grande quantité de zinc, de phosphore et souvent de plomb. Ils possèdent une structure biphasée, composée de solution solide α et d'inclusions de la phase δ durs et fragiles, qui, généralement font partie de la structure de l'eutectoïde.

Les bronzes à l'étain sont généralement alliés aux Zn, Fe, P, Pb, Ni et à d'autres éléments. Le zinc améliore les propriétés technologiques du bronze et le rend moins cher. Lorsque la teneur en phosphore est supérieure à 0,3 %, il forme la phosphure Cu_3P qui améliore les propriétés élastiques et antifrictions. Le nickel améliore les propriétés mécaniques, la tenue à la corrosion et la densité des pièces moulées tout en diminuant la ségrégation. Le fer affine le grain, mais dégrade les propriétés technologiques des bronzes, ainsi que la résistance à la corrosion. L'addition du plomb diminue les propriétés mécaniques des bronzes, mais augmente la densité des moulages, facilite l'usinage et améliore les propriétés antifrictions.

De cette catégorie des bronzes à l'étain avec addition, on distingue :

a. Bronze au phosphore :

La teneur en phosphore est de (0,03 à 0,05) %. Il forme avec le cuivre le composé Cu_3P , dur et fragile et augmente la résistance mécanique. Le phosphore est un élément qui améliore la coulabilité.

b. Bronze au plomb :

Avec une teneur de 1 à 30 % de Pb, le plomb est insoluble dans l'alliage et reste dispersé sous forme de globules. Jusqu'à 7 %, il améliore l'aptitude à l'usinage et à l'étanchéité. Au delà de 7 % et jusqu'à 30 %, les bronzes au plomb sont surtout employés, pour le faible coefficient de frottement qu'ils présentent, pour la fabrication des coussinets et des glissières. On les utilise aussi comme conduites pour l'acide sulfurique.

c. Bronze au zinc (CuSn_5Zn_4) :

Le zinc facilite la désoxydation, améliore la résistance à la traction, l'allongement, la coulabilité et la malléabilité. En plus du zinc et jusqu'à 6 % de plomb, il est utilisé en robinetterie, pour les conduites d'eau, de vapeur et de pétrole, ainsi que pour la fabrication des appareils électriques.

d. Bronze au manganèse (1 à 3 % Mn) :

Ce bronze marque une augmentation de la dureté, mais légèrement inférieure qu'avec le phosphore. L'alliage est caractérisé par une grande ténacité.

3.6.4. Les cupro-aluminium (Cu-Al)

La teneur en Al varie de 4 à 14 %. Ils sont caractérisés par de bonnes propriétés mécaniques et par une résistance élevée à la corrosion marine, à la corrosion sous tension et à la fatigue par corrosion. Ils sont surtout utilisés pour la fabrication de bagues de toute sorte, de sièges de guidage, de brides, de roues dentées, etc.

La figure 38, ci-dessous, représente le diagramme d'équilibre Cu-Al.

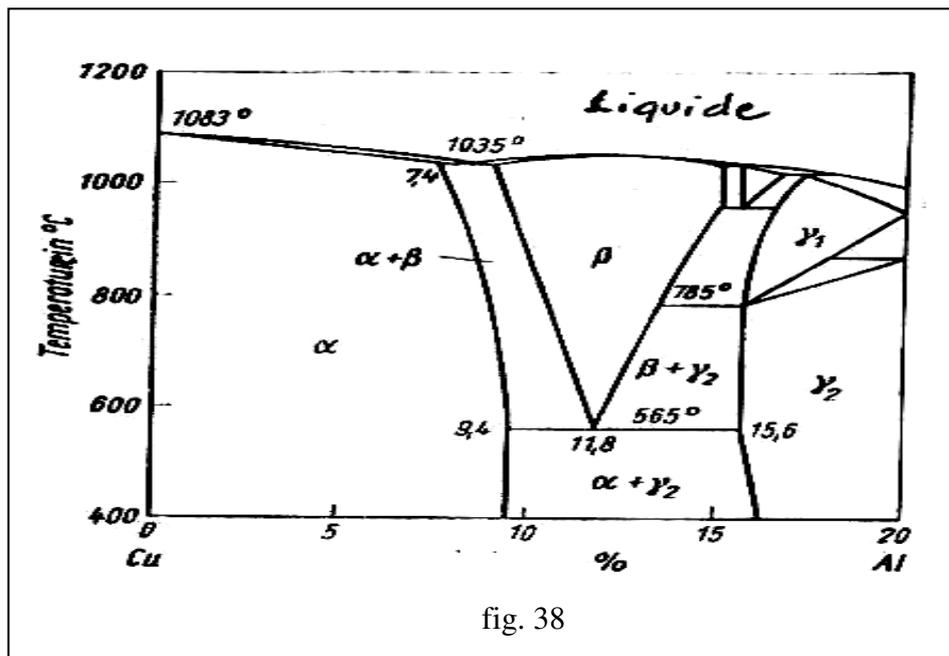


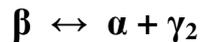
fig. 38

Les alliages titrant jusqu'à 9,4 % d'aluminium sont constitués de cristaux mixtes α . La phase β est une solution solide à base de composé électronique Cu_3Al . Lorsque la teneur en Al dépasse 9 %, on observe la formation de l'eutectoïde $\alpha + \gamma_2$ (γ_2 est le composé électronique $\text{Cu}_{32}\text{Al}_{19}$).

La phase α est plastique, mais de résistance peu grande, alors que la phase γ possède une dureté et une plasticité très faible.

- Les alliages monophasés α sont malléables à froid.

- Les alliages biphasés $\alpha + \gamma_2$ sont obtenus suite à la transformation eutectoïde suivante :



Les alliages hypoeutectoïdes, composés des phases $\alpha + \varepsilon(\alpha + \gamma_2)$ ont une résistance élevée et une faible plasticité à froid. Par contre au dessus de 565°C, la présence de la phase β permet aux alliages de supporter de grandes déformations.

Les bronzes à l'aluminium, résistent bien à la corrosion et possèdent des propriétés mécaniques et technologiques élevées. Ils se présentent facilement au corroyage à chaud et à froid pour des additions de 7 à 8 % Al. Leurs bonnes propriétés de fonderie permettent de les employer pour toute sorte de moulage.

Le tableau, ci-dessous, donne un aperçu sur l'influence de l'écrouissage à froid (déformation à froid) sur les propriétés mécaniques de deux types de cupro-aluminium.

Propriétés	CuAl ₄		CuAl ₈	
	Doux	Ecroui	Doux	Ecroui
Limite élastique : $\sigma_{0,2}$ (Kp/mm ²)	16	73	20	78
Résistance à la traction (Kp/mm ²)	42	85	50	95
Allongement à la rupture : A (%)	53	7	50	4
Striction à la rupture (contraction) en %	65	30	55	40

L'addition de certains éléments chimiques permet d'améliorer encore les propriétés des cupro-aluminium. Ainsi, la présence du fer dans ces alliages affine le grain et améliore les propriétés mécaniques et antifrictions. Le nickel renforce encore les propriétés mécaniques et surtout la tenue à la corrosion et à l'usure jusqu'à environ 500°C. Deux types de cupro-aluminium, sont représentés dans le tableau suivant dont la composition chimique est la suivante :

Alliages	% maximum				Produits secondaire en %					
	Al	Mn	Fe	Cu	Mn	Fe	Zn	Pb	Si	P
CuAl ₅	4 à 6	-	-	Reste	0,5	0,5	0,3	0,3	0,2	0,01
CuAl ₁₀ Fe ₃ Mn1	9 à 11	1 à 2	2 à 4	Reste	-	-	0,5	0,03	0,4	0,01

1.6.5. Les cupro-nickel (Cu-Ni)

Les alliages Cu-Ni contiennent de 5 à 45% Ni. Le diagramme d'équilibre Cu-Ni comporte une solution solide unique puisque le cuivre et le nickel sont solubles en toutes proportions. Les

bronzes au nickel résistent bien à la corrosion par l'eau de mer. Les nuances industrielles sont alliées avec du silicium et du manganèse (Cu-Ni-Si, Cu-Ni-Mn) dans les proportions suivantes :

- Composition de l'alliage Cu-Ni-Si : 0,5 à 4 % Ni, 0,15 à 1 % Si et le reste Cu.
- Composition de l'alliage Cu-Ni-Mn : 20 % Ni, 20 % Si et le reste Cu.

Les alliages contenant plus de 20 % Ni sont très malléables et résistent remarquablement à la corrosion de l'eau de mer. Ils sont utilisés pour la fabrication des monnaies avec 25 % Ni, et surtout pour les tubes condenseurs d'eau de mer.

1.6.6 Le Constantin (55% Cu et 45% Ni)

Cet alliage possède un coefficient de résistivité électrique nul. Sa résistivité est à peu près, indépendante de la température. Il sert à fabriquer des résistances électriques et des pièces d'appareils de mesure.

1.6.7. Les maillechorts (Cu-Ni-Zn)

Les maillechorts sont des alliages de Cu : (40 à 66) %, de Ni : (9 à 32) % et de Zn : (17 à 45) %. Ils ont des propriétés intermédiaires entre celles des laitons et celles des cupronickels. On distingue les alliages monophasés qui sont malléables et les alliages diphasés qui sont facilement usinables et forgeables à chaud.

Les maillechorts sont des alliages blancs, durs et inaltérables que l'on utilise dans la fabrication de pièces d'orfèvrerie, d'instruments scientifiques, des résistances et d'appareillages électriques.

1.6.8. Les cuprosiliciums (Cu-Si)

Ces alliages sont du type CuSi_3Mn , $\text{CuSi}_2\text{Al}_{25}$, qui ont des caractéristiques alliés à une bonne tenue à la corrosion en eau douce et en eau de mer. L'addition jusqu'à 3,5 % de Si avec le cuivre, permet d'augmenter la résistance et la plasticité. L'introduction de Ni et Mn renforce la résistance mécanique et la résistance la corrosion. Les bronzes au Silicium se prêtent bien au corroyage, à l'usinage et au soudage, ils peuvent s'employer pour la fabrication de ressorts et des éléments élastiques des appareils. Il existe d'autres types d'alliage de cuivre de la même famille des cuproliums tels que les cuproplombs et les cuprobérylliums.

1.6.9. Propriétés et emplois

1.6.9.1. Le cuivre

Désignation	Symbole	Elaboration	Cu + Ag (%)	P (%)	Propriétés et emplois
Cuivres raffinés	Cu/a1	Affiné par voie électrolytique	99,9	Néant	Haute conductibilité électrique et thermique, impropre au soudage. Emploi en électrotechnique.
	Cu/a2	Affiné par voie thermique	99,9	Traces	Haute conductibilité, impropre au soudage. Emploi en électrotechnique.
	Cu/a3	Affiné par voie thermique	99,75	Traces	Conductibilité non garantie, impropre au soudage. Usages mécaniques.
Cuivre raffiné désoxydé	Cu/b	Affiné par voie thermique ou électrolytique désoxydé au phosphore	99,9	0,013 à 0,050	Bonne soudabilité, bonne tenue au chauffage en atmosphère réductrice. Usages mécaniques : tubes, pièces embouties ou matricées.
Cuivres raffinés exempts d'oxygène	Cu/c1	Cathodes fondues et coulées à l'abri de l'air. (Cuivre OFHC de commerce)	99,92	Traces	Haute conductibilité électrique, bonne soudabilité. Usages électriques et mécaniques.
	Cu/c2	Cathodes fondues et coulées à l'abri de l'air. (Cuivre OFHC certifié de commerce)	99,96	0,0003 au max.	Mêmes propriétés que Cu/c1, soudable au verre. Usages électroniques et mécaniques.
Cuivre en					Haute conductibilité. Usages

cathodes	Cu/d	Affiné par voie électrolytique	99,9	Néant	électriques et mécaniques. Elaboration des alliages
----------	------	--------------------------------	------	-------	--

1.6.9.2. Les cuivres faiblement alliés

Désignation	Composition	Etat	R	A %	HB	ρ à 20°C	Propriétés et emplois
Cuivre à l'argent Cu Ag	0,3 à 0,1 % Ag	Ecroui ¾ dur	36	12	115	1,72 à 1,76	Température du recuit supérieure à celle du cuivre. Usages électriques : contacts, lames de collecteurs, bobinages, etc.
Cuivre au cadmium Cu Cd	0,7 à 1 % Cd	Ecroui ½ dur	52	6	120	1,9 à 2,1	Grande résistance mécanique, grande dureté, bonne conductibilité. Température du recuit supérieure à celle du cuivre. Emplois : fils téléphoniques, conducteurs pour caténares, etc.
Cuivre au chrome Cu Cr	0,5 à 0,9 % Cr	Trempe Revenu écroui	52	2 à 5	140	2,1	Grande résistance mécanique après trempe et revenu, grande dureté. Emplois : contacts, électrodes, lames de collecteurs.
Cuivre au béryllium Cu Be	2 % Be 0,4 % Ni ou Co	Trempe et revenu	140	2	160	7 à 8	Très grande résistance mécanique, très grande dureté mais conductibilité électrique médiocre. Emplois : ressorts, pièces de frottement.
Cuivre au tellure Cu Te	0,3 à 0,7 % Te	Ecroui ½ dur	31	12	80	176 à 180	Grande facilité d'usinage, bonne conductibilité, température de recuit plus élevée que celle du cuivre. Emplois : appareillage électrique.

1.6.9.3. Divers alliages fortement alliés

Nature	Usage	Nuance ou composition	Propriétés et emplois
Alliages de nickel	Pour laminage (métal Monel)	Ni + Cu (30 %) + Fe (1 à 2 %) + Mn (1 %) + Al (2,75 %)	Bonne résistance mécanique. Grande résistance à la corrosion. Emplois en marine, industries chimiques.
	Pour fonderie	Ni + Cu + Fe + Mn + Si (4 %)	Mêmes propriétés
	Métal Inconel	Ni + Cr (14 %) + Fe (6 %) + Si (2 %) pour pièces moulées	Grande résistance à l'oxydation à température élevée.
	Ni-Cr	Ni (80 %) + Cr (20 %)	Résistances électriques.
Alliages de zinc ou Zamac Zn + Al ou Zn + Al + Cu	Pour moulage en coquille sous pression	Z-A4G Z-A4U1G Z-A4U3G	Carburateurs, pompes à essence, poignées de portes, articles ménagers, machines à écrire, etc.
	Pour outils d'emboutissage (kayems)	Kayems 1 et 2 Al (4 %) + Cu (3 %)	Poinçons et matrices.
Alliages de magnésium	Pour moulage	G-A6Z3, G-A9, g-A9Z1, etc.	Alliages très légers, utilisées surtout en aviation.
	Pour laminage et forgeage	G-M2, G-A6Z1	Idem

1.6.9.4. Les laitons

Catégorie	Désignation	Composition	Etat	R	A %	Emplois
Laiton en Barre	Cu-Zn 10	Zn : 10 %	X 601	32	20	Barres pour décolletage. Fils, tôles et tubes pour usage généraux.
	Cu-Zn 36	Zn : 36 %	X 601	35	32	Barres pour décolletage. Fils. Profilés. Tôles et tubes.
	Cu-Zn 40	Zn : 40 %	X 601 X 300 ou 500	39 38	20 22	Barres pour forgeage. Tôles et fils. ... / ...
Catégorie	Désignation	Composition	Etat	R	A %	Emplois
Laiton en barre (suite)	Cu-Zn40 Mn Ni Al	Zn : 40 %	X 601 X 300 ou 500	58 55	10 -	Laiton à haute résistance. Résistance à la corrosion marine.
Laiton au plomb	Cu-Zn36 Pb2	Zn : 35 à 38 % Pb : 1,5 à 2,25 %				Barres et fils pour frappe à froid.
	Cu-Zn36 Pb3	Zn : 32 à 37 % Pb : 2,5 à 3,7 %		32 à 45	6 à 18	Barres et profilés pour décolletage.
	Cu-Zn39 Pb1	Zn : 37 à 41 % Pb : 1 à 2 %				Barres et profilés pour matriçage.
	Cu-Zn39 Pb2	Zn : 36 à 40 % Pb : 1,5 à 3 %		36 à 50	4 à 15	Barres et profilés pour décolletage.

	Cu-Zn41 Pb2 Al	Zn : 38 à 43 % Pb : 1 à 3 % Al : 0,2 à 1 %		45	10	Profilés complexes filés.
--	----------------	--	--	----	----	---------------------------

1.6.9.5. Les bronzes

Désignation	Composition	Etat	R	A %	Dureté	Emplois
Elaboration : Bronzes laminés						
Cu-Sn 3 Zn 9	Sn : 2 à 4 % Zn : 7,5 à 10 %	Recuit	31	40	HV : 80 à 110	Bronzes chrysocales pour usages mécaniques : boulonnerie, visserie, etc.
		Ecroui	48 à 62	15 à 5	HV : 140 à 200	
		Ressort	67	3	HV ≥ 210	
Cu-Sn 5 Zn 4	Sn : 3 à 5 % Zn : 3 à 5 %	Recuit	32	40	HV : 80 à 110	
		Ecroui	40 à 60	20 à 5	HV : 140 à 215	
		Ressort	67	3	HV ≥ 200	
Cu-Sn 5 P	Sn : 3,5 à 6,5 % P : 0 à 0,33 %	Recuit	30	50	HV : 80 à 110	Ressorts. Alliages magnétiques pour frettage de bobines. Coussinets
		Ecroui	43 à 60	26 à 5	HV : 140 à 190	
		Ressort	70	2	HV ≥ 200	
Cu-Sn 9 P	Sn : 7,5 à 10 % P : 0 à 0,35 %	Recuit	35	50	HV : 85 à 120	
		Ecroui	54 à 73	15 à 5	HV : 165 à 205	
		Ressort	78	2	HV ≥ 200	
Elaboration : Bronzes moulés						
Cu-Sn Pb Zn	Sn ≥ 4,5 %, Zn : 3 à 7 % Pb : 3 à 7 %		-	-	-	Robinetterie. Pièces d'usage courant.
Cu-Sn 5 Pb 5 Zn 5	Sn : 4 à 6 %, Zn : 4 à 6 % Pb : 5 à 6 %		20	10	-	

Cu-Sn 7 Zn 5 Pb 4	Sn : 6,5 à 8 %, Zn: 4 à 7% Pb : 4 à 4,8 %	21	10	-	
Cu-Sn 8 Zn 5	Sn : 7 à 10 % Zn : 1 à 4 %	22	16		Coussinets. Matériel de chemin de fer.
Cu-Sn 10 Zn 1	Sn : 8,5 à 10 % Zn : 0 à 2 %	25	13		Robinetterie sous pression.
Cu-Sn 12 Zn 1	Sn : 10,5 à 12,5 % Zn : 0 à 2 %	23	7	HB : 80	Pièces frottantes, fortes pressions et chocs.
Cu-Sn 12 P	Sn : 10,5 à 12,5 %, Zn : 0 à 2%, P > 0,1 %	20	4	HB : 80	Pièces d'usure.
Cu-Sn 14	Sn:12,5 à 14,5%,	-	-	HB : 100	Forte pression sans chocs
Cu-Sn 16	Sn : 14,5 à 17 %	-	-	-	Ecrasement sans chocs.
Cu-Sn 18	Sn : 17 à 19 %	-	-	-	Grande dureté et limite élastique élevée.

1.6.9.6. Les maillechorts et les cupro-aluminiums

Désignation	Usages	Nuances	Propriétés et emplois
Maillechort Cu + Zn + Ni	En barre pour décolletage	Cu-Zn 26 Ni 9 Pb 1 Cu-Zn 20 Ni 15 Pb 1	Alliage inaltérable. Emplois en orfèvrerie, appareils de physique, ressorts, résistances électriques, décoration, pièces de monnaie, visserie et boulonnerie inaltérables (arcap).
	En barres pour forgeage	Cu-Zn 45 Ni 9, Cu-Zn 45 Ni 15	
	En tôles, bandes, disques	Cu-Zn 28 Ni 9 Cu-Zn 22 Ni 15	
	Pour moulage	Cu-Zn Ni 13, Cu-Zn Ni 18, Cu-Zn Ni 22	
Cupro-aluminium (Bronze d'Al) Cu + Al	Pour moulage en sable	Cu-Al 9 Fe 3, Cu-Al 11 Fe 3 Cu-Al 9 Ni 3 Fe	Grande résistance à l'oxydation, aux agents chimique, à l'eau de mer.
	Pour moulage en coquilles	Cu-Al 9, Cu-Al 9 Fe 3 Cu-Al 9 Ni 3 Fe	Moulage facile. Emplois : soupapes, coussinets,

	En tôles, bandes, disques	Cu-Al 6 Cu-Al 8	engrenages, etc., pièces de monnaie.
--	---------------------------	--------------------	--------------------------------------

1.7. Le magnésium et ses alliages

Le magnésium est un métal alcalino-terreux de couleur gris-blanc, très répandu dans l'écorce terrestre (2 % en masse). On le trouve à l'état naturel en grande quantités sous forme de carbonate de magnésium tels que :

- Magnésite : $MgCO_3$
- Dolomite : $MgCO_3.CaCO_3$.

Le magnésium n'est pas élaboré par la méthode de réduction, à cause de sa grande affinité pour l'oxygène. La réduction du magnésium ne peut s'effectuer qu'à la température d'ébullition, c'est à dire, sous forme d'état de vapeur. A cet effet, le magnésium est produit par le procédé électrolytique.

Les nouvelles introductions de procédés thermiques, comme le procédé silico-thermique (Italie 1938) et le procédé carbo-thermique ainsi que l'élaboration du magnésium à partir de l'eau de mer comme matière première pour l'électrolyse (U.S.A 1939), sont une base pour la production économique du magnésium. Les dépenses énergétiques, pour l'élaboration d'une tonne de magnésium sont estimées à 20 MWh.

Propriétés physiques du magnésium :

- Numéro atomique : 12
- Masse atomique : 24,3
- Température de fusion : $650^{\circ}C$
- Température d'ébullition : $1097^{\circ}C$.
- Masse volumique : $1,74 \text{ g/cm}^3$
- Chaleur massique : 1030 J/Kg.K
- Coefficient de dilatation : $(20 \text{ à } 300)^{\circ}C : 27,6.10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- Conductibilité thermique ($20^{\circ}C$) : 146 W/m.k
- Résistivité électrique ($20^{\circ}C$) : $4,45 \mu.\Omega.cm$.

C'est le plus léger de tous les métaux, stable, susceptible d'un emploi industriel, donc l'intérêt particulier qu'il présente est sa faible densité.

Le magnésium a un réseau hexagonal compact avec :

$$a = 3,20 \text{ \AA}, c = 5,20 \text{ \AA} \text{ et } c/A = 1,6235.$$

Dans les conditions atmosphériques, la tenue à la corrosion est assez bonne, mais le magnésium est instable dans l'eau douce et l'eau de mer. C'est un métal facilement inflammable à l'air, il est utilisé dans la technique de la photo comme lumière éclair et dans la pyrotechnie comme corps de feu d'artifice.

Le travail du magnésium présente beaucoup de difficultés, car il possède à l'état chaud, une grande capacité de réaction avec l'oxygène. Il a été surtout utilisé, durant la deuxième guerre mondiale, en grande quantité dans les bombes inflammantes pour l'élimination des populations civiles. Le magnésium pur, est peu utilisé dans l'industrie à cause de ses propriétés de résistance, mais il est utilisé sous forme d'alliages, par l'addition de l'Al, Cu, Zn et Zr.

Caractéristiques mécaniques des différents états du magnésium :

Bien que la résistance mécanique soit assez bonne, les propriétés élastiques sont trop faibles pour permettre l'emploi de ce métal.

Etat	Rm (MPa)	Re (MPa)	E (MPa)	HB	A (%)	v
Recuit	170	60	47 000	35	18	0,33
Coulé	115	25	47 000	30	8	0,33
Corroyé	200	90	47 000	40	11,5	0,33

1.7.1. Alliages de magnésium

Les propriétés du magnésium peuvent être sensiblement améliorées par les additions de zinc, d'aluminium, de manganèse et de zirconium. Les alliages de magnésium sont caractérisés par leur faible densité et leur haute résistance. Le plus souvent, on emploie les alliages de magnésium avec l'aluminium (jusqu'à 10 %), le zinc (5 à 6)%, le manganèse (jusqu'à 2,5 %) et le zirconium (jusqu'à 1,5%).

Le tableau, ci-dessous, représente la composition et les propriétés de certains alliages de magnésium.

Désignation	Composition en %			$\sigma_{0,02}$ (Kp/mm ²)	R (Kp/mm ²)	A (%)
	Al	Zn	Mn			
G-Mg Al16 Zn3	5,5 à 6,3	2,5 à 3,3	0,1 à 0,5	8 à 12	16 à 22	3 à 9
G-Mg Al19 Zn	8,0 à 9,0	0,1 à 0,8	0,1 à 0,5	14 à 19	23 à 30	7 à 15
G-Mg Mn2	-	-	1,5 à 2,0	1 à 1,4	7 à 13	3 à 9

Mg Al3 Zn1	2,5 à 3,5	0,5 à 1,1	0,1 à 0,3	16 à 23	24 à 30	10 à 21
Mg Al8 Zn	7,5 à 9,0	0,3 à 0,6	0,1 à 0,3	18 à 27	29 à 35	8 à 17
Mg Mn2	< 0,3	< 0,3	1,4 à 2,3	14 à 25	21 à 31	1 à 11

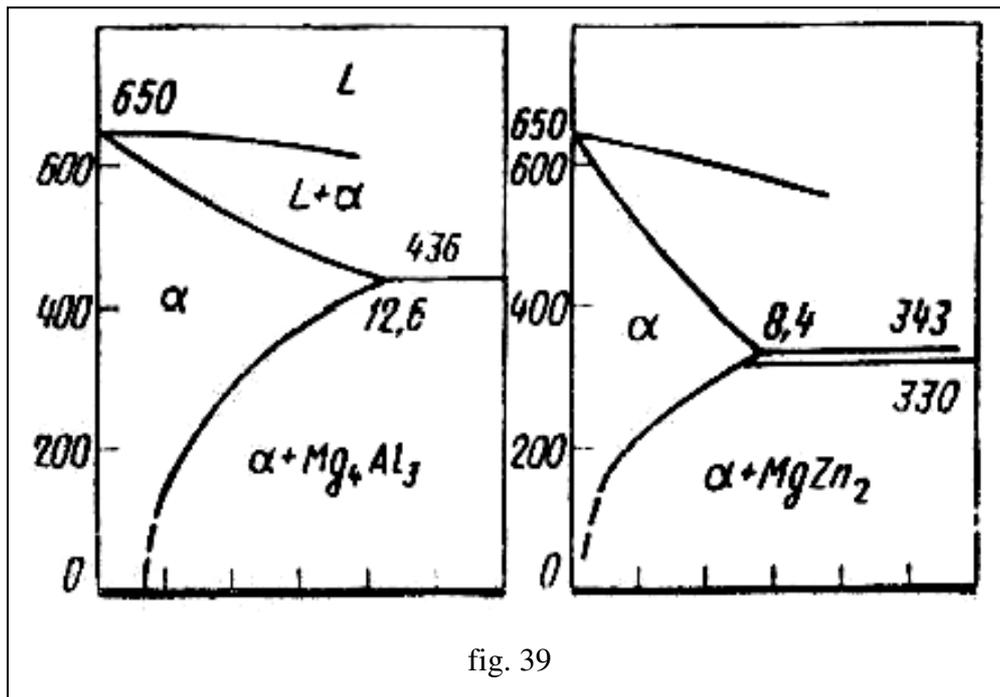
L'aluminium augmente la coulabilité, le zinc augmente la résistance et le manganèse améliore la tenue à la corrosion. Le silicium le cuivre et le fer, comme impuretés, le plus souvent, diminuent la tenue à la corrosion. Le zirconium rend la structure plus fine, seulement dans les alliages ne contenant pas d'aluminium ou de zinc. Les alliages de magnésium sont employés en fonction des caractéristiques particulières suivantes :

- Faible masse volumique (densité).
- Conductibilité thermique élevée, qui permet des échanges thermiques élevés (carters de moteurs, moules d'injection de matières plastiques).
- Capacité d'amortissement élevée, d'où une bonne résistance aux chocs et une diminution du bruit.
- Meilleure usinabilité par rapport aux alliages métalliques.
- Grande stabilité dimensionnelle.

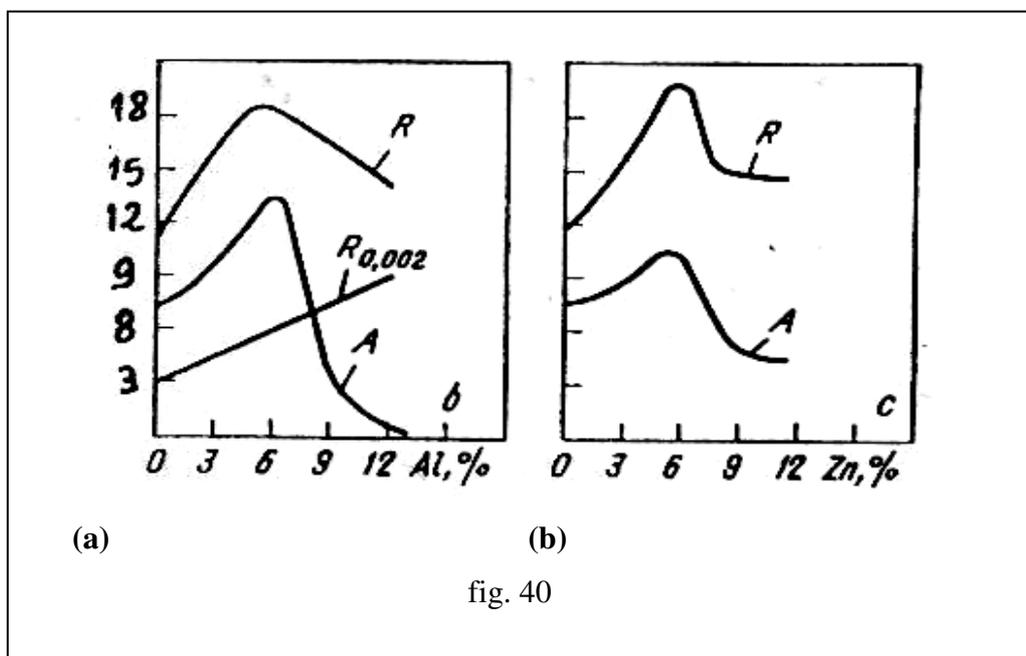
On distingue essentiellement deux catégories d'alliages de magnésium : les alliages de fonderie et les alliages corroyés. Le tableau, ci-dessous, représente les différents types d'alliages de magnésium avec leurs compositions chimiques et propriétés mécaniques.

Nuance	Composition chimique des éléments en %				Propriétés mécaniques		
	Al	Zn	Mn	Autres	R	R 0,002	A
					(Kgp/mm ²)		(%)
Alliages de fonderie							
MJI 5	7,5 à 9,0	0,2 à 0,8	0,15 à 0,5	-	16 (25)	9,5 (12)	3 (4)
MJI 6	9,0 à 10,2	0,6 à 1,2	0,1 à 0,5	-	16 (26)	11 (15)	1,5 (1)
MJI 10	-	0,1 à 0,7	-	Zr : 0,4 à 1,0 Nd : 2,2 à 2,8	(22)	(12,5)	(3,5)
MJI 12	-	4,0 à 5,0	-	Zr : 0,6 à 1,1	(27)	(18)	(6)
Alliages de corroyage							
MA1	-	-	1,3 à 2,5	-	21	12	8
MA2-1	3,8 à 5,0	0,8 à 1,5	0,3 à 0,7	-	28	20	12
MA14 (BMБ5-1)	-	0,5 à 0,6	-	Zr : 0,3 à 0,9	(33,5)	(28)	(9)
BM Д-1	-	-	1,2 à 2,0	Th : 2,5 à 3,5	30	25	5

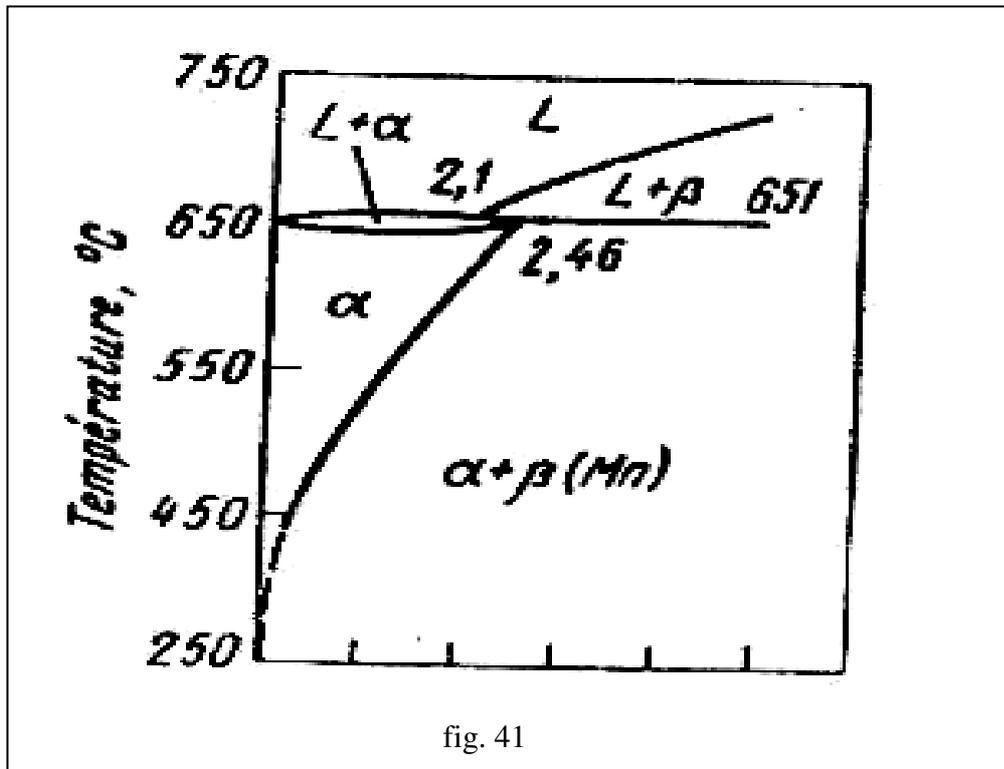
L'aluminium et le zinc forment avec le magnésium des solutions solides et des combinaisons telles que Mg_4Al_3 et $MgZn_2$, comme le montrent les figures 39.



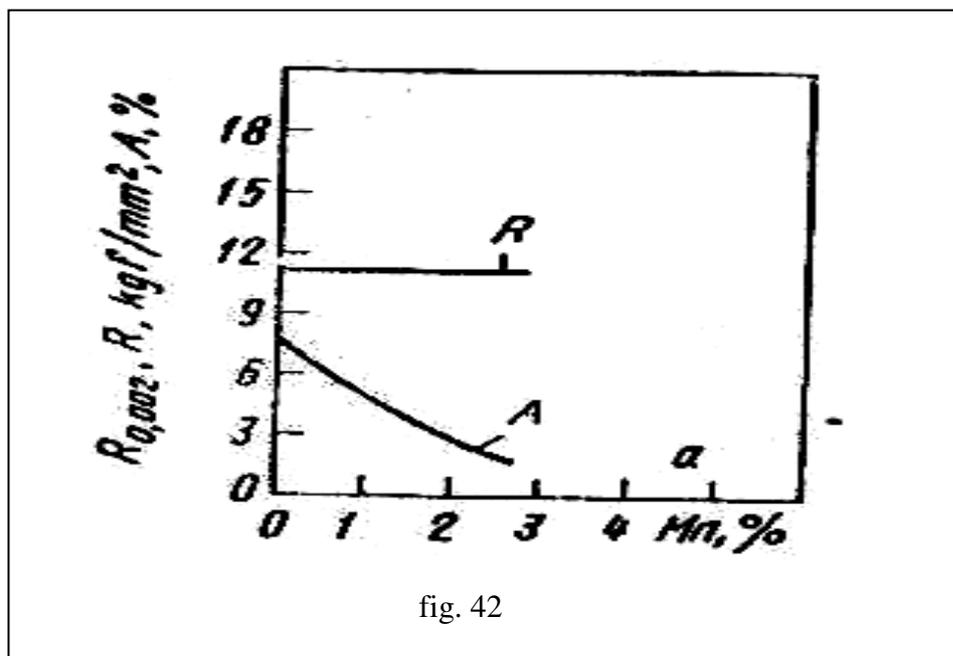
Lorsque les taux d'aluminium et de zinc atteignent 6 ou 7 %, les propriétés mécaniques du magnésium augmentent (fig.40 a et b).



Le manganèse forme avec le magnésium une solution solide α . L'abaissement de la température diminue la solubilité du manganèse dans le magnésium et la solution solide α dégage la phase β , (fig. 41).



Sans améliorer les propriétés mécaniques, (fig.42), le manganèse augmente la résistance à la corrosion et la soudabilité des alliages de magnésium.



L'augmentation de la tenue à la corrosion est due à la formation d'une pellicule protectrice de l'oxyde hydraté Mn-Mg et à l'élimination du fer.

Le zirconium introduit dans les alliages de magnésium avec le zinc, affine le grain, améliore les propriétés mécaniques et augmente la tenue à la corrosion. Les rares métaux terreux et le thorium élèvent la résistance à chaud.

Une teneur de 0,005 à 0,012 % de béryllium diminue sensiblement l'oxydabilité du magnésium pendant la coulée, le moulage et le traitement thermique. Pour éliminer la ségrégation des éléments d'alliages, on effectue aux alliages de magnésium, soit en lingots ou moulés, un recuit d'homogénéisation de 400 à 420°C, pendant 15 à 30 h. Durant un tel recuit, les phases précipitées aux joints de grains se dissolvent et la composition suivant le volume des grains, est uniformisée, ce qui rend facile le corroyage et améliore les propriétés mécaniques.

Pour éliminer l'érouissage, les alliages de magnésium sont soumis au recuit de recristallisation à une température de 350°C, plusieurs alliages de magnésium peuvent être durcis par trempe et vieillissement. Les propriétés des alliages de magnésium changent moins, sous l'effet de vieillissement, que celles des alliages d'aluminium. Au cours du vieillissement, la résistance des alliages de magnésium ne peut être augmentée que de 20 à 35 %. Dans ces conditions, la plasticité de l'alliage diminue. C'est pourquoi, il arrive souvent qu'on n'applique que l'homogénéisation qui améliore les propriétés mécaniques des alliages.

1.7.2. Alliages de magnésium de fonderie

Les alliages du système Mg-Al-Zn, possèdent une structure se composant de solution solide et des précipitations de la phase γ (Mg_4Al_3). Le plus usité de ce groupe est l'alliage MJ15 qui cumule les hautes propriétés mécaniques et les propriétés de fonderie. Il s'emploie pour le moulage en sable, en coquille et sous pression des pièces de grands encombrements et charges tels que carters de moteurs, boîtes de vitesses, pompes à huile, etc. L'alliage MJ16 est très employé pour la fabrication des pièces sollicitées par de grandes charges, à cause de ses bonnes propriétés de fonderie.

Les propriétés mécaniques de ces alliages peuvent être élevées par homogénéisation à 420°C pendant 12 à 24 h au chauffage. Les particules des phases excédentaires se dissolvent et le refroidissement à l'air fixe une solution solide homogène. Le vieillissement à des températures de 175 à 190°C pendant 4 à 8 h, leur donne une grande valeur de la charge de rupture et de la limite d'élasticité.

L'alliage MJ10 est un alliage résistant à chaud, il est très utilisé dans le moulage des pièces travaillant aux températures allant jusqu'à 300°C. La résistance à chaud est obtenue grâce à la formation d'une solution solide de néodyme et de zirconium dans le magnésium et le dépôt de particules Mg_9Nd . L'alliage MJ12 a pour élément principal le zinc. Le zirconium est additionné à l'alliage à titre d'inoculant pour affiner le grain.

Il est employé pour le moulage des pièces imposant une herméticité rigoureuse et une haute résistance dans les conditions de chocs. Lors de l'élaboration et du moulage des alliages de magnésium, on prend des mesures spéciales pour prévenir l'inflammation.

- La fusion est effectuée dans des creusets de fer sous flux.
- Pendant la coulée, le jet de métal est saupoudré de soufre qui empêche le métal de prendre feu.
- Pour affaiblir l'oxydation, on ajoute au sable de moulage des additions spéciales (exemple : les fluorures d'aluminium).
- Pour obtenir un métal de qualité, on le soumet à une forte surchauffe.

1.7.3. Alliages de magnésium de corroyage

Leur élaboration s'effectue sous forme de barres, plats, profilés laminés à chaud, ainsi que des pièces de forme et d'estampage. Les alliages de magnésium ont un réseau hexagonal et sont donc peu plastiques aux basses températures, car le glissement ne se produit que suivant les plans (0001). Au chauffage, apparaissent des plans de glissement supplémentaires (1011) et (1120) et la plasticité s'accroît, c'est pourquoi le corroyage se fait à des températures élevées. L'alliage MAI possède une plasticité élevée, une bonne soudabilité et une bonne tenue à la corrosion mais de faible résistance. L'introduction de 0,2 % de cérium (Ce), affine le grain et améliore les propriétés mécaniques et le corroyage à froid. L'alliage MA2-1 possède des propriétés mécaniques élevées, une bonne plasticité et une bonne soudabilité, il est susceptible de corrosion sous tension. Il se prête à toutes les modalités d'estampage et son laminage ne présente pas de difficultés. L'alliage MA14 se distingue par des propriétés mécaniques accrues, résiste à chaud et résiste à la corrosion sous tension. Parmi les inconvénients que présente cet alliage, il y a son aptitude à la fissuration au laminage à chaud et sa mauvaise soudabilité. L'alliage BMAI, additionné de thorium, est un alliage résistant à chaud. Il est prévu pour le service de longue durée, aux températures allant jusqu'à 350°C, cet alliage se prête bien au filage, au soudage et n'est pas susceptible de corrosion sous tension. Les alliages de magnésium, grâce à leur résistance élevée, sont largement utilisés dans la construction aéronautique, (roues et fourchettes de châssis, bords d'attaque de l'aile, leviers de toute sorte, boîtiers des appareils, verrières et portes de cabines), dans la technique des fusées, (corps des fusées, carénages avant, réservoir de combustible et d'oxygène, stabilisateur), dans la construction des automobiles, (carters de moteurs, boîtes de vitesses), dans l'électrotechnique et la radiotechnique, (corps des appareils, des téléviseurs) et dans l'industrie du textile (bobines, canettes). La propriété du magnésium d'absorber les neutrons

thermiques et ne pas interagir avec l'uranium fait que ces alliages s'emploient dans la fabrication des gaines des cartouches des piles atomiques. Pour parer à la faible tenue à la corrosion des alliages de magnésium, ils sont soumis à l'oxydation et la surface oxydée est ensuite couverte de vernis.

1.8. Le zinc et ses alliages

Le zinc est un métal blanc bleuâtre extrait de la blinde de zinc (ZnS), du carbonate de zinc (ZnCO₃) etc. Il représente 0,01 % en masse dans l'écorce terrestre. Il cristallise dans le système hexagonal et il est caractérisé par le fait que la grosseur du grain est proportionnelle à la pureté et à la température. Les principales caractéristiques du zinc sont :

- Numéro atomique : 30.
- Masse atomique : 65.
- Température de fusion : 419°C.
- Température d'ébullition : 906°C.
- Masse volumique : 7,13 g/cm³.
- Coefficient de dilatation : 29.10⁻⁶ K⁻¹.
- Conductibilité thermique (20°C) : 113 W/m.k.
- Résistivité électrique (20°C) : 5,91 μ.Ω.cm.
- Chaleur massique (20°C) . 382 J/kg.k.

Le zinc est obtenu soit par la voie sèche par réduction de l'oxyde de zinc avec le carbone ou par voie humide par électrolyse. Le zinc est surtout utilisé pour la protection des surfaces des pièces d'aciers (zingage, galvanisation). Les impuretés principales qui rentrent dans la composition du zinc sont : le plomb, le cadmium, le fer, l'étain et le cuivre. Voir le tableau ci-dessous, relevant les compositions chimiques du zinc. Quant à la teneur des impuretés, elle doit être très limitée.

Désignation	Eléments étrangers en %				
	Pb	Cd	Sn	Fe	Cu
Zn 99,995	0,003	0,002	0,001	0,002	0,001
Zn 99,99	0,005	0,003	0,001	0,003	0,001
Zn 99,975	0,015	0,005	0,001	0,007	0,001
Zn 99,95	0,02	0,014	0,001	0,015	0,002
Zn99,9	0,05	0,02	0,002	0,04	0,002
Zn 98,7	1,2	0,20	0,005	0,05	0,005
Zn 98,5	1,4	0,20	0,005	0,05	0,020

Zn 97,5	2,3	0,20	0,11	0,10	0,05
U-Zn 96,0	1,8	0,3	1,0	0,4	0,5

L'utilisation du zinc est essentiellement basée sur :

- Sa résistance à la corrosion atmosphérique, car le zinc se recouvre d'une couche protectrice de carbonate basique, d'où son emploi dans les toitures, les couvertures, etc.
- Ses propriétés électrochimiques qui permettent au zinc d'assurer la protection des métaux sur lesquels il est déposé (galvanisation, zingage).

Le zinc est malléable est peu résistant ($R_m = 100$ à 200 N/mm^2), mais les propriétés mécaniques sont améliorées par de faible addition en cuivre (0,5 %) et de titane (0,1 %). Ces derniers augmentent le durcissement en formant des solutions solides et en affinant les grains.

- $R_m > 170 \text{ N/mm}^2$
- $Re > 110 \text{ N/mm}^2$
- $A = 50 \%$
- $E = 93\,000 \text{ N/mm}^2$

Les propriétés mécaniques du zinc et de ses alliages se dégradent à partir de 100°C à cause du phénomène de fluage.

1.8.1. Les alliages de zinc

Contrairement au zinc pur, tous les alliages de zinc sont des alliages de fonderie (en particulier la fonderie sous pression). Ce sont principalement des alliages Zn-Al avec des additions de cuivre et de magnésium.

- L'aluminium améliore la coulabilité et les propriétés mécaniques. Cependant la résilience devient très faible vers 5 % .d'Al.
- Le cuivre améliore la dureté et la charge à la rupture mais sa teneur reste en général limitée à 1 % à cause du phénomène du durcissement structural qui provoque des variations dimensionnelles.
- Le magnésium, inférieur à 0,06 % joue un rôle durcissant, mais diminue la coulabilité.
- Le plomb, le cadmium et l'étain sont des impuretés néfastes pour la résistance à la corrosion. La figure 43 représente le diagramme d'équilibre Zn-Al.

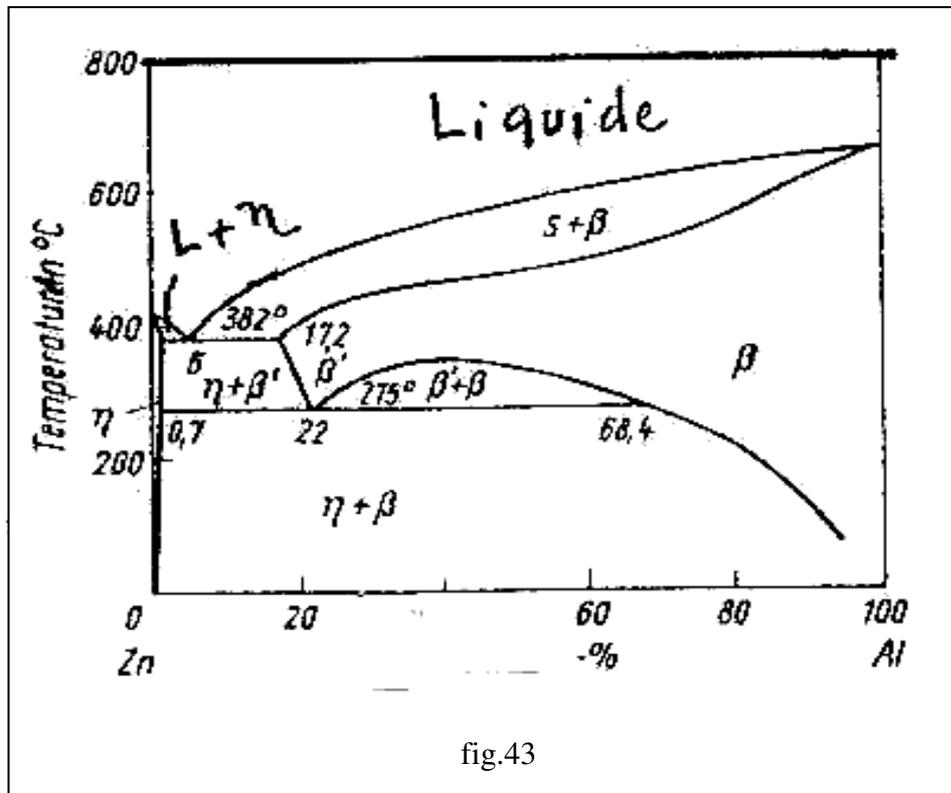


fig.43

Le diagramme (fig. 94) comporte :

- Une solution solide η (0,05 % à 20°C et 1,15 % à 382°C).
- Un point eutectique à 382°C.
- Un point monotectoïde à 275°C et 22 % Al

Après solidification d'un alliage à 4 % Al, on a une structure se composant des phases η et β' (22% Al) avec le réseau cubique à faces centrées. Avec la diminution de la température, diminue la solubilité de l'aluminium dans la phase η et au dessus de 275°C, la phase β' se décompose eutectoïdiquement en cristaux η et cristaux pauvres en zinc β . Avec cette décomposition, il y a changement du volume (transformation \rightarrow influence sur la stabilité dimensionnelle), variation de la conductibilité électrique et densité. La variation dimensionnelle peut aller jusqu'à 0,08 %.

Dans les alliages ZnAlCu où la présence d'une troisième phase, la phase T ($\approx 55\%$ Cu, $\approx 30\%$ Al et $\approx 15\%$ Zn), pour laquelle, on a une augmentation du volume.

Les différents types d'alliages de zinc sont désignés sur le tableau suivant.

Nuances	Al (%)	Cu (%)	Mg (%)	Autres (%)	Rm (MPa)	A (%)	HB
Z-A4G	4,0	0,05	0,05	Fe < 0,10 Pb < 0,005	280	5	-
Z-A4U1G	4,0	1,0	0,05	Cd < 0,005 Sn < 0,002	340	4	-
Z-A4U3G	4,0	3,0	0,05	-	230	1,5	110
Z-A4U3G2	4,0	3,0	2	-	190	0,5	150
Z-A12U1G	12,0	1,0	0,02	-	350	4	-

Alliages de zinc à 4 % Al :

La norme définit deux types d'alliages Z-A4G (zamak 3) et Z-A4U1G (zamak 5). La basse température de coulée, permet la réalisation de pièces de grande précision par fonderie sous pression.

Alliages de zinc à 4 % Al et 3 % Cu :

Ces alliages (kayeaux), sont dérivés de l'alliage Z-A4U1G, ils ont de bonnes propriétés de fonderie mais également une dureté et une résistance à l'usure beaucoup plus grande.

Leur emploi est destiné à la réalisation par fonderie, d'outillages complexes de presses, de matrice, de poinçons, ou de moules pour l'industrie des matières plastiques.

Alliages de zinc à 12 % Al :

Ces alliages (ILZR012) ont une excellente coulabilité et sont insensibles à la vitesse de refroidissement, ce qui permet de les mouler suivant tous les procédés, en particulier, en sable.

Ils sont utilisés pour la fabrication des pièces prototypes ou de petites séries.

Alliages de zinc à 35 % Al :

Ce sont des alliages contenant 2,5 à 5 % de cuivre, utilisés dans des organes de frottements. Leur structure dendritique fine permet de refaire un film d'huile en surface.

Les sulfures de zinc et l'oxyde de zinc font partie des substances luminescentes, c'est à dire des substances capables d'émettre, à froid, de la lumière sous l'action d'une énergie radiante ou celle d'un flux d'électrons. Ce phénomène trouve de nombreuses applications tels que l'analyse par

luminescence, la lampe lumineuse d'éclairage, les écrous luminescent pour tubes cathodiques, etc.

L'analyse par luminescence est une technique très sensible, qui est appliquée en contrôle non destructif, elle permet entre autres :

- De déceler les différences entre les objets apparemment identiques.
- De mettre en évidence les défauts microscopiques dans les pièces métalliques.
- De prospecter les gisements de pétrole, de bitumes et les minerais d'uranium.
- De déterminer la nature des taches en criminologie et l'authenticité des documents.

2.CORROSION

2.1. Introduction

La corrosion, du latin ‘corrodere’, signifie ronger, attaquer. C'est une destruction non voulue des métaux sous l'action de milieux corrosifs (agents atmosphériques ou réactifs chimiques). Après attaque, les métaux ont tendance à retourner à leur état primitif d'oxyde, sulfure, carbonate etc., plus stable par rapport au milieu considéré et ainsi à subir une détérioration de leurs propriétés.

En service les matériaux métalliques sont souvent en contact avec un milieu agressif liquide ou gazeux, donc le phénomène de corrosion est un problème de surface ou plus précisément d'interface entre un métal et un milieu agressif liquide ou gazeux ; comme il a été déjà mentionné ci-dessus le processus de la corrosion entraîne une destruction des matériaux métalliques. Ce phénomène a pris de nos jours une importance considérable, étant donné l'utilisation de plus en plus grande des métaux et alliages dans la vie moderne.

Les métaux se distinguent des autres matériaux par un ensemble de propriétés avantageuses tels que bonne ductilité, résistance élevée à la traction, résistance aux hautes températures, bonne conductibilité électrique et thermique, grande facilité de mise en oeuvre etc. Leurs inconvénients est leur instabilité au contact de l'air et de l'eau ce qui diminue leur résistance à la corrosion et à l'usure, c'est à dire leur durabilité. Mais pour mieux remplir leur fonction pendant la durée de vie prévue on emploie des techniques de protection adéquates contre la corrosion. L'emploi de nouveaux matériaux résistant à la corrosion ont fait l'objet d'un grand nombre de recherche ces dernières années.

Au point de vue économique la corrosion est d'une importance primordiale. On estime par exemple que chaque année le quart de la production d'acier est détruit par la corrosion, ce qui correspond environ à 150 millions de tonnes/an ou encore 5 tonnes/seconde. Ces pertes pouvaient être supérieures s'il n'y avait pas la protection contre la corrosion.

Le remplacement des équipements et matériel corrodés constitue pour l'industrie une charge financière très élevée à laquelle il faut ajouter le manque à gagner correspondant à l'arrêt des installations nécessaires pour effectuer les réparations.

Les coûts annuels imputables à la corrosion et à ses conséquences s'élèvent à plusieurs milliards de dollars par an dans la plupart des pays industrialisés. Aux Etats-Unis, les pertes occasionnées par la corrosion sont évaluées à plus de 7 milliards de dollars.

La corrosion ne se limite pas à l'acier, mais affecte tous les métaux ainsi que les polymères et céramiques et elle touche tous les domaines de l'économie du circuit intégré au pont en béton armé. L'évaluation des pertes dues à la corrosion doit prendre en considération

- Les pertes directes : remplacement des matériaux et équipements corrodés.
- Les pertes indirectes : réparation, pertes de production.
 - Les mesures de protection : utilisation de matériaux plus résistants à la corrosion et plus chers, de revêtement et de protection cathodique
- Les mesures de préventions surdimensionnement des structures porteuses inspection, entretien.

Les pertes directes ne représentent donc qu'une partie des coûts de la corrosion Elles sont souvent inférieures aux pertes indirectes.

Par exemple, si l'on doit arrêter une machine ou un équipement dont l'un des éléments constituant est corrodé, le prix de ce dernier est dérisoire par rapport aux pertes de gain dues au manque de production.

L'emploi des matériaux plastiques ou composites dans les différentes branches d'industrie ont trouvés une grande importance chez les utilisateurs, car ces matériaux résistent bien à la corrosion et n'exigent aucun revêtement de protection.

2.2. Différents processus de la corrosion

Les causes de la corrosion sont multiples et complexes et elles résultent d'interactions chimiques et /ou physiques entre le matériau et son environnement. La corrosion jusqu'à ce jour n'est pas complètement éclairée et cela est expliqué par les essais de laboratoire qui ne permettent pas de prévoir avec certitude le comportement d'un métal ou d'un alliage donné lorsqu'il exposé à la corrosion et de même il n'y a pas de métal résistant, d'une manière générale un métal résiste à la corrosion dans des conditions bien déterminées.

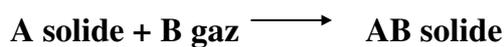
En général on peut résumer les différents processus de la corrosion comme ci-dessous :

- Corrosion chimique (sèche).
- Corrosion électrochimique (humide).
- Corrosion biochimique.
- Corrosion accompagnée d'érosion (mécanique).

2. 2.1. Corrosion chimique (sèche)

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase gazeuse. Le processus d'oxydoréduction de la corrosion chimique se déroule dans le domaine atomique avec le milieu ambiant sans présence d'électrolyte. Donc la corrosion purement chimique ne fait donc pas intervenir le passage d'un courant électrique, un flux électronique cesse, car l'échange d'électrons entre les différents partenaires de réactions s'effectue directement. L'air renferme l'oxygène, de la vapeur d'eau et des vapeurs acides (anhydride carbonique CO₂ et sulfureux SO₂, hydrogène sulfureux Sli₂ etc.) ce sont les agents corrosifs mais le plus souvent c'est le CO₂. On admet que la formation de la rouille est alors la résultante de l'action de tous ces corps, mais il faut qu'un acide soit présent, même en protection faible pour que l'attaque puisse se produire.

L'attaque du métal par une réaction chimique avec le milieu ambiant sans intervention du courant électrique nécessite généralement des températures élevées, la réaction qui se produit est de la forme :



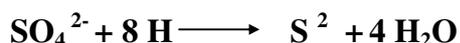
Il est très difficile de donner des exemples de corrosion purement chimique, puisque le plus souvent elle est accompagnée de corrosion électrochimique. On peut considérer comme corrosion chimique l'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un seul fondu ou par une solution aqueuse (Al dans Ccl₄) l'exemple de la corrosion sèche en atmosphère oxydante à haute température

2. 2.2. Corrosion biochimique

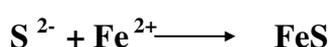
C'est l'attaque bactérienne des métaux en particulier dans les canalisations enterrées. Le mécanisme de ce mode de corrosion peut être de plusieurs types.

a. Chimique par production de substances corrosives telles que CO₂, H₂S, H₂SO₄, NH₃ ou d'un acide organique, le cas le plus répandu est celui rencontré dans les canalisations enterrées et déterminé par la formation d'acide sulfurique qui attaque le métal.

b. Certaines bactéries peuvent réduire les sulfates par l'intermédiaire d'hydrogène.



L'hydrogène provient par exemple des régions cathodiques, il y a donc dépolarisation des cathodes et formation accélérée de Fe²⁺ aux anodes.



c. Dans certains cas, on peut observer sur les canalisations des dépôts adhérents résultant de l'attaque, non pas du métal lui-même, mais celle de certains constituants du milieu ambiant par des bactéries. Il en résulte la formation de piqûres sur le métal, à l'endroit où s'est produit le dépôt, suivant un processus de corrosion par différence de concentration en oxygène.

2.2.3. Corrosion avec érosion, avec frottement et par cavitation

Dans ce cas les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et continu à la surface de métal. Ils ralentissent en général la vitesse de la corrosion. Cette couche peut être éliminée en certains points par abrasion du métal due au mouvement du liquide lui-même ou bien à celui des particules solides qu'il contient, il y a accélération de la corrosion. Il en est de même lorsque deux pièces se déplacent l'une par rapport à l'autre (frottement).

La corrosion par cavitation est due à la présence de bulles de vapeurs qui se forment dans une canalisation, ou au voisinage d'une pièce tournante lorsque par suite de l'augmentation locale de la vitesse du liquide où la pression statique devient inférieure à la tension de vapeur du liquide, il en résulte un violent martèlement de la surface métallique et une destruction locale du film de corrosion protecteur, la corrosion peut donc se développer à nouveau.

2.2.4. Corrosion électrochimique

C'est le phénomène de corrosion le plus important et elle se manifeste lorsque le réactif est un liquide ou lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal ou dans le réactif, présentant une dissymétrie de composition.

L'existence de ces hétérogénéités détermine la formation d'une pile, alors un courant électrique circule entre anodes et cathodes dans le réactif et les zones qui constituent les anodes sont attaquées (corrodées). Pour une corrosion électrochimique on a :



En général il n'existe pas un métal idéalement pur, il contient toujours des hétérogénéités physiques ou chimiques dont le potentiel de corrosion est en général différent de celui de la matrice. C'est à dire les métaux ne sont pas monophasés lorsqu'ils sont plongés dans le réactif.

Même pour un alliage, si ces éléments d'addition sont en solution solide, on ne peut pas les considérer comme parfaitement monophasés, car ils présentent toujours des inclusions. Oxydes, sulfures etc. ou bien des régions écrouis.

Donc les légères différences de propriétés chimiques ou physiques entre les différentes parties du métal déterminent une électrode composite (cellule électrochimique) qui contient

des micro-cathodes et des micro-anodes en court-circuit, c'est à dire formant des couples électriques (piles). Lorsqu'une électrode composite est plongée dans un électrolyte, ce qui est toujours réalisé, elle est donc le siège d'un phénomène de corrosion électrochimique et les anodes sont attaquées avec une vitesse qui dépend de l'intensité du courant débité par les piles locales.

Exemples d'électrodes composites :

Le fer contenant des inclusions de sulfure de fer, le fer représente la cathode de la pile, le potentiel de corrosion ainsi que le courant de corrosion seront élevés dans le cas où la teneur en sulfure de fer est grande et plus le potentiel de corrosion de l'électrode ne devient plus négatif. Le deuxième exemple est celui de l'acier laminé, recouvert d'une couche d'oxyde, en général, cette couche n'est pas parfaitement continue, si bien qu'en certains points l'acier est à nu, l'oxyde constitue la cathode de la pile d'acier et l'acier représente l'anode. Plus la surface d'acier exempte d'oxyde est grande et plus l'intensité du courant de corrosion est élevée. Si la surface des anodes est très petite, il est possible que localement la densité de courant soit très élevée et qu'ainsi une piqûre se développe rapidement en profondeur ; par contre si la surface des anodes est grande, bien que la quantité de métal attaqué soit élevée, la diminution de l'épaisseur de la pièce pourra être faible en chaque point. Dans le premier cas, le métal pourra être percé localement, alors que dans le second cas la corrosion, répartie sur une surface plus grande, permettra une utilisation plus longue de la pièce.

2.3. Les facteurs de la corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent de plusieurs facteurs qui peuvent être classés en quatre groupes principaux tels que les :

- facteurs définissant les modes d'attaque,
- facteurs métallurgiques,
- facteurs définissant les conditions d'emploi,
- facteurs dépendant du temps.

Tous ces facteurs sont représentés sur le tableau suivant :

— Facteurs de la corrosion.

<i>Facteurs définissant les modes d'attaque</i>	<i>Facteurs métallurgiques</i>	<i>Facteurs définissant les conditions d'emploi</i>	<i>Facteurs dépendant du temps</i>
<ul style="list-style-type: none"> — concentration du réactif — teneur en oxygène — pH du milieu — additions d'inhibiteurs — température — pression 	<ul style="list-style-type: none"> -- composition de l'alliage — procédé d'élaboration — impuretés — traitements thermiques — traitements mécaniques — additions protectrices 	<ul style="list-style-type: none"> — état de surface — forme des pièces — sollicitations mécaniques — emploi d'inhibiteurs — procédés d'assemblage 	<ul style="list-style-type: none"> — vieillissement — tensions mécaniques — température — modification des revêtements protecteurs

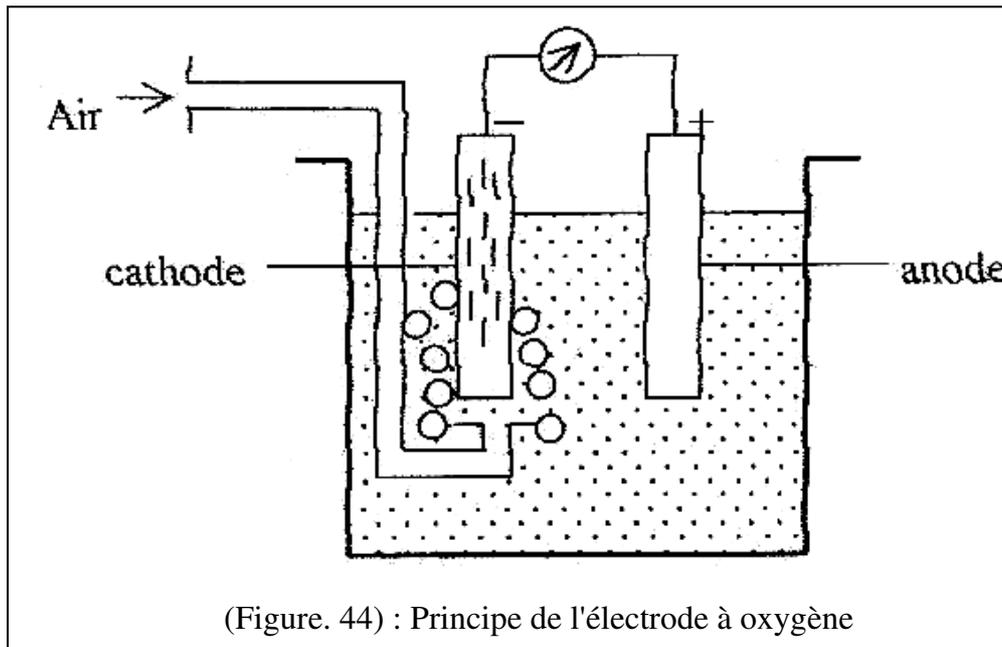
Dans le chapitre suivant nous allons insister sur quelques uns d'entre eux :

2. 3.1. Concentration du réactif et présence d'O₂, Ph

Le milieu corrodant dans lequel baigne le métal agit d'abord par sa nature même (acide, basique, salin) et aussi par la pression, concentration, pureté, température, viscosité, état de repos ou d'agitation. On ne peut pas savoir, à priori, si l'augmentation de la concentration d'un réactif favorise ou au contraire diminue la vitesse d'attaque d'un métal. Ainsi l'attaque du zinc est plus grande dans une solution aqueuse NaCl de titre N/10 que dans une solution de titre N/10.000, par contre le fer est attaqué dans une solution normale d'acide nitrique, alors qu'il ne l'est pas dans une solution 12N par suite de la passivation du métal. La concentration en oxygène dissous du milieu corrodant influence aussi sur le phénomène de corrosion, cela est expliqué par l'effet connu sous le nom « effet EVANS », dont l'attaque d'un métal par une goutte saline est plus importante au centre de la goutte où la teneur en oxygène est plus faible que sur les bords de la goutte où la teneur en oxygène dissous est plus grande. L'effet d'EVANS peut être aussi expliqué si on considère deux électrodes identiques d'un même métal

(Fer) plongées dans une solution de NaCl. Lorsqu'on met en court-circuit ces électrodes on constate qu'aucun courant ne circule en raison de la symétrie du système.

Lorsqu'on envoie un courant d'air sur l'une des électrodes, on constate que le système se transforme en pile dont l'électrode non aérée constitue l'anode et elle se corrode voir (fig. 44).



D'une manière générale, dans un milieu non uniformément aéré, ce sont les sites les moins aérés qui jouent le rôle d'anode, on peut montrer que dans la zone la plus oxygénée, il y a une réaction de réduction :

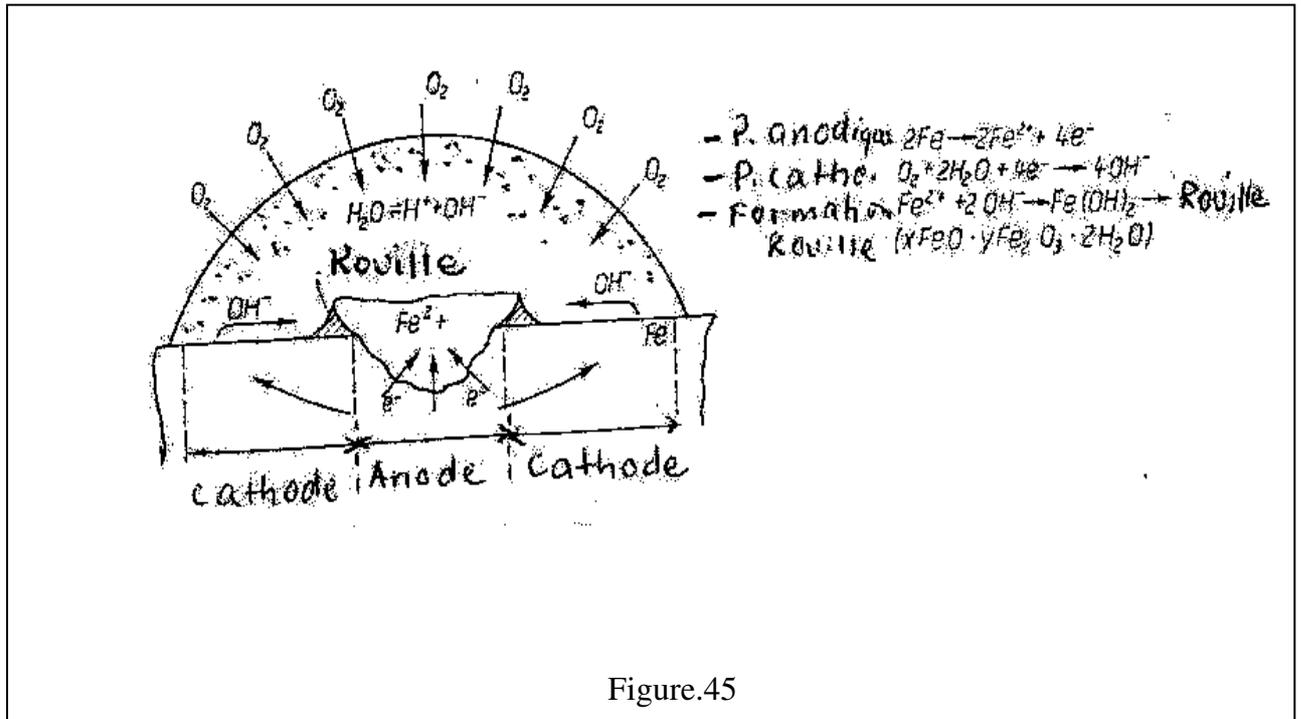


Alors que dans la zone la moins oxygénée, il y a une dissolution du métal :



L'effet d'oxygène (effet d'EVANS) expliqué par ces deux équations permet de comprendre l'expérience de la goutte d'EVANS qui caractérise le cas typique de la corrosion par piqûres.

L'expérience consiste à déposer sur une plaque de fer bien décapée, une goutte de solution aqueuse de NaCl à 3%. On admet que la zone du métal située à l'interface goutte-métal est localisée au centre de la goutte subit une attaque et s'entoure d'un anneau de rouille (fig. 45).



Dans cette expérience la zone attaquée représente l'anode et la périphérie en présence de l'électrolyte aéré représente la cathode.

2. 3.2. Diagramme potentiel - pH de Pourbaix

Les nombreuses réactions chimiques ou électrochimiques intervenant dans les phénomènes de corrosion dépendent du pH de la solution. Pourbaix a établi des diagrammes potentiel-pH qui délimitent différents domaines dans lesquels (fig. 46) :

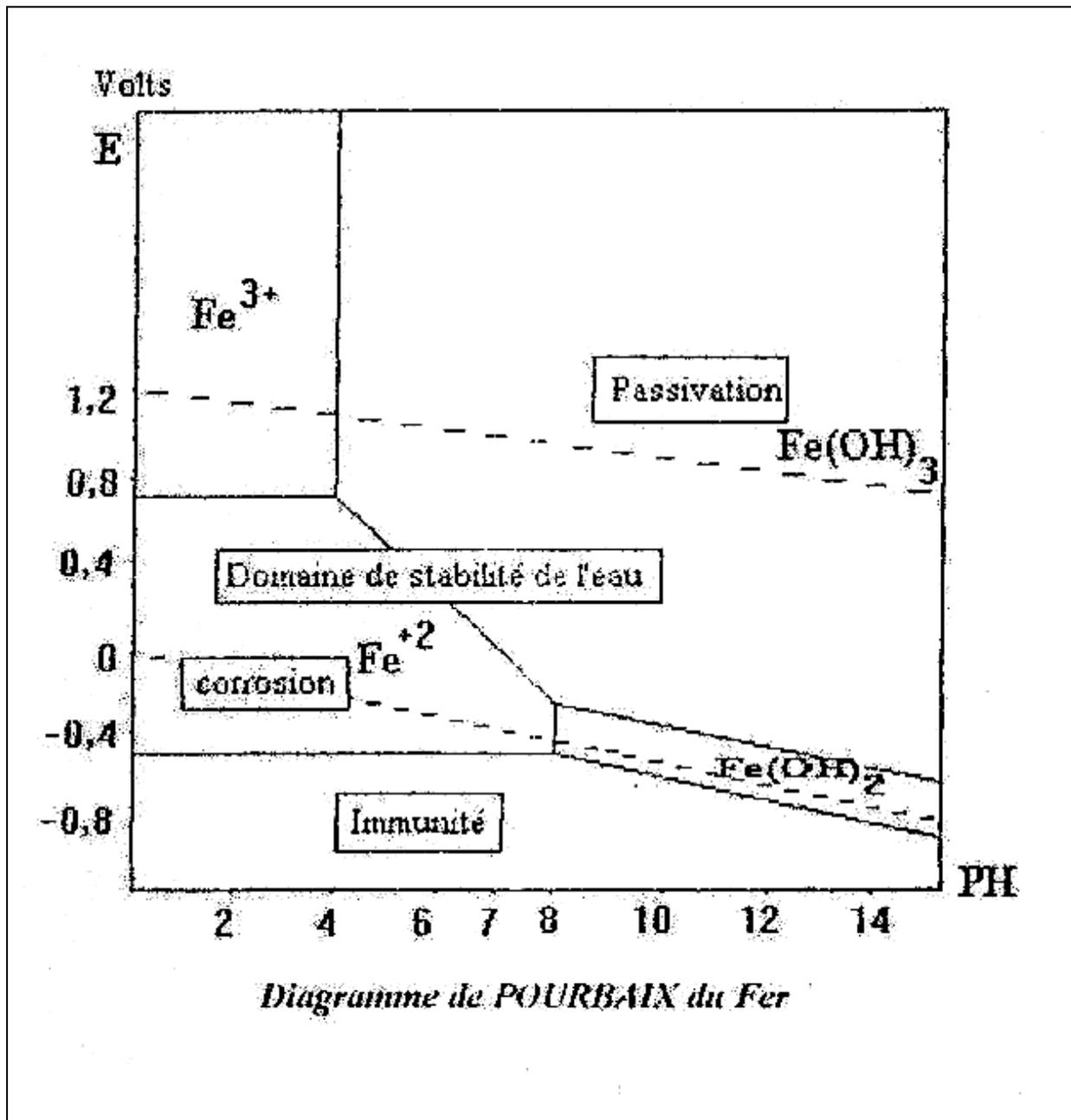


Figure.46

- **Corrosion** : le métal est corrodé, le produit de corrosion possède principalement une forme soluble.
- **Passivité** : le métal est susceptible de passiver. Le produit de corrosion est un solide insoluble susceptible de protéger le métal. La passivation du métal ne peut pas être observée si le produit solide de la corrosion n'isole pas parfaitement le métal du réactif.
- **Immunité** : le métal est stable vis-à-vis du réactif (aucune réaction n'est thermodynamiquement possible).

Pour utiliser avec profit ces diagrammes, on doit bien connaître les conditions dans lesquelles ils sont valables. Ces diagrammes sont établis par le calcul, à partir de données de la thermodynamique, ils font intervenir toutes les réactions auxquelles peuvent participer tous les composés susceptibles de se former. Ils sont établis à 25°C pour les corps supposés purs et ne sont donc pas applicables aux alliages. Le réactif est de l'eau pure. On admet que le métal est corrodable si la quantité qui peut être dissoute dans l'eau est au moins à 10^{-6} g/l (0,06 mg/l pour le fer).

Le pH indiqué en abscisse des diagrammes est celui qui existe au contact de la surface métallique. Etant donné leur nature thermodynamique, ces diagrammes ne font intervenir aucune considération de cinétique. Or les phénomènes de corrosion ne se développent que très rarement suivant un processus réversible. Ces diagrammes sont utilisés en particulier pour tout ce qui concerne la protection électrochimique du fer.

Le diagramme de Pourbaix représenté sur la figure 132 indique qu'au dessous de la droite a, l'eau se décompose avec un dégagement d'hydrogène, avec un dégagement d'oxygène au dessus de la droite b entre les droites a et b, l'eau est thermodynamiquement stable.

Dans ce diagramme on peut distinguer trois domaines :

- **Domaine de corrosion :** Les formes d'oxydation du métal sont des ions (Fe^{2+} , Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})_3$).
- **Domaine de passivité :** Eventuellement les formes d'oxydation du métal sont des oxydes (Fe_3O_4 , Fe_2O_3) qui peuvent être protecteurs.
- **Domaine d'immunité :** La forme stable est le métal plus précisément La concentration molaire volumique des ions en équilibre y est inférieure à une valeur déterminée

2.3.3. Influence de l'état de surface

L'état de surface des pièces joue un rôle très important sur le comportement du métal vis-à-vis de la corrosion, car la corrosion étant le résultat de l'action que développe à la surface du métal un liquide ou un gaz. Le degré de finition, les trous, les rayures servent souvent d'amorce à la corrosion qui se développe facilement. Il semble aussi que l'orientation de la surface dans le milieu corrodant joue aussi un rôle, ainsi que le rayon de courbure des pièces. Ils existent quatre groupes principaux caractérisant l'état de surface.

2. 3.3.1. Caractéristiques cristallographiques

Il s'agit du type de structure à l'échelle du réseau, de la grosseur du grain (plus le grain est fin plus l'attaque est faible), du degré de perfection résultant des conditions d'élaboration.

Concernant la structure, un atome situé à la surface échange avec ses voisins des liaisons plus fortes que lorsqu'il est au cœur du métal, donc les atomes de surface ont tendance à échanger de nouvelles liaisons avec les atomes ou les molécules étrangères de façon à rétablir l'équilibre du champ de forces auquel il est soumis.

Lorsque la grosseur des grains est grande, l'influence des différents cristaux peut se manifester dans le cas d'un métal polycristallin, les joints de grains qui possèdent une plus haute enthalpie libre que le réseau, constituent une région où la corrosion peut se développer de façon préférentielle. Le degré de perfection du réseau cristallin intervient également dans le phénomène de corrosion. Les régions écrouies d'un métal s'attaquent plus facilement que celles qui sont recristallisées. Le sens du courant dans une pile constituée par deux éprouvettes d'un même métal, l'une écrouie (E) et l'autre recristallisée (R) (fig. 47) :

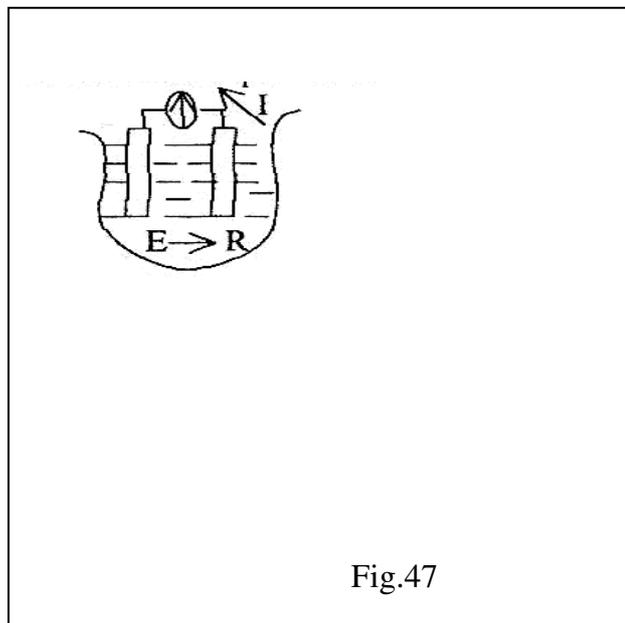


Fig.47

Le polissage d'une surface métallique par un abrasif même très fin a pour effet d'écrouir le métal. La présence de tensions internes dues par exemple à des déformations permanentes à froid peut rendre la pièce attaquable par certains agents chimiques.

[3.3.2. Caractéristiques physico-chimiques](#)

Il est très rare que le réactif soit directement en contact du métal sauf vraisemblablement dans le cas de l'or ou du platine. Dès que la température devienne ordinaire, il se produit en général sur le métal des phénomènes d'adsorption physique ou chimique, il en résulte qu'il existe presque toujours à la surface des métaux un film de nature variable et dont l'épaisseur peut aller de quelques angströms à quelques centaines d'angströms.

L'aluminium se recouvre spontanément à l'air d'une couche d'alumine dont l'épaisseur est de l'ordre de 0,1 μm lorsqu'une couche étanche et continue recouvre le métal ou l'alliage, il existe une barrière entre le métal et le réactif. Elle peut se produire spontanément dans le milieu considéré, ou encore par polarisation anodique en portant le métal dans un domaine de potentiel bien défini, on dit que le métal est passif. Cette passivation peut également intervenir quand on ajoute, à faible concentration dans le réactif, un corps appelé inhibiteur de corrosion. Donc les modifications des caractéristiques physico-chimiques de la surface métallique conduisent à la formation d'un film continu et étanche permettant d'assurer une protection de la surface contre la corrosion dans le milieu considéré. Elles sont très utilisées en pratique.

2.3.3.3. Caractéristiques chimiques

Les impuretés du métal constituent des centres d'attaque privilégiés. La vitesse d'attaque dépend de leur état. Donc un métal contenant des atomes étrangers s'attaque plus rapidement dans un réactif chimique donné que le même métal pris à un degré de pureté élevé. La présence d'une soudure favorise également l'attaque du métal.

2.3.3.4. Caractéristiques micro-géométriques

En effet les pointes ont une réactivité plus grande que les régions planes et d'autre part les irrégularités superficielles augmentent la surface du métal au contact du réactif. Donc la quantité du métal attaquée est plus importante que si la surface était plane, même si en chaque point la réactivité est la même. De plus les creux peuvent être le siège de phénomènes de corrosion par différence de concentration en oxygène de réactif.

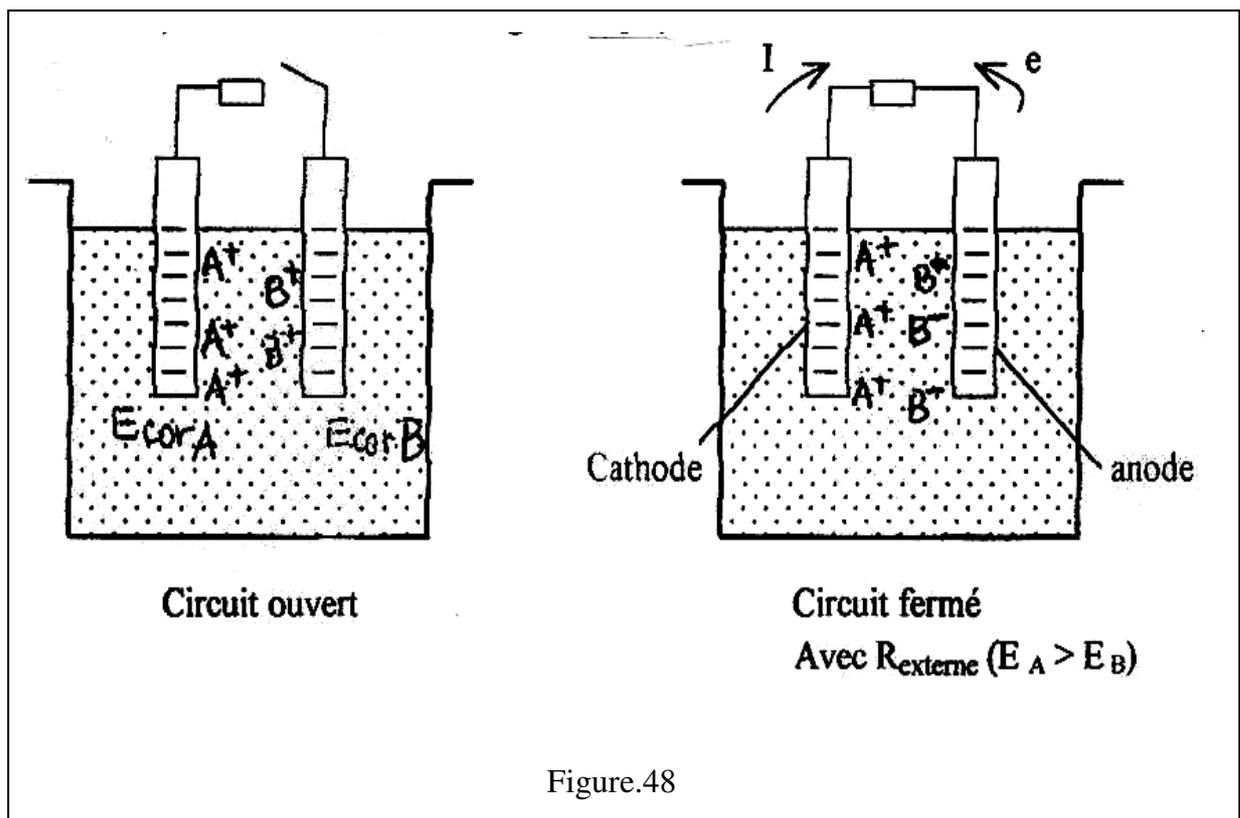
2.4. Cellule électrochimique (pile de corrosion)

Lorsque deux parties d'une surface métallique possédant un potentiel électrique différent, elles peuvent former une cellule électrochimique que l'on appelle aussi pile de corrosion.

La différence de potentiel résulte d'une hétérogénéité du matériau (différentes phases, joints de grains, inclusions, ségrégations) ou de l'environnement (aération, pH, convection, température). En général on peut définir une cellule électrochimique comme étant un système comprenant deux électrodes (appelées l'une anode et l'autre cathode), plongées dans un électrolyte. Pour prendre un modèle simple on considère une cellule électrochimique à deux électrodes (deux métaux A et B) dont les surfaces sont égales selon (fig. 48).

En l'absence de contact électrique c'est à dire lorsque les deux métaux sont isolés électriquement l'un de l'autre, ils prennent les potentiels de corrosion par rapport à la solution E_{corA} et E_{corB} .

On suppose que E_{corB} soit plus négatif que E_{corA} ($E_{corB} < E_{corA}$). Pour qu'il y ait corrosion, il faut qu'il y a un courant qui circule dans le circuit extérieur le la cathode vers l'anode. Dans notre cas B constitue l'anode de la pile, car B possède une charge négative plus élevée que celle de A et A constitue la partie cathode le la pile.



Dès qu'un contact est établi entre les deux électrodes un courant I appelé courant externe passe du pôle positif (A) au pôle négatif (B) et les électrons circulent dans le sens opposé c'est à dire ils vont emprunter le circuit extérieur de B vers A, donc le potentiel de A va devenir plus négatif tandis que le potentiel de B deviendra moins négatif. Il en résulte que les cations de A ne pourront plus passer en solution si bien que A qui constitue la cathode de la pile sera protégée cathodiquement.

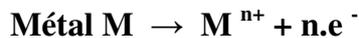
De même que le courant anodique proportionnel à la vitesse de corrosion augmente sur l'électrode B simultanément, il diminue sur l'électrode A, en revanche, le courant cathodique diminue sur l'électrode B et augmente sur l'électrode A.

Dans les piles le corrosion, le courant anodique de l'électrode A s'avère souvent négligeable tout comme le courant cathodique de l'électrode B. Formellement une pile de corrosion se traite comme une électrode mixte subissant une corrosion uniforme à une différence près. Les surfaces anodiques et cathodiques ne sont pas toujours égales. Si les courants partiels anodiques et cathodiques sont toujours équivalents en intensité, leur densité diffère en fonction du rapport des surfaces

Remarques concernant les électrodes et électrolytes :

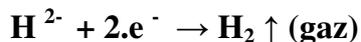
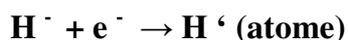
Une confusion apparaît souvent dans l'utilisation des termes anode et cathode et du signe que l'on doit leur attribuer. Par convention on distingue :

L'anode : comme étant l'électrode dans laquelle l'oxydation a eu lieu et d'où partent des cations dans la solution ou encore à partir de laquelle sont libérés les électrons, elle se charge donc négativement et on lui attribue le signe négatif (-).

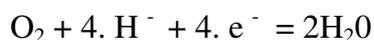


La cathode : c'est l'électrode d'où partent les anions ou encore la partie où arrivent les électrons libres par l'anode. On lui attribue le signe positif (+). Généralement la cathode ne s'oxyde pas (ne se corrode pas). Différents types de réactions cathodiques pouvant exister dans la corrosion métallique :

Evolution d'hydrogène :



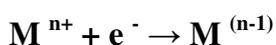
Réduction d'oxygène dans les solutions acides :



Réduction d'oxygène dans les solutions neutres, alcalines :



Réduction des ions d'un métal :



Dépôt de métal :



Dans une pile, l'anode est le pôle positif alors que dans la cellule d'électrolyse l'anode est le pôle négatif.

L'électrolyte : c'est le nom donné à la solution dans laquelle sont plongées l'anode et la cathode, l'électrolyte est un conducteur d'électricité.

La connexion électrique : L'anode et la cathode doivent être connectées électriquement pour permettre au courant électrique de passer dans la cellule de corrosion (dans le cas où l'anode et la cathode font partie du même métal une connexion physique n'est pas nécessaire). Donc il y a quatre composants pour former une base d'une cellule électrochimique (corrosion humide). L'enlèvement de l'un des quatre constituants aboutira à l'arrêt de la réaction de corrosion. Dans une cellule électrochimique, on peut mesurer la différence de potentiel entre l'anode et la cathode par l'insertion d'un voltmètre.

On peut représenter le comportement d'une pile de corrosion par un circuit électrique équivalent (fig. 49).

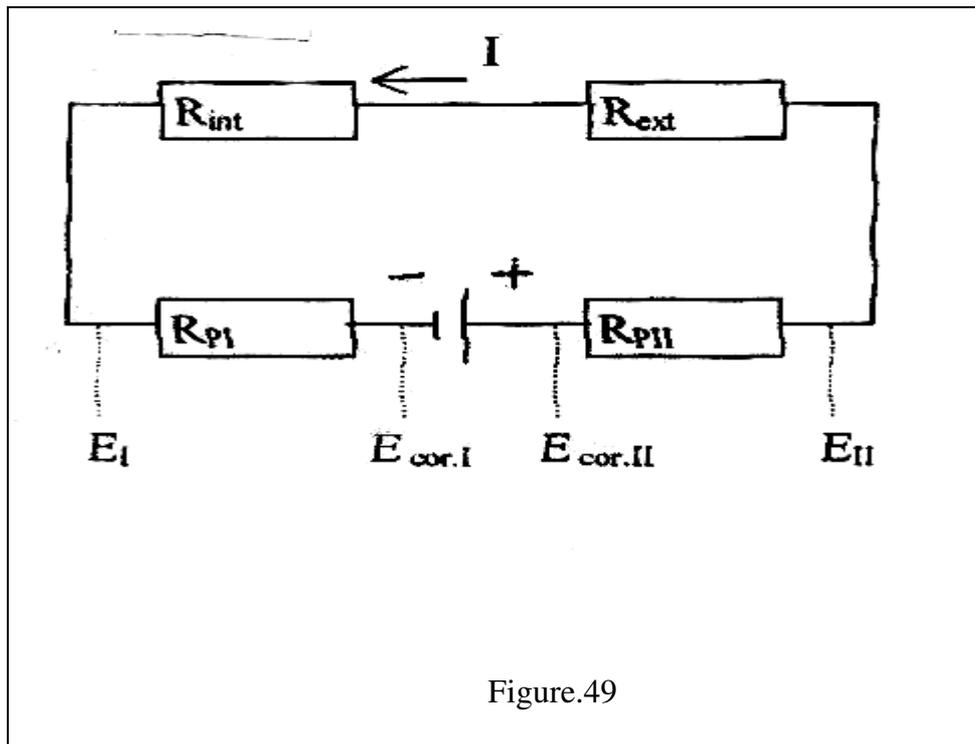


Figure.49

La différence des potentiels de corrosion entre les deux électrodes représente une source de tension atteignant une valeur de :

$$\Delta E_{\text{corr}} = E_{\text{corr II (B)}} - E_{\text{corr I (A)}}$$

La résistance aux interfaces électrodes-électrolyte, due aux réactions d'électrodes, correspond à deux résistances non ohmiques.

$$R_{PI} = \left(\frac{dE}{dI} \right)_I \quad R_{PII} = \left(\frac{dE}{dI} \right)_{II}$$

Leur valeur varie donc avec le courant. La résistance ohmique R_{int} représente la résistance interne due à l'électrolyte entre les deux électrodes.

Quant à la résistance ohmique R_{ext} elle traduit la résistance externe provenant des conducteurs électriques du circuit.

Selon la figure 49, la différence de potentiel : $\Delta E = E_{II} - E_I$ qui s'établit dans une pile de corrosion correspond à l'équation :

$$\Delta E = I.R = I.(R_{int} + R_{ext})$$

où I représente le courant externe.

Si $(R_{int} + R_{ext}) = \infty$, alors $I = 0$, on obtient ainsi : $\Delta E = \Delta E_{corr} = E_{corrII} - E_{corrI}$

Cela signifie qu'une pile de corrosion ne peut exister que dans la mesure où les deux parties d'une même structure métallique sont connectées par un électrolyte et par un matériau conducteur, dans le cas contraire chaque électrode corrode indépendamment.

Si $(R_{int} + R_{ext}) = 0$, la différence de potentiel devient également nulle et par conséquent les deux électrodes ont un potentiel équivalent ($E_I = E_{II}$), cela signifie qu'un court-circuit est établi, ce qui est irréalisable en pratique, car la résistance de l'électrolyte n'est jamais nulle.

Dans une pile de corrosion le courant externe vaut :

$$I = \frac{\Delta E_{corr}}{R_{PI} + R_{PII} + R_{int} + R_{ext}} = \frac{E_{II} - E_I}{R_{int} + R_{ext}}$$

Le courant qui passe entre l'anode et la cathode dépend de l'ensemble des éléments du circuit, mais dans les situations réelles on ne connaît généralement pas la valeur exacte de ces éléments, les paramètres R_{PI} et R_{PII} varient en fonction de la densité de courant et de la cinétique des réactions.

En outre, la valeur de R_{int} dépend de la géométrie du système. Son évaluation nécessite, dans la plupart des cas, un calcul complet de la distribution du potentiel entre les électrodes

2.5. Potentiel d'électrode dans les cellules électrochimiques

2.5.1. Potentiel d'une électrode (potentiel d'équilibre)

Généralement un conducteur électronique comme le cuivre ou le platine, en contact avec un électrolyte est appelé électrode. En électrochimie par contre le terme électrode désigne également une réaction de transfert de charge (oxydation ou réduction) appelée réaction d'électrode, telle que l'électrode d'hydrogène ($2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$), ou celle de cuivre.

Le potentiel d'équilibre est le potentiel que prend un métal par rapport à la solution de l'un de ses sels. Il est appelé aussi potentiel réversible et il présente la différence de potentiel électrique entre le métal et la solution à l'équilibre.

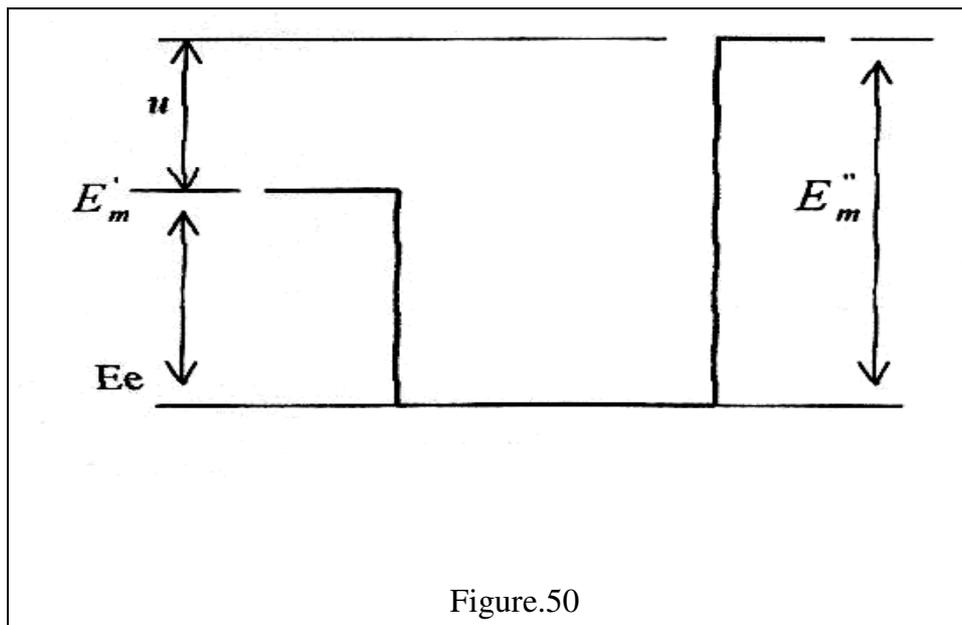
Le potentiel d'électrode ne peut se mesurer dans l'absolu, car on ne mesure qu'une différence de potentiel entre deux électrodes formant une pile galvanique.

La figure 50 représente les niveaux de potentiel électrique dans une pile. La tension mesurée aux bornes de cette pile vaut :

$$u = E_m'' - E_m'$$

avec E_m'' potentiel électrique du métal M''

et E_m' potentiel électrique du métal M'



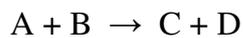
Le potentiel électrique de l'électrolyte n'est pas accessible et il n'y a aucune information sur les différences de potentiel aux interfaces électrode-électrolyte.

Le potentiel peut être calculé en utilisant la relation de NERNST, pour cela, on applique la thermodynamique des réactions de corrosion, laquelle est depuis plusieurs années utilisée dans

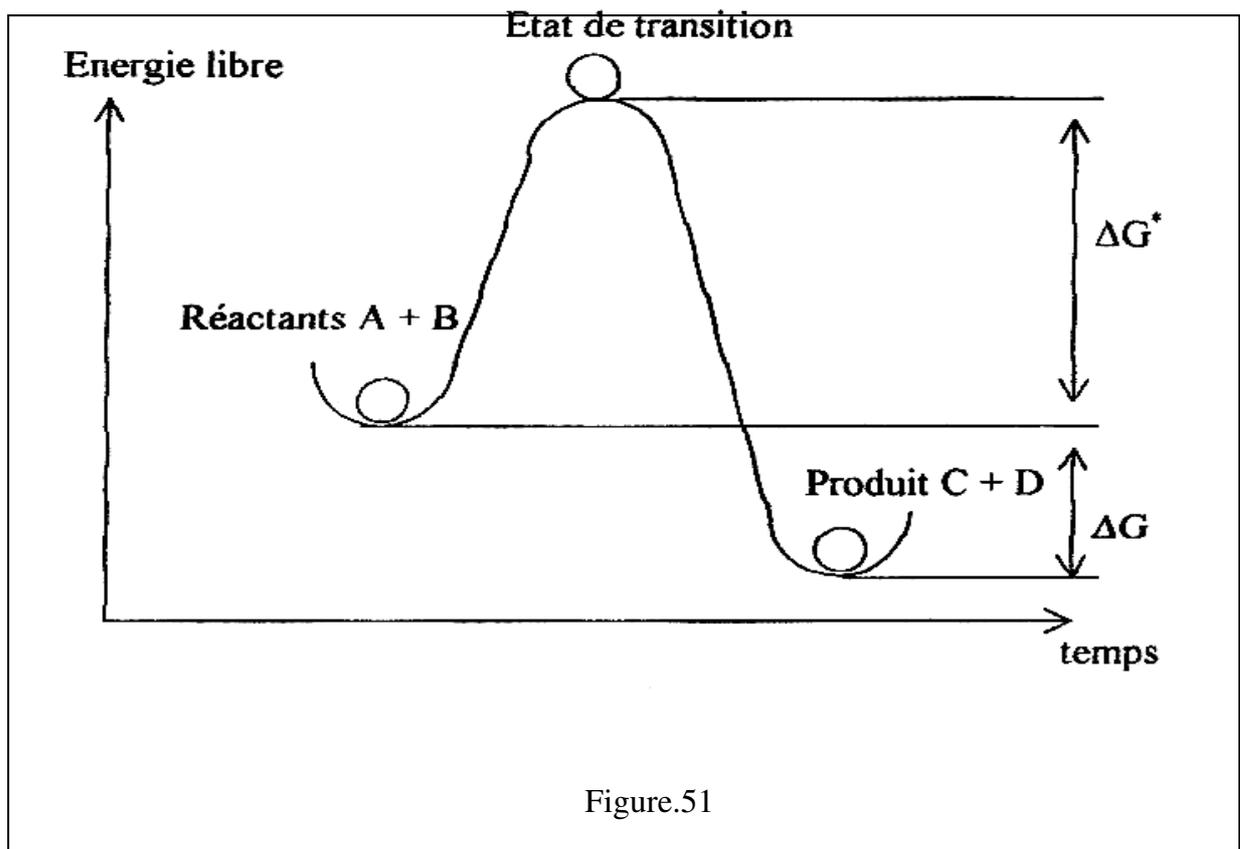
L'étude de la corrosion est basée sur l'étude de la variation de l'énergie libre (ΔG) accompagnant les réactions de corrosion. ΔG est la différence entre l'énergie libre du métal et de son produit de corrosion. L'important est le signe de ΔG et non sa grandeur :

Si $\Delta G < 0$: la corrosion est possible.

Si on considère la réaction entre deux réactants A et B, selon la réaction, on aura le produit C+D tel que :



Et comme profil d'énergie pour cette réaction, on aura (fig. 51) :



Selon le graphique, les atomes doivent surmonter cette barrière avant de se corroder et pratiquement une énergie supplémentaire est exigée pour accomplir ce phénomène.

La variation de l'énergie sera :

$$\Delta G = \Delta G' + RT \cdot \ln \frac{[C].[D]}{[A].[B]}$$

- $\Delta G'$ énergie libre d'activation (standard).
- R : constante des gaz (8,3143 j/mole°K).
- T : température en °K (298 °K condition standard).
- ΔG : différence d'énergie entre celle des réactants (A + B) et celle du produit (C + D).
- [A].[B] : activités des parties oxydées.
- [C].[D] : activités des parties réduites.

Le changement de l'énergie libre qui accompagne chaque réaction en terme de la différence du potentiel et de la charge transportée sera :

$$\Delta G_{\text{ox}} = nFE \quad (\text{réaction anodique}).$$

$$\Delta G_{\text{red}} = -nFE \quad (\text{réaction cathodique}).$$

- E : potentiel mesuré.
- F : constante de Faraday (18500 C/mole), (chargé transportée par une mole).
- n : nombre d'électrons qui participent dans la réaction.

Dans les conditions standards, on peut écrire :

$$\Delta G^* = \pm nFE^\circ \quad \text{où } E^\circ : \text{potentiel standard d'électrode.}$$

$$\Delta G_{\text{tot}} = (\Delta G_{\text{ox}} + \Delta G_{\text{red}}) < 0 \Rightarrow \text{corrosion possible.}$$

Remplaçons dans la première équation ΔG et ΔG^*

$$nFE = nFE^\circ + RT \log K \quad \text{avec } K = \frac{[C].[D]}{[A].[B]}$$

$$E = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln K$$

Cette équation est connue comme l'équation de NERNST, à la température de 25°C.

Cette relation peut s'écrire, (remplaçons R, T, f et ln par log) :

$$E = E^\circ + \frac{0,058}{n} \log K$$

L'équation de Nernst s'applique à une réaction d'électrode à l'équilibre. Elle sert à calculer son potentiel standard en fonction des activités et de la température.

Pour la réaction d'électrode de cuivre on a :

$$E = 0,340 + \frac{0,058}{2} \log a_{\text{Cu}^{2+}}$$

En pratique pour simplifier le problème, on remplacera l'activité par la concentration (activité = facteur d'activité (=1) x concentration). Cette hypothèse est valable tant que la concentration des ions Cu^{2+} est faible. Pourtant même à des concentrations plus élevées, l'erreur introduite sur le potentiel par cette simplification reste en général faible.

2.5.2. Potentiel de corrosion

C'est le potentiel que prend un métal par rapport à un électrolyte donné, il n'est pas caractéristique du métal et dépend des conditions expérimentales telles que la nature, la concentration et la température du réactif, mais aussi l'état de surface du métal. La réaction électrochimique n'est plus réversible puisque la nature de l'interface métal-solution varie avec le temps, cependant le potentiel tend vers une valeur stationnaire pour une durée d'immersion du métal qui dépend de sa nature et de celle du réactif.

2.2.6. Classification électrochimique des métaux

Il est important de connaître ou de mesurer les potentiels que prennent les divers métaux par rapport à une solution donnée de façon à savoir, à priori, dans le cas du couplage de deux métaux quel est celui qui constitue l'anode et celui qui constituera la cathode, donc établir une hiérarchie de ces potentiels, appelée « échelle galvanique ». Une différence de potentiel existe toujours entre deux métaux différents plongés dans une solution corrosive ou conductrice, si ces deux métaux sont en contact ou électriquement connectés, cette différence de potentiel produit un passage de courant (d'électrons) entre eux. L'oxydation du métal le moins résistant à la corrosion augmente alors que celle du métal le plus résistant diminue, le moins résistant devient l'anode et le plus résistant la cathode. Donc cette classification, selon les tableaux suivants, permet de connaître la tendance d'un métal à passer en solution. Cette tendance est beaucoup plus grande que le potentiel de corrosion est plus négatif. Les métaux qui ont le potentiel le plus négatif ont le plus tendance à passer en solution. Les métaux situés en haut de l'échelle sont dits nobles. Le tableau ci-dessous indique le potentiel de dissolution de certains métaux dans une solution de 3 % NaCl, mesuré par rapport à une électrode au calomel saturé à 20°C.

Electrodes	Potentiels en V	Electrodes	Potentiels en V
Pt	+ 0,3	Pb	- 0,47
Au	+ 0,22	Cr actif	- 0,60
Cr passif	+ (0,2 à 0,25)	Fe	- (0,6 à 0,7)
Acier inox (18-8)	+ 0,10	Alliage Cu-Al	- (0,6 à 0,65)
Hg	0,00	Al	- 0,74
Ag	- 0,05	Cd	- 0,78
Cu	- 0,18	Alliage Al-Mg	- (0,77 à 0,8)
H ₂	- 0,25	Zn	- 1,06
Ni	- 0,27	Mg	- 1,63
Sn	- 0,44		

Le tableau, ci-dessous, indique le potentiel de certains métaux par rapport à l'électrode standard d'hydrogène.

Electrodes	E° en V	Electrodes	E° en V
$\text{Li}^+ + e = \text{Li}$	- 3,045	$\text{Pb}^{2+} + 2e = \text{Pb}$	- 0,125
$\text{Ca}^{2+} + 2e = \text{Ca}$	- 2,84	$2\text{H}^+ + 2e = \text{H}_2$	0
$\text{Na}^+ + e = \text{Na}$	- 2,714	$\text{H}_2\text{MoO}_4 + 6\text{H}^+ + 6e = \text{Mo} + 4 \text{H}_2\text{O}$	0,114
$\text{Mg}^{2+} + 2e = \text{Mg}$	- 2,356	$\text{Cu}^{2+} + 2e = \text{Cu}$	0,340
$\text{Al}^{3+} + 3e = \text{Al}$	- 1,67	$\text{H}_2\text{CrO}_4 + 6\text{H}^+ + 6e = \text{Cr} + 4 \text{H}_2\text{O}$	0,326
$\text{Ti}^{2+} + 2e = \text{Ti}$	- 1,63	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e = 4 \text{OH}^-$	0,401
$\text{Mn}^{2+} + 2e = \text{Mn}$	- 1,18	$\text{Cu}^+ + e = \text{Cu}$	0,520
$\text{Cr}^{2+} + 2e = \text{Cr}$	- 0,90	$\text{Hg}^{2+} + 2e = \text{Hg}$	0,796
$\text{Cr}^{3+} + 3e = \text{Cr}$	- 0,74	$\text{Ag}^+ + e = \text{Ag}$	0,799
$\text{Zn}^{2+} + 2e = \text{Zn}$	- 0,76	$\text{Pd}^{2+} + 2e = \text{Pd}$	0,915
$\text{Fe}^{2+} + 2e = \text{Fe}$	- 0,44	$\text{Pt}^{2+} + 2e = \text{Pt}$	1,188
$\text{Cu}^{2+} + 2e = \text{Cu}$	- 0,403	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e = 2\text{H}_2\text{O}$	1,229
$\text{Ni}^{2+} + 2e = \text{Ni}$	- 0,257	$\text{Au}^{3+} + 3e = \text{Au}$	1,52
$\text{Mo}^{3+} + 3e = \text{Mo}$	- 0,20	$\text{Au}^+ + e = \text{Au}$	1,83

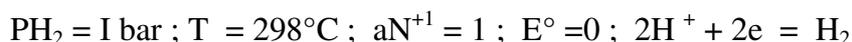
$\text{Sn}^{2+} + 2e = \text{Sn}$	- 0,136		
-----------------------------------	---------	--	--

Ces séries de potentiels sont appelés potentiels standards ou forces électromotrices. Lorsqu'on associe deux métaux pour constituer une pile, celui qui a le potentiel le plus négatif sera l'anode et sera corrodé, cette propriété est surtout utilisée dans la protection cathodique. Ainsi dans le cas du couple cuivre-fer, le cuivre constitue la cathode et le fer l'anode, dans l'eau salée par exemple, la différence de potentiel de la pile sera de :

$$\Delta E = E_{\text{Cu}} - E_{\text{Fe}} = (-0,18) - (-0,7) = + 0,52 , \text{ donc le fer se corrode.}$$

Les différences de potentiels entre les métaux, peuvent être calculées par la différence entre leurs potentiels standards.

Il y a un potentiel de 0,462 volts entre Cu-Ag et 1,1 volts entre Cu-Zn. Les valeurs des potentiels standards sont mesurées sous conditions réversibles (pas de corrosion), l'électrode de référence est une électrode impolarisable et dont le potentiel est choisi à zéro sous conditions standards :



L'électrode d'hydrogène est constituée d'une lame de platine platinée (recouverte d'une couche de platine poreuse déposée par électrolyte), plongée dans une solution de HCl dans laquelle l'activité des ions H^+ est égale à 1. On fait barboter dans la solution de l'hydrogène pur sous pression atmosphérique Le processus réversible dont cette électrode est le siège de :



[2.7. Potentiel d'une cellule électrochimique](#)

Pour déterminer le potentiel théorique d'une cellule électrochimique, on considère la cellule électrochimique la plus ancienne dont le potentiel est égal à la différence entre les potentiels réversibles de deux réactions d'électrodes, calculé par l'équation de Nernst. La figure 52 représente la cellule électrochimique.

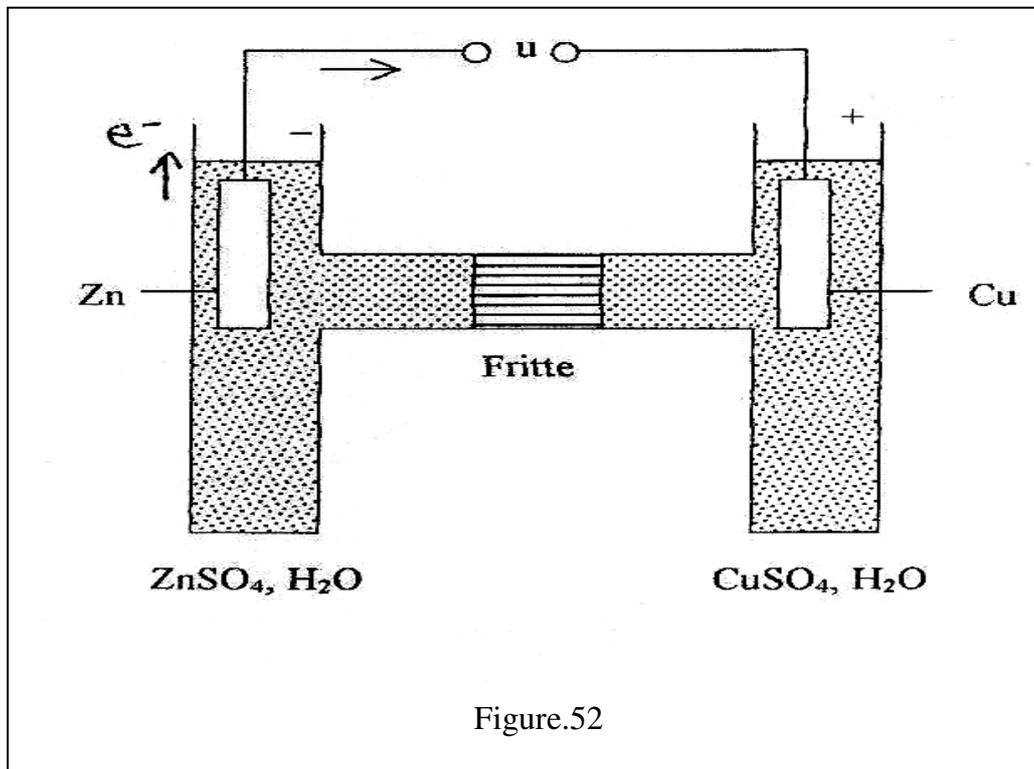
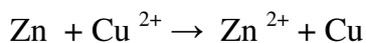


Figure.52

Le zinc et le cuivre sont plongés dans des solutions de leur sel. La cellule peut être représentée seulement par $\text{Zn} \mid \text{Zn}^{2+} \parallel \text{Cu}^{2+} \mid \text{Cu}$, le zinc à gauche, le cuivre à droite comme sur la figure 9, le zinc représente l'anode et le cuivre la cathode.



La réaction globale s'écrit :



Si on utilise l'équation de Nernst pour chaque réaction de la cellule :

$$E(\text{Zn} \mid \text{Zn}^{2+}) = E^\circ(\text{Zn} \mid \text{Zn}^{2+}) - \frac{0,058}{2} \log [\text{Zn}^{2+}] \quad (\text{a})$$

$$E(\text{Cu}^{2+} \mid \text{Cu}) = E^\circ(\text{Cu}^{2+} \mid \text{Cu}) - \frac{0,058}{2} \log \left[\frac{1}{\text{Cu}^{2+}} \right] \quad (\text{b})$$

$$E_{\text{cellule}} = E(\text{Zn} \mid \text{Zn}^{2+}) - E(\text{Cu}^{2+} \mid \text{Cu})$$

$$E^{\circ}_{\text{cellule}} = E^{\circ}(\text{Zn} | \text{Zn}^{2+}) - E^{\circ}(\text{Cu}^{2+} | \text{Cu})$$

Les équations a et b donnent :

$$E_{\text{cellule}} = E^{\circ}_{\text{cellule}} + \frac{0,058}{2} \log \left[\frac{\text{Zn}^{2+}}{\text{Cu}^{2+}} \right]$$

Comme les concentrations de Zn et de Cu sont prises comme égales à l'unité, donc on aura :

$$E_{\text{cell}} = E^{\circ}_{\text{cell}}$$

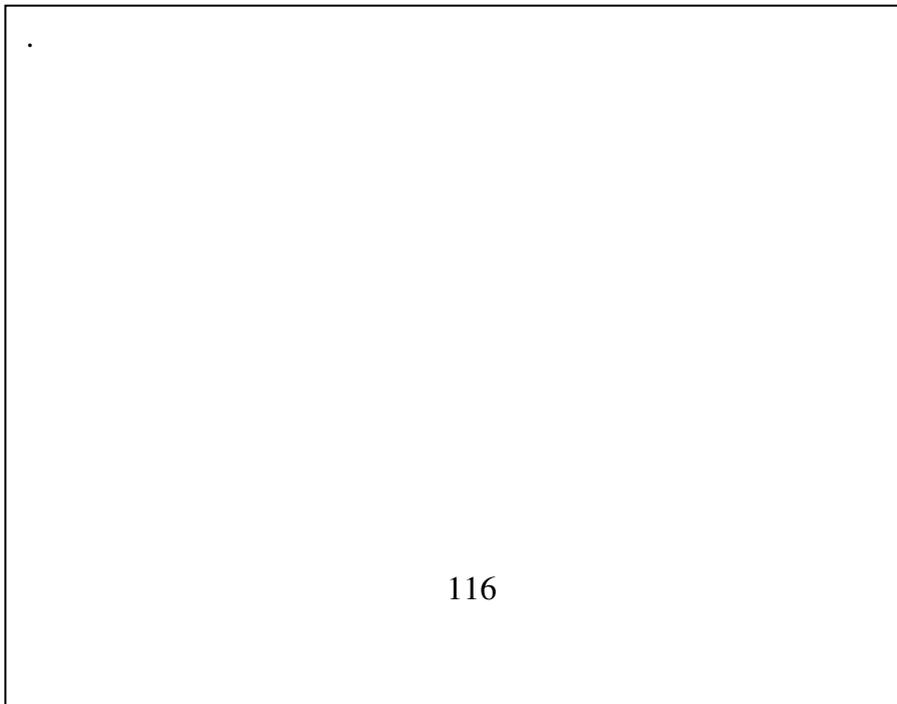
L'utilisation de l'équation de Nernst sous cette forme est seulement valide lorsqu'on prend les conditions standard :

$$E^{\circ}_{\text{cell}} = E^{\circ}_{\text{Zn.ox}} + E^{\circ}_{\text{Zn.réd}} = (0,76) + (0,34) = 1,10 \text{ Volts}$$

Le potentiel E°_{cell} théorique diffère de la tension aux bornes U car un potentiel de fonction s'établit à l'interface.

2.8. Variation du potentiel de corrosion en fonction du temps

Lorsque l'on mesure le potentiel de corrosion d'un métal, on observe qu'il n'atteint pas en général immédiatement une valeur stationnaire. En effet, au moment où le métal est plongé dans la solution, celle-ci ne contient pas d'ions de métal, si bien qu'un potentiel stationnaire est long à atteindre. D'autre part, L'interface métal-solution peut être modifiée par formation d'un produit de corrosion insoluble ou d'un gaz comme l'hydrogène. Les courbes potentiels-temps peuvent présenter différents aspects (fig. 53).



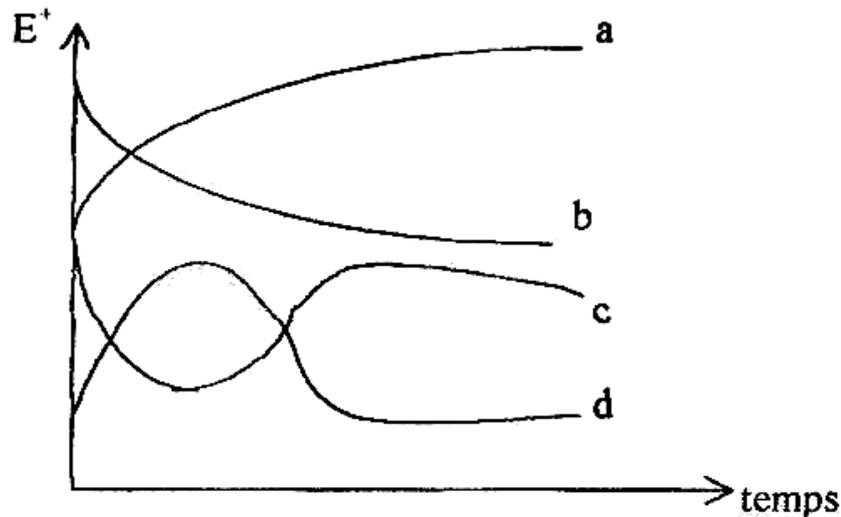


Figure.53

Courbe a : le potentiel devient de plus en plus noble, il y a passivation du métal par formation à la surface d'un produit de corrosion insoluble protecteur. C'est le cas du fer plongé dans l'acide nitrique concentré.

Courbe b : le potentiel devient de moins en moins noble, ou plus négatif, il y a attaque du métal c'est le cas de l'aluminium plongé dans la soude.

Courbe c : le potentiel devient d'abord plus négatif, puis tend vers des valeurs plus positives, il y a attaque suivie de passivation. C'est le cas de l'aluminium plongé dans une solution d'acide nitrique à 15 ou 20 %.

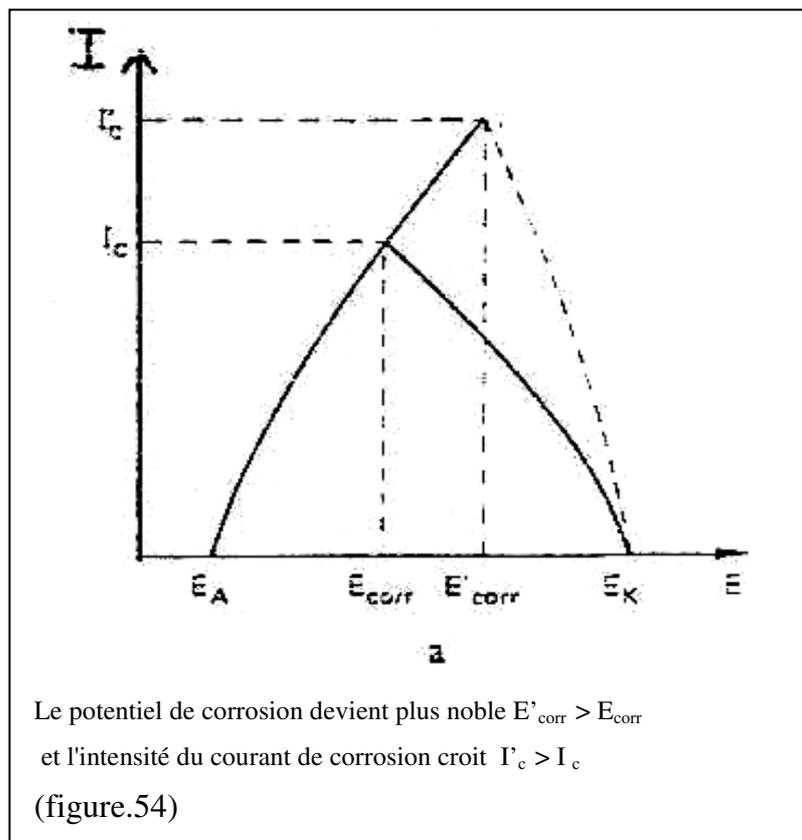
Courbe d : le potentiel devient plus noble puis se déplace vers des valeurs plus négatives. C'est le cas lorsqu'au moment de son immersion, le métal est recouvert d'une couche protectrice, celle-ci se développe dans un temps plus ou moins long puis elle est détruite. Le métal est alors mis à nu. L'aluminium oxydé naturellement à l'air, puis plongé dans une solution aqueuse de chlorure de sodium contenant des sels mercuriels présente une courbe potentiel-temps de ce type.

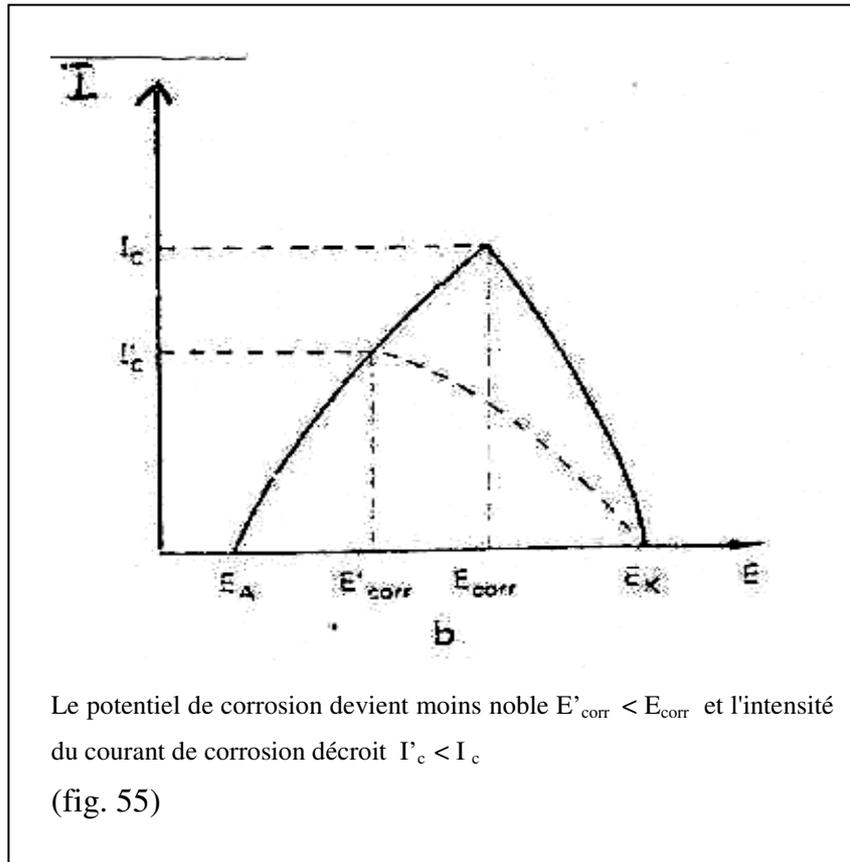
2.9. Courant de corrosion dans les cellules électrochimiques

Courbes intensité-potentiel :

La connaissance de la variation du potentiel de corrosion est insuffisante pour déterminer le sens dans lequel évolue le phénomène de corrosion et il est indispensable de mesurer parallèlement la valeur de l'intensité du courant de corrosion.

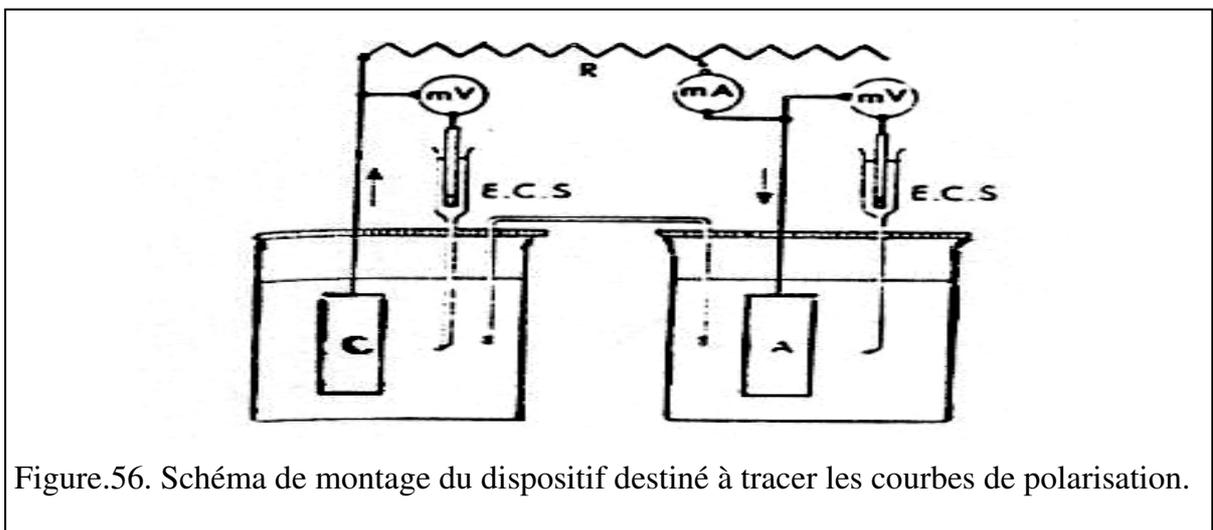
Si on examine la courbe intensité-potentiel de corrosion, (fig. 54), on peut en déduire que la variation du potentiel de corrosion vers des valeurs plus nobles $E'_{\text{corr}} > E_{\text{corr}}$ ne correspond pas toujours à une diminution de l'intensité du courant de corrosion, ce déplacement signifie que le métal devient plus résistant vis-à-vis de la corrosion. D'autre part le déplacement du potentiel de corrosion vers des valeurs plus négatives $E'_{\text{corr}} < E_{\text{corr}}$ peut entraîner la diminution de l'intensité de courant corrosion ($I'_c < I_c$), (fig. 55).





2.10. Phénomènes de polarisation

Lorsqu'un métal n'est pas en équilibre avec une solution contenant ses propres ions, le potentiel de l'électrode diffère du potentiel de corrosion d'une certaine valeur égale à η comme surtension. Le problème qui se pose est de savoir comment varie le potentiel des deux électrodes a et c constituées chacun par un métal pur différent, réunies entre elles et plongées dans un électrolyte, en fonction de l'intensité du courant qui circule dans la pile. La figure 56 montre le montage, comment cette étude peut être réalisée.



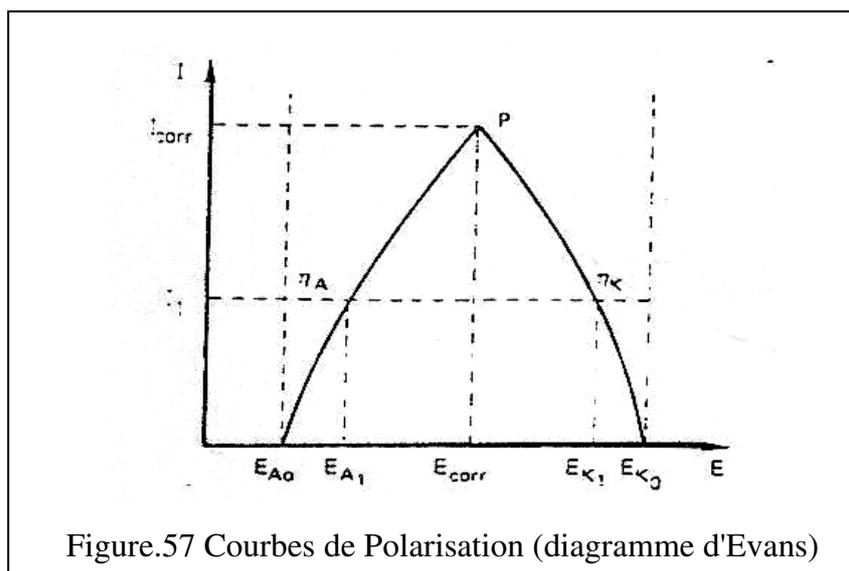
A chaque instant, on peut mesurer le potentiel E_C et E_A des deux électrodes. Le rhéostat R permet de faire varier l'intensité du courant débité par la pile. A l'instant initial, lorsque le circuit est ouvert, le potentiel des deux électrodes sera E_{CO} et E_{AO} .

Si un courant d'intensité I_1 circule dans la pile, on constate que le potentiel de la cathode devient plus négatif E_{C1} et celui de l'anode plus positif E_{A1} .

$$E_{C1} - E_{A1} = \eta_C \text{ sustentation cathodique.}$$

$$E_{A1} - E_{C1} = \eta_A \text{ sustentation anodique.}$$

En faisant varier l'intensité du courant de corrosion, on pourra tracer les courbes de polarisation cathodiques $E_C = f(i)$ et anodiques $E_A = f(i)$, on observe alors pour une certaine valeur i_C de l'intensité du courant, le potentiel de l'anode et celui de la cathode prennent la même valeur E_C , i_C est l'intensité maximale que pourra débité la pile. C'est l'intensité de corrosion du couple A-C dans le milieu donné. E_{corr} est le potentiel de corrosion du couple (potentiel mixte). Dans certains cas, étant donné la résistance intérieure du circuit, il est possible d'atteindre la valeur i_C de l'intensité de courant de corrosion même si $R = 0$. On le détermine par extrapolation des deux courbes de polarisation anodique et cathodique, (fig. 57).



L'intensité du courant de corrosion I_c est une grandeur qu'il est intéressant de connaître, car elle permet de calculer la perte de poids m subie par le métal en fonction du temps. Suivant la loi de Faraday, on a la relation :

$$m = \frac{A \cdot i_c \cdot t}{F \cdot n}$$

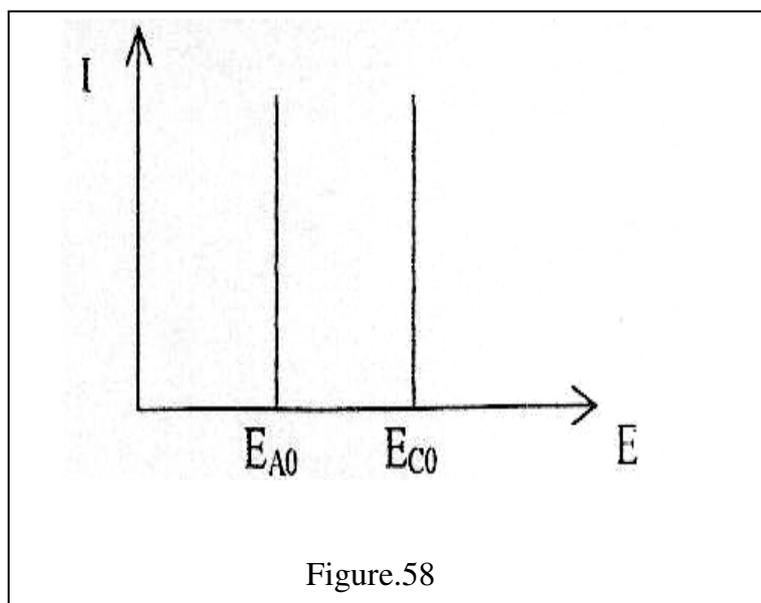
Où A : masse atomique du métal de valence n et t = temps. Pour diminuer l'intensité du courant de corrosion, il faudra donc essayer de donner à la surtension cathodique, anodique ou bien aux deux surtensions une valeur aussi élevée que possible. Par contre, si l'on veut fabriquer une pile électrique qui débite une forte intensité, il faudra éviter les phénomènes de polarisation en diminuant le plus possible la surtension aux électrodes à l'aide de dépolarisants (MnO₂ par exemple).

10.1. Différents types de courbes de polarisation

Il existe cinq types principaux de courbes pouvant présenter les diagrammes de polarisation.

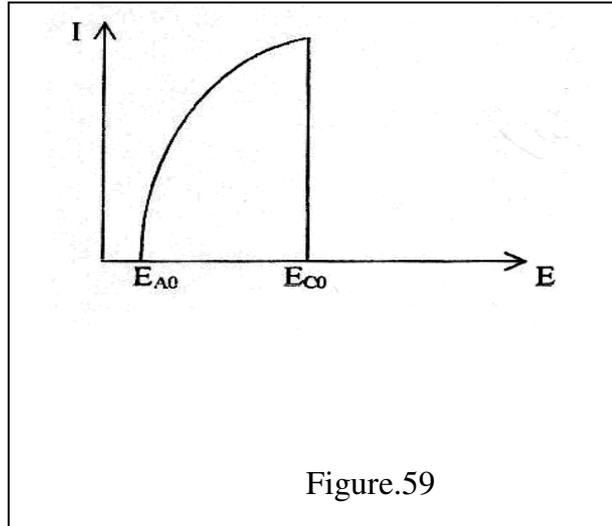
a. Les deux électrodes sont impolarisables :

L'intensité débitée par la pile dépend de la résistance totale du circuit, c'est le cas de la pile Daniel Cu-CuSO₄ - ZnSO₄-Zn, (fig. 58).



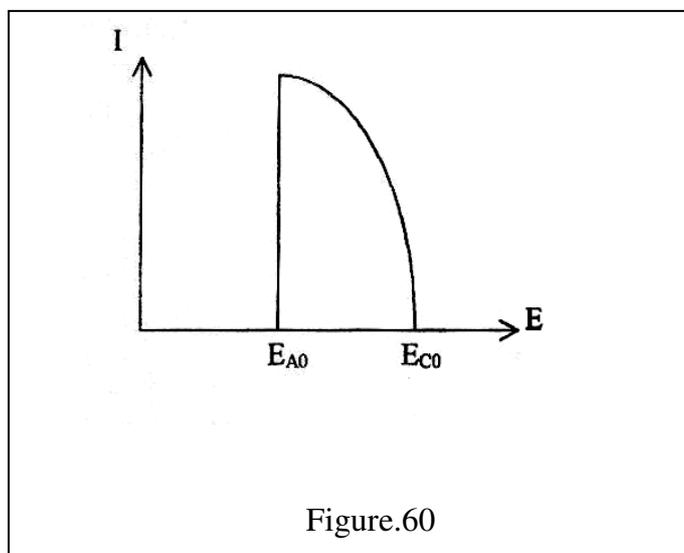
b. La cathode est impolarisable :

On dit que la pile fonctionne sous contrôle anodique (fig. 59).



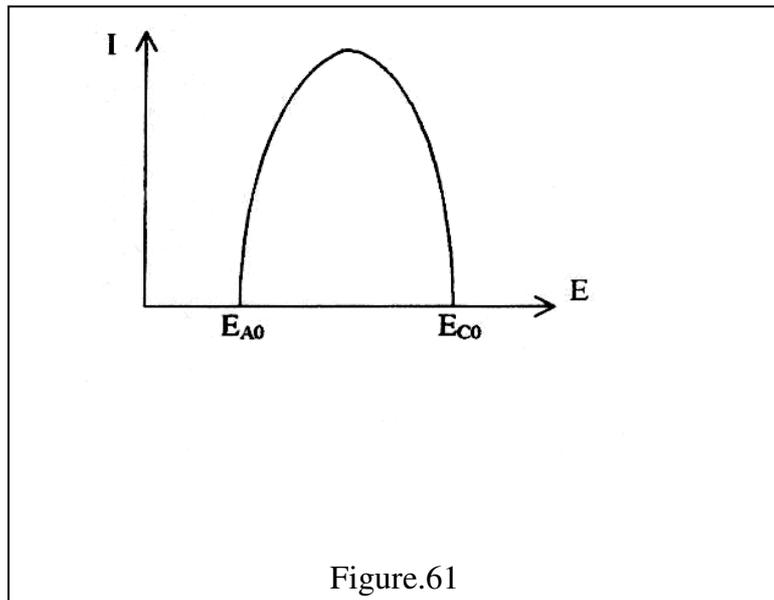
c. L'anode est impolarisable :

On dit que la pile fonctionne sous contrôle cathodique (fig. 60).



d. Les deux électrodes sont polarisables :

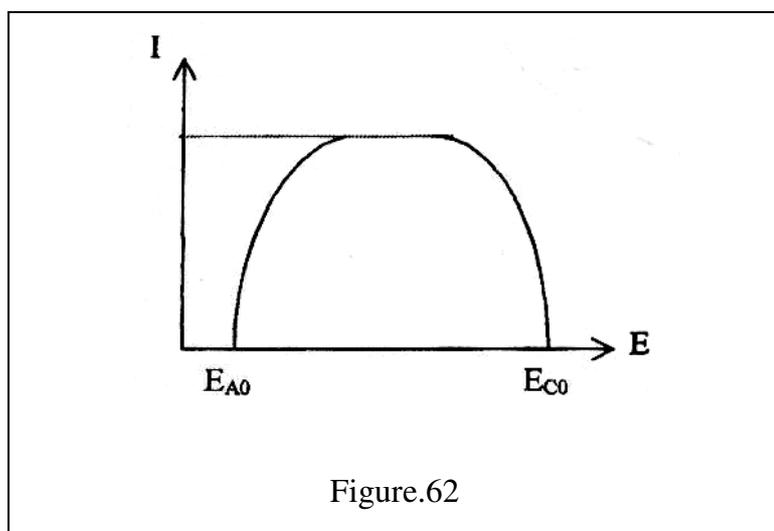
On dit que la pile fonctionne sous contrôle mixte (fig. 61)



e. L'une des électrodes peut se passiver :

Elle se recouvre d'un film qui introduit une résistance au passage du courant. La pile fonctionne sous contrôle ohmique, l'intensité du courant de corrosion i_c est faible (fig. 62).

Dans la pratique, les courbes de polarisation les plus fréquentes sont celles qui correspondent à un contrôle cathodique.



2.10.2. Différents types de polarisations

On peut envisager trois types principaux de polarisations :

- Polarisation de résistance.
- Polarisation de concentration.
- Polarisation d'activation.

a. Polarisation de résistance :

Elle est due à la formation d'un film à la surface de l'électrode. Ce film peut être solide (oxyde) ou gazeux (hydrogène ou oxygène absorbé par exemple). Le film formé sur l'électrode introduit une résistance supplémentaire au passage du courant et par conséquent l'intensité du courant de corrosion est plus faible.

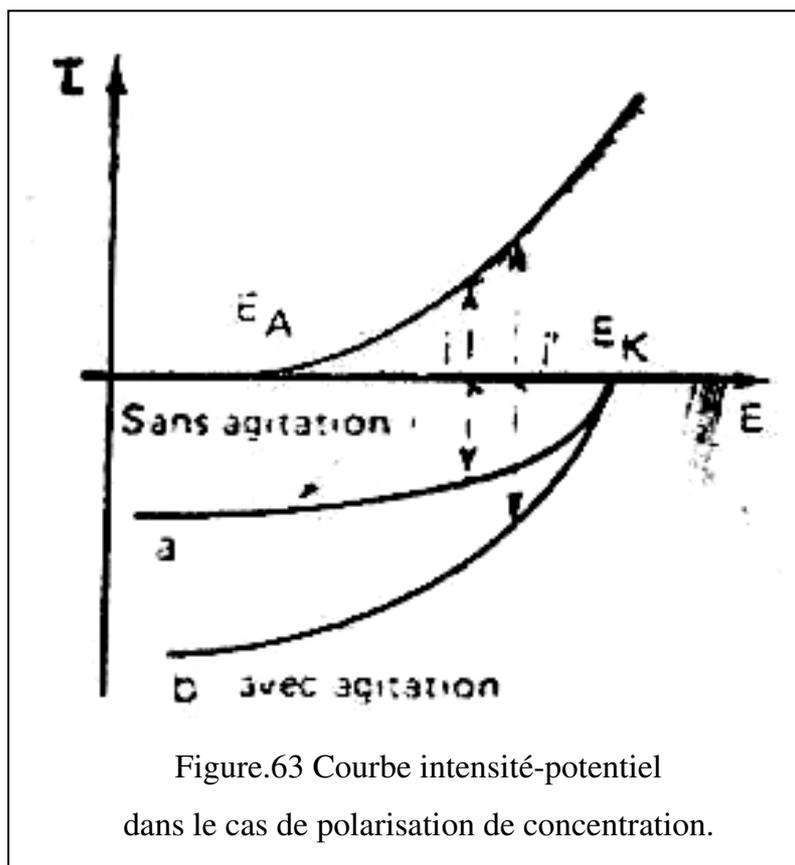
Dans le cas de gaz, c'est l'hydrogène atomique ou moléculaire provenant de la réduction des ions H^+ qui est absorbé facilement à la surface des cathodes et qu'il polarise fortement, donc l'attaque du métal peut être arrêtée.

b. Polarisation de concentration :

Ce type de polarisation intervient lorsque la vitesse de diffusion d'un ion vers la cathode limite la vitesse de réaction à l'électrode. L'intensité du courant tend vers une valeur limite, très sensible à l'agitation. Dans le cas de la courbe (fig.63), il y a polarisation cathodique de concentration où l'intensité du courant de corrosion peut alors être directement donnée par l'ordonnée du palier de diffusion (solution sans agitation) courbe a.

Dans le cas de la courbe b, lorsque la solution est agitée ($i' > i$), on comprend ainsi l'importance de l'agitation des solutions dans tous les phénomènes de corrosion. Cette même figure permet de montrer à nouveau le double rôle accélérateur ou ralentisseur de la corrosion joué par l'oxygène.

Lorsque deux éprouvettes de fer identiques plongent dans deux solutions, d'un même sel, l'une pauvre en oxygène dissous, l'autre riche en oxygène dissous, c'est la seconde qui sera attaquée rapidement ($i' > i$). Par contre si on réunit, d'une part, les deux électrodes avec un conducteur électrique et d'autre part, les deux solutions à l'aide d'un pont liquide, donc si on construit une pile avec les deux demi-piles, c'est l'électrode plongeant dans la solution la plus pauvre en oxygène dissous qui sera l'anode, donc attaquée, puisque c'est elle qui a le potentiel de corrosion le plus négatif.



c. Polarisation d'activation :

Elle correspond aux variations d'énergie libre de l'interface métal-solution, liées au passage des atomes du métal à l'état d'ions ou inversement. C'est elle qui intervient le plus souvent dans les phénomènes de corrosion.

2.11. Types de corrosions électrochimiques

Le comportement de la corrosion d'un matériau en service, dépend d'une multitude de facteurs :

- Composition chimique et microstructure du métal.
- Composition chimique de l'environnement.
- Paramètres physiques (température, convection, irradiation, etc.).
- Sollicitations mécaniques (contraintes, chocs, frottements, etc.).

La résistance à la corrosion n'est donc pas une propriété intrinsèque du métal, mais plutôt une propriété de l'interface métal-milieu, d'où la nécessité de caractériser la composition chimique et la microstructure de celle-ci, ainsi que son comportement électrochimique. La

corrosion dépend donc d'un système extrêmement complexe dont les effets se manifestent, en pratique, sous une multitude d'aspects, parfois inattendus

La corrosion peut être classifiée suivant les formes et types. Une simple observation visuelle ou au microscope est apte à identifier la forme et le type de corrosion. Selon les formes, on distingue :

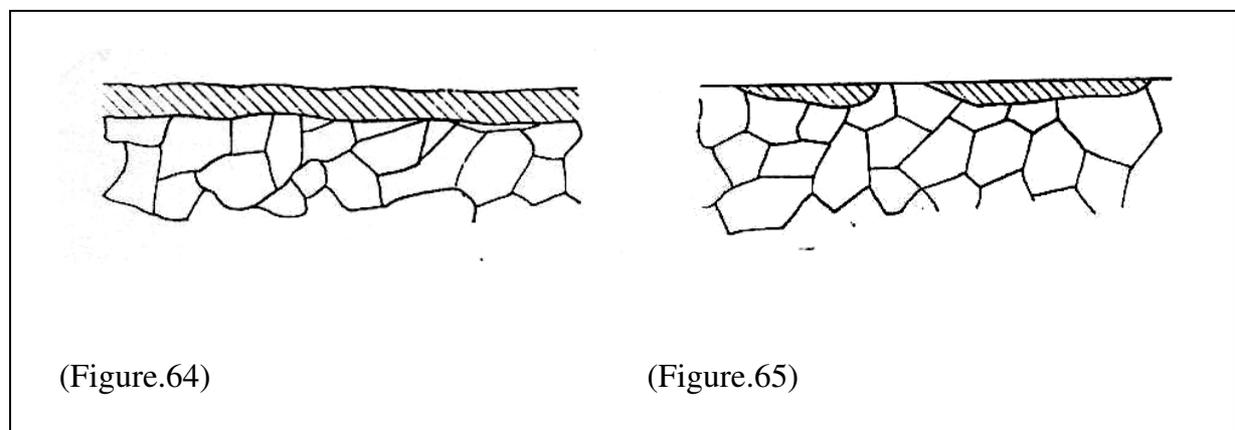
- La corrosion uniforme.
- La corrosion localisée.

2.11.1 La corrosion uniforme

C'est l'aspect de corrosion le plus rencontré dans la pratique, mais c'est l'aspect aussi le moins dangereux, car le métal est attaqué sur toute la surface et avec la même vitesse de corrosion. Les causes peuvent être chimiques, électrochimiques ou encore mécaniques.

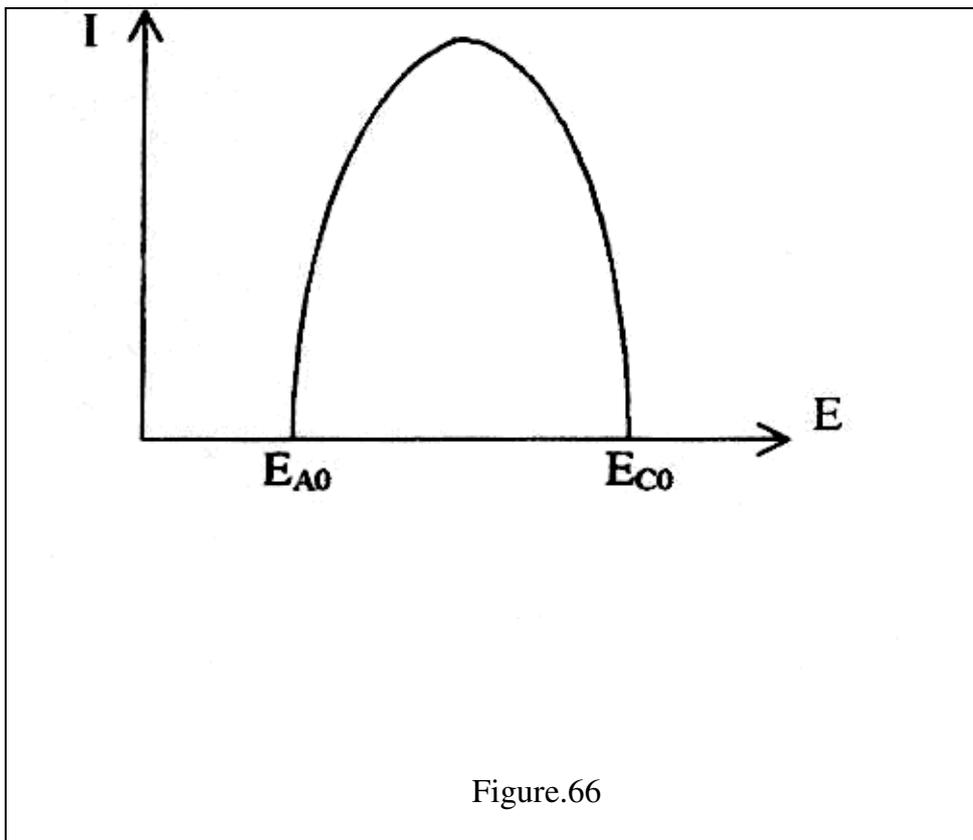
L'attaque de la surface sera très importante si cette dernière est rugueuse. A l'échelle macroscopique on ne distingue pas les lieux cathodiques des lieux anodiques, la surface entière du métal est simultanément cathode et anode (fig. 64). La corrosion non uniforme est celle qui n'est pas répartie sur toute la surface (fig. 65).

La corrosion uniforme peut être évitée par l'utilisation d'un revêtement ou par l'addition d'inhibiteur de corrosion ou encore par l'application de la protection cathodique.



2.11.2. La corrosion localisée

C'est une corrosion qui se déroule en un lieu spécifiquement anodique d'une surface ou d'une structure métallique. Elle diffère de la corrosion uniforme par la distinction claire des endroits anodiques et cathodiques. En pratique la corrosion localisée provient d'une hétérogénéité du matériau ou de l'environnement et souvent elle pose beaucoup de problèmes (fg. 66). Donc c'est l'aspect de corrosion le plus dangereux car l'attaque se fait en certains endroits de la surface du métal. La perte de masse est relativement faible, mais ce type de corrosion est dangereux dans le cas par exemple de perforation de conduite ou de récipient.



Les principales causes de cet aspect de corrosion sont :

- Surface de métal chimiquement hétérogène.
- Différence de potentiel dans les différentes zones du métal créées par la déformation.
- Endommagement local de la couche passive.

Les différents types de la corrosion localisée sont :

- Corrosion par piqûres.
- Corrosion intergranulaire (intercristalline).
- Corrosion sous contrainte.

- Corrosion avec érosion.
- Fragilisation par l'hydrogène.
- Corrosion sélective.
- Corrosion galvanique.
- Corrosion par crevasses.

2.11.2.1. Corrosion intergranulaire (intercristalline)

C'est une attaque sélective aux joints de grains, souvent, il s'agit de phases qui ont précipitées lors d'un traitement thermique. Donc le produit de corrosion se trouve aux joints de grains. L'attaque du métal s'effectue en profondeur, le long des joints de grains, ce qui conduit à une micro-fissure, alors la surface ne présente aucune altération.

La perte du métal est insignifiante, mais les caractéristiques sont sensiblement affectées, le métal peut se rompre sous un effort très faible (fig. 67).

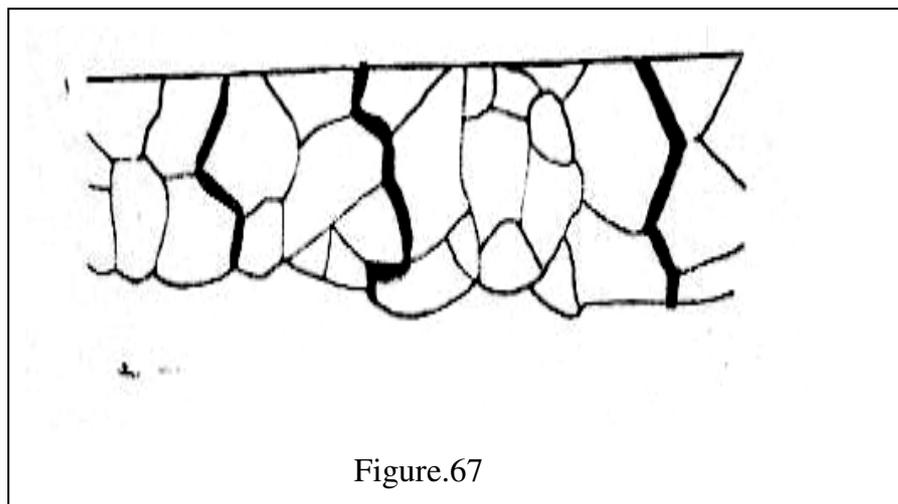


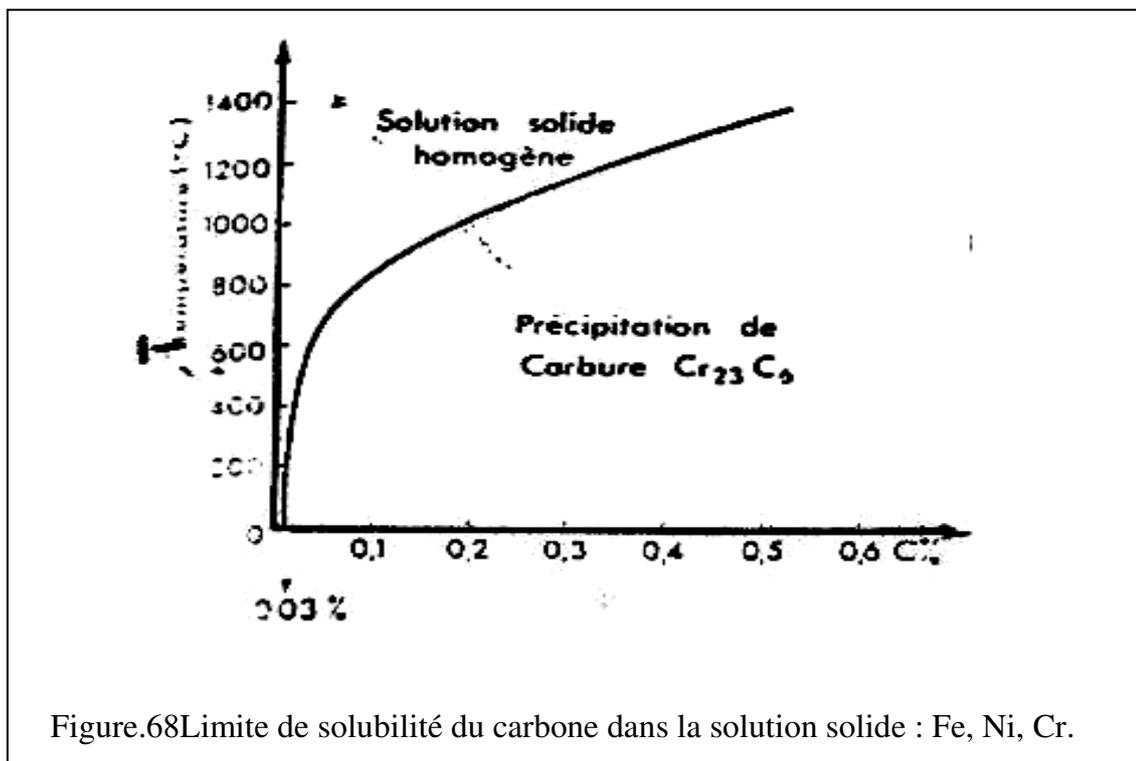
Figure.67

La présence des carbures dans les alliages, favorise la corrosion inter-granulaire surtout dans le cas des aciers inoxydables du type 18-10 (18 % Cr, 10 % Ni).

Par exemple, dans le cas du soudage de plaquettes d'acier inoxydable du type 18-10, il se forme alors au voisinage des joints de grains une zone déchromatisée dont la largeur n'excède pas 1 à 2 μm , la teneur en chrome de la zone déchromatisée est de 10 % tandis que celle du carbure de chrome (Cr_{23}C_6) contient 90 % de chrome.

En effet, l'alliage comporte au centre des cristaux une région contenant 18 % Cr, au voisinage des joints de grains un précipité de carbure de chrome. Ces trois phases possèdent un potentiel de corrosion différent et déterminent la formation de couples électrochimiques.

La figure 68 montre un acier refroidi lentement du type 18-10 et la température à partir de laquelle le carbure de chrome Cr_{23}C_6 se forme.



La figure 69 montre la précipitation de carbure de chrome aux joints de grains après traitement de sensibilisation pour l'acier 18-10.

Plusieurs actions peuvent être envisagées concernant les remèdes contre la corrosion inter-granulaire des aciers inoxydables du type 18-10.

- Abaisser la teneur en carbone jusqu'à une valeur inférieure à 0,03 %, limite de solubilité du carbone dans l'alliage à température ambiante.
- Recuire les pièces sensibles, cette méthode n'est pas utilisable industriellement, car les recuits doivent avoir une durée assez longue (environ 1000 heures), afin que la teneur en chrome soit uniforme. De plus, il s'agit de pièces de grandes dimensions, il n'est pas possible de pratiquer ces recuits.

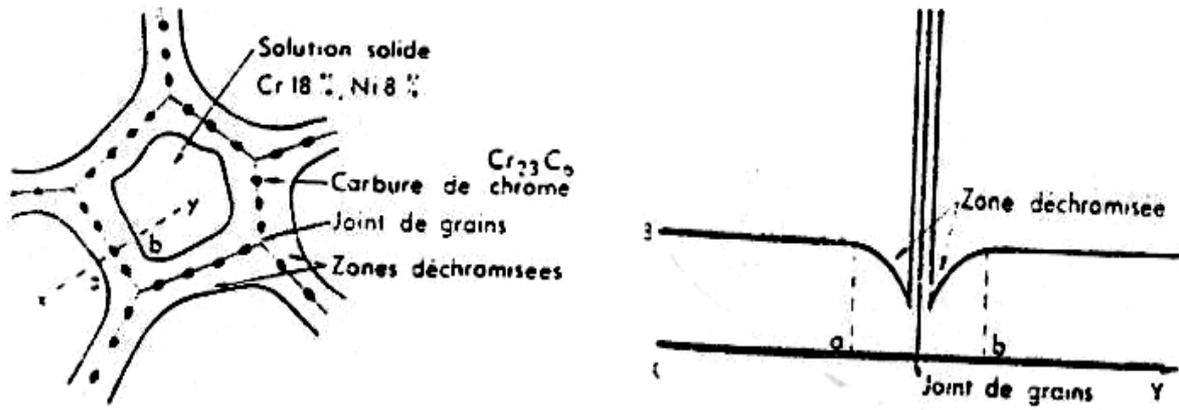


Figure.69 Acier inoxydable du type 18-10.

Schéma montrant la précipitation de carbure de chrome le long de la droite Y de chrome aux joints des grains après traitement de sensibilisation.

- Ajouter à l'alliage un élément alphasé comme le molybdène qui détermine la formation d'îlots de ferrite α aux joints de grains. L'austénite est plus riche en carbone parce que cet élément y est plus soluble que dans la ferrite, et la ferrite est plus riche en chrome. La précipitation s'effectue donc de préférence aux joints de grains de la ferrite. Ceux-ci sont isolés les uns des autres, si bien que la corrosion ne peut pas se propager dans toute la masse de l'alliage (fig. 70).

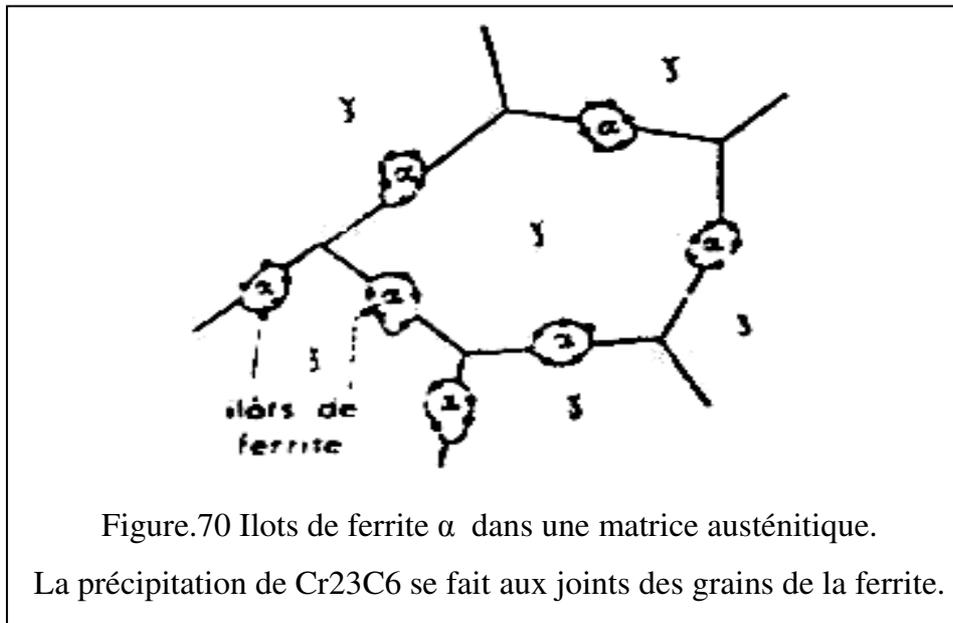


Figure.70 Îlots de ferrite α dans une matrice austénitique.

La précipitation de $Cr_{23}C_6$ se fait aux joints des grains de la ferrite.

- Ajouter à l'alliage un élément plus avide de carbone que le chrome, par exemple le niobium ou le titane, qui forment des carbures très stables sans modifier la teneur en chrome de la solution solide. L'acier est alors dit stabilisé.

2.11.2.2. Corrosion par piqûres

C'est un type de corrosion localisée (fig.71), qui se traduit à la surface du métal par la formation de trous étroits, et qui peuvent progresser rapidement en profondeur. L'origine des piqûres est liée à la présence d'hétérogénéité, qui en surface, détermine la formation de piles locales.

Bien que la quantité du métal corrodé soit faible, ce type de corrosion est très dangereux car il se produit en profondeur et peut conduire à la perforation des tôles même épaisses. L'hétérogénéité de la surface est due à des défauts du film passif qui favorisent la mise à nu locale du métal, il en résulte la formation d'une micro-pile entre le métal mis à nu qui joue le rôle d'anode, donc se corrode et le métal passif qui constitue la cathode. Les défauts du film passif ont pour origine la présence d'inclusions dans le métal d'ions agressifs tels que les chlorures provenant de la solution et absorbés à la surface métallique ou une cause extérieure liée à l'utilisation du matériau (rayures).

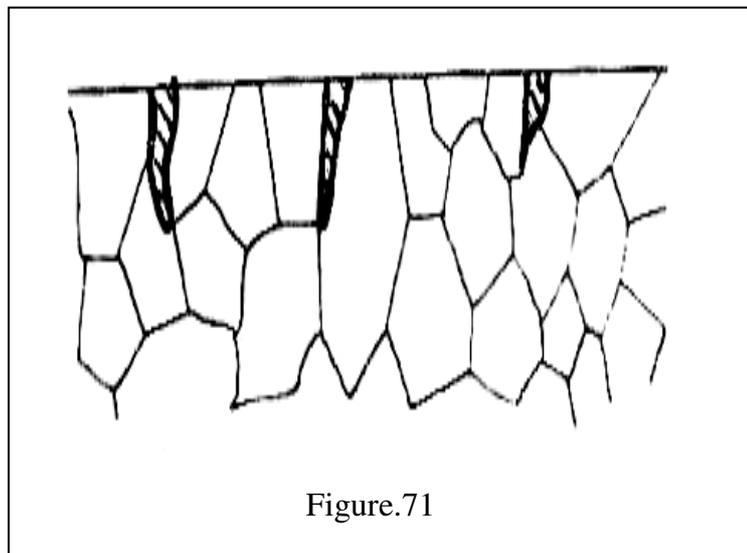
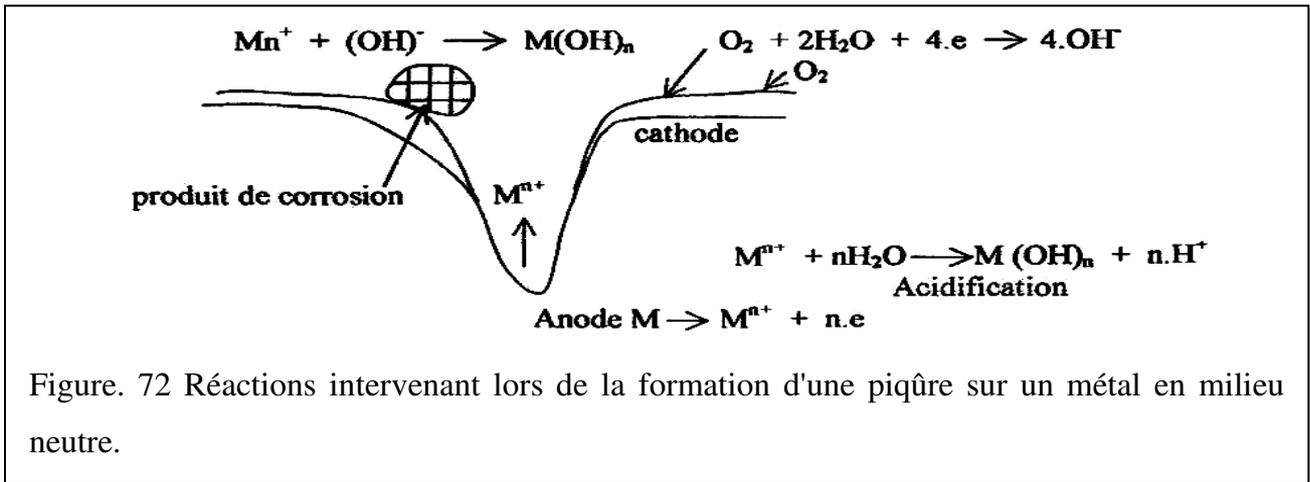


Figure.71

La présence de produit de corrosion à l'orifice de la piqûre ainsi la concentration élevée en oxygène dissous à la surface du métal peut favoriser la corrosion par piqûre fig.72



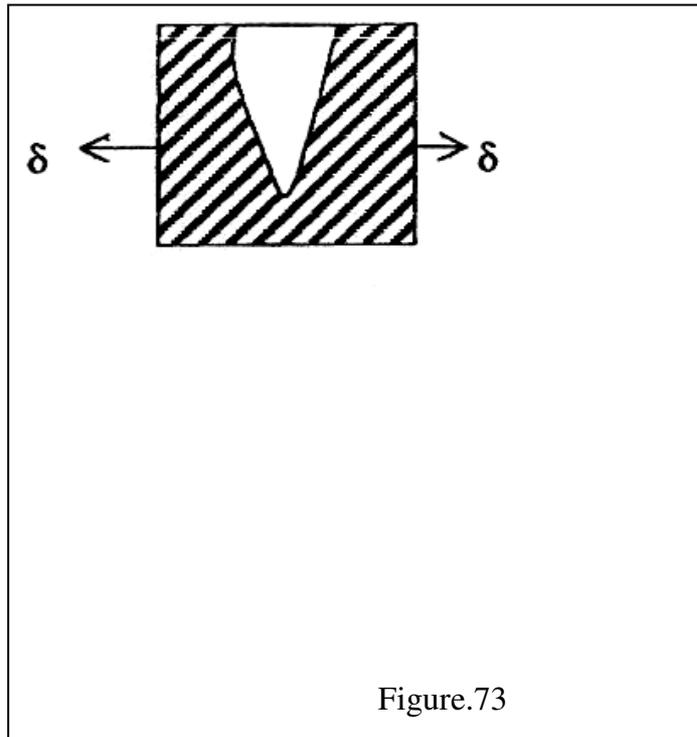
L'électrolyse des ions M^{n+} conduit à la formation d'ions H^+ qui acidifient le milieu en fond de piqûres (favorisent l'attaque). La corrosion par piqûres dépend beaucoup de la nature du matériau, du milieu et de l'agitation du bain et de la température. La pureté du matériau a une grande importance dans la résistance à la corrosion. Dans le cas des aciers inoxydables, le nickel et surtout le molybdène et le chrome augmentent la résistance à ce type de corrosion. Les ions chlorures et les halogénures en général, sont très agressifs. Les bains agités qui provoquent une bonne oxydation du milieu au contact du métal favorisent la résistance à la corrosion par piqûres. L'élévation de la température favorise la corrosion par piqûres.

Pour lutter contre la corrosion par piqûres, on peut envisager certaines méthodes telles que :

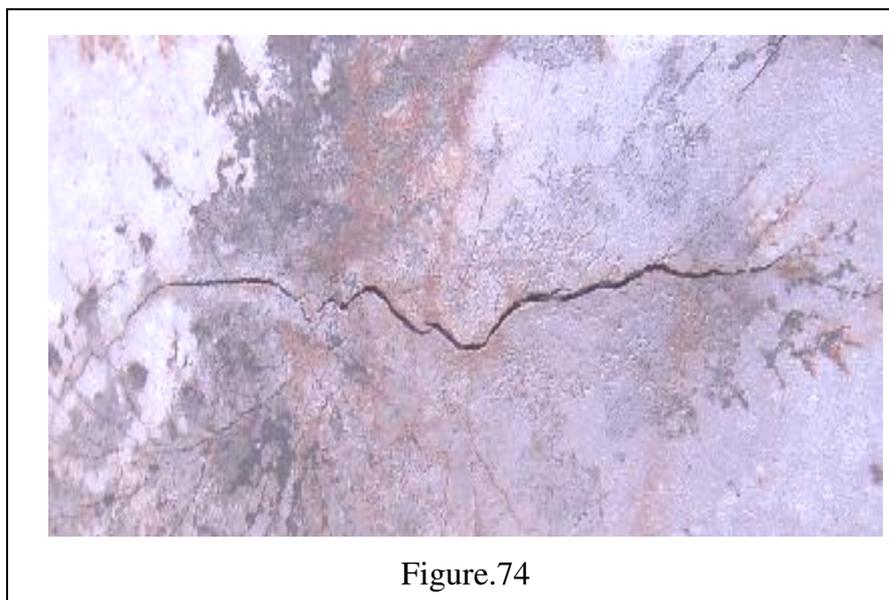
- Désaérer les solutions chlorurées ou au moins assurer par l'agitation une concentration uniforme en oxygène dissous.
- Abaisser la température d'emploi.
- Appliquer la protection cathodique dans les milieux qui ne sont pas trop résistants (l'eau de nier).

2.11.2.3. Corrosion sous contrainte (C.S.C)

Il s'agit d'un type de corrosion tout à fait général qui se produit sous l'action commune d'une contrainte mécanique et d'un milieu corrosif (fig. 73). En l'absence de la contrainte, le phénomène ne se produit pas. La C.S.C se manifeste sous la forme de fissures qui peuvent être intergranulaires, soit transgranulaires. Les contraintes peuvent être, d'origine interne, provenant des opérations de mises en forme et des traitements thermiques, ou d'origine externe, qui résultent des conditions d'utilisation.



La figure 74 représente la corrosion transgranulaire d'un acier inoxydable.



Les pertes de poids des matériaux corrodés sont en général très faibles car la corrosion est localisée. Ce type de corrosion a des conséquences pratiques importantes, étant donné la variété des matériaux métalliques qui, en sont le siège et le caractère du phénomène difficilement prévisible. Dans le cas des alliages sensibles à la corrosion, quatre périodes caractérisent le phénomène (fig. 75).

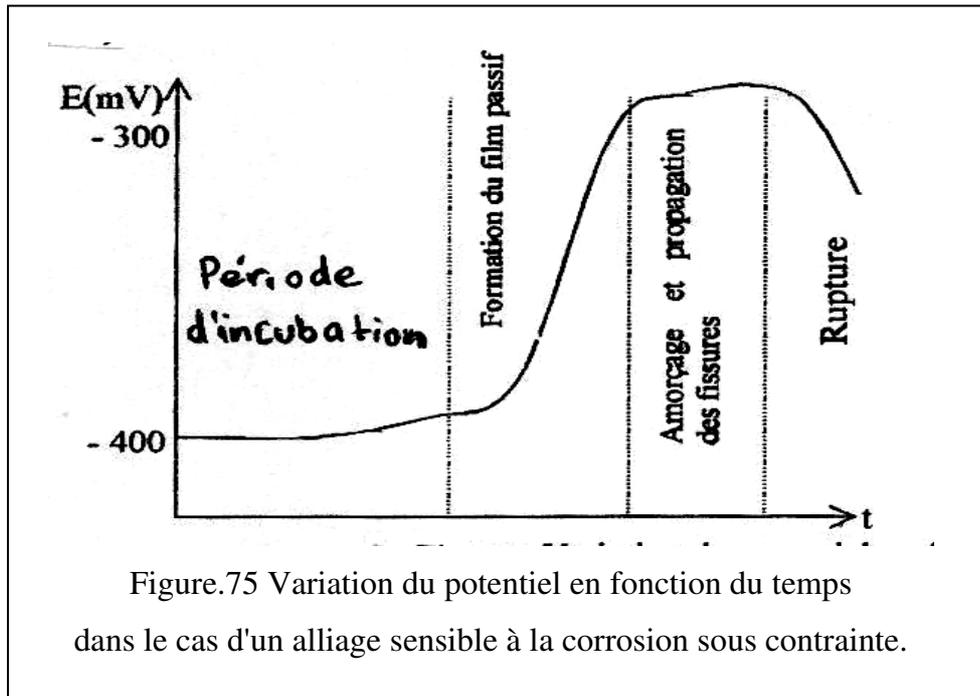


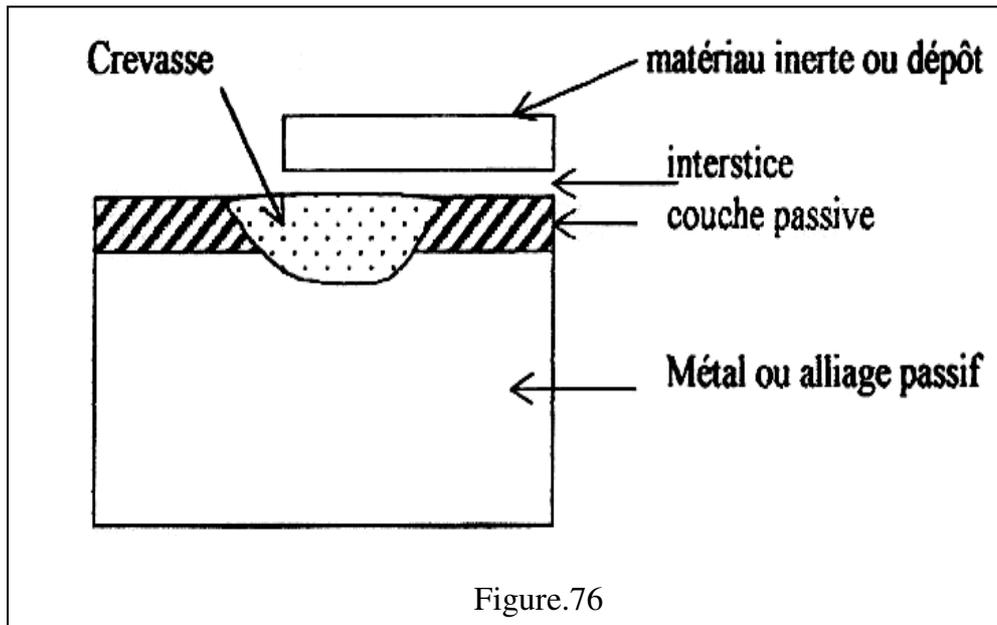
Figure.75 Variation du potentiel en fonction du temps dans le cas d'un alliage sensible à la corrosion sous contrainte.

Les facteurs qui influent sur la C.S.C sont les contraintes, la nature du milieu environnant, le temps, l'état de surface et la température. La protection contre la C.S.C peut se faire en agissant sur les différents facteurs qui interviennent en C.S.C, notamment :

- Elimination ou diminution des contraintes par traitement thermique.
- Elimination des ions agressifs spécifiques.
- Traitement de surface éliminant les contraintes dues à l'usinage.
- Diminution de la température d'emploi.
- Protection cathodique.
- Utilisation d'inhibiteurs de corrosion.
- Choix judicieux du matériau et des traitements thermiques et mécaniques convenables.

2.11.2.4. Corrosion par crevasses (caverneuse)

Elle peut apparaître lorsqu'une pièce métallique est au contact d'un électrolyte dont le renouvellement n'est pas assuré : interstices entre matériaux de même nature, dépôts divers, sous matériau isolants, etc. Le processus de développement de la corrosion par crevasse (caverneuse), n'est pas fondamentalement différent de celui de la corrosion par piqûres. Cependant, la cinétique et la morphologie de l'attaque sont toutes autres. Celle-ci s'étend en largeur à la surface de l'interstice ou sous le dépôt, et non pas en profondeur comme pour les piqûres (fig. 76).



L'anode, dans l'interstice, est le siège d'une réaction d'oxydation du métal tandis que le reste de la surface est la cathode où se produit la réduction de l'oxygène.

La corrosion par crevasses peut prendre un caractère dangereux, notamment dans l'eau de mer. La prévention contre la corrosion cavernueuse impose l'utilisation d'assemblages sans interstices, soudés par exemple. Le nettoyage des dépôts et salissures, l'utilisation de joints solides et non poreux.

2.11.2.5. Fragilisation par l'hydrogène

L'hydrogène est un élément qui peut aisément diffuser dans les métaux et altérer leurs propriétés mécaniques. Ce phénomène a des conséquences pratiques considérables car il a de multiples occasions de pénétrer dans les aciers (élaboration, décapage, soudage, dépôts galvaniques, utilisation en milieu humide, hydrogène sulfuré, etc.) et il en résulte parfois, des ruptures catastrophiques immédiates ou différées selon les moyens de s'en prémunir, il existe trois types de fragilisations :

a. La fragilisation par décarburation : qui survient à partir de 200°C et s'accompagne de formation de méthane et elle est bien connue. Pour s'en prémunir, il faut utiliser des aciers alliés pour que le carbone se trouve engagé dans des carbures plus stables que la cémentite. Il faut avoir à l'esprit que toute installation fonctionnant à une température supérieure à 200°C passe forcément par la température ambiante lors des arrêts et est alors, susceptible de subir les autres types de fragilisation.

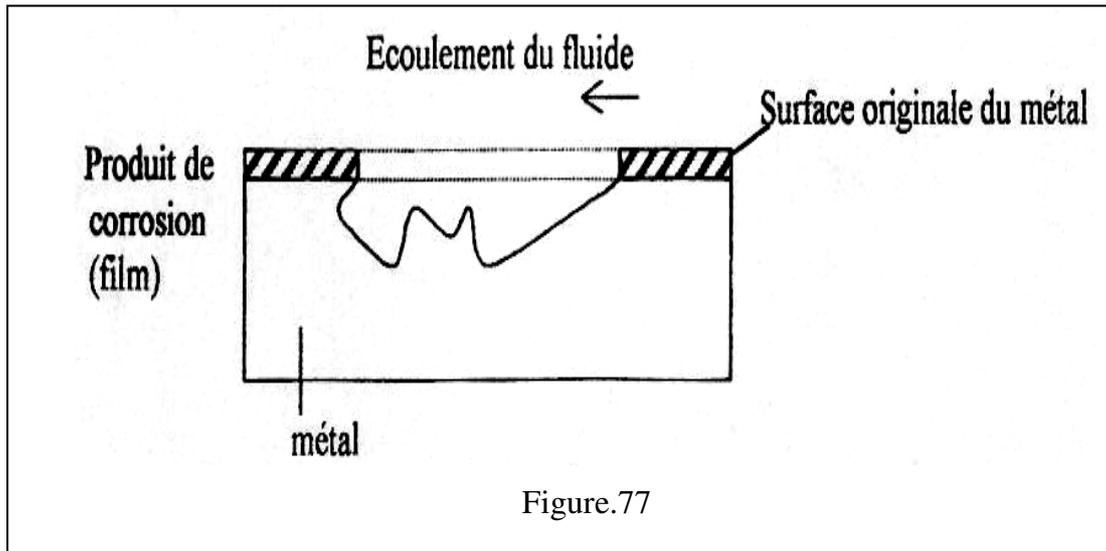
b. La formation de soufflures : pouvant amener une fissuration en gradins. Ce phénomène est dû à la recombinaison de l'hydrogène qui a pénétré dans le métal sous forme atomique en hydrogène moléculaire susceptible d'établir des pressions très élevées dans des poches à l'intérieur du métal. Ces poches peuvent communiquer, amenant un dédoublement de la tôle. Pour s'en prémunir contre cet effet, on préconise des additions de Ca dans l'acier (pour globuliser les précipités) de 0,3 % surtout en milieu H_2S et l'utilisation d'aciers contenant peu de petites inclusions réparties uniformément.

c. Le fragilisation par l'hydrogène dissous en présence de contrainte : C'est de loin, le phénomène le plus dangereux (car sa propagation est très rapide), le plus complexe (car on ne peut pas définir une cause mais des facteurs de risque). Aussi il est le moins connu (car il existe beaucoup de théorie qui ne sont pas susceptibles de décrire le tout). Tous les aciers sont atteints à des degrés divers. Toutes les propriétés mécaniques sont altérées à l'exception de la résilience sur l'état recuit.

La fragilisation peut se traduire par une rupture immédiate pour une contrainte très inférieure à la limite d'élasticité du métal exempt d'hydrogène. Elle peut intervenir au bout d'un certain temps, c'est la rupture différée. Les contraintes appliquées ou provenant d'érouissage, changement de phase, etc., peuvent être à l'origine de la rupture. Les facteurs de risque sont la teneur en H_2 , la structure et la composition de l'acier, sa limite d'élasticité, sa mise en oeuvre. Pour lutter contre ce phénomène, on doit limiter les possibilités de pénétration de l' H_2 , utiliser les structures stables et peu sensibles comme les structures martensitiques. Les aciers à haute limite d'élasticité, ont tendance à être plus altérés par l' H_2 que les aciers à faible limite d'élasticité.

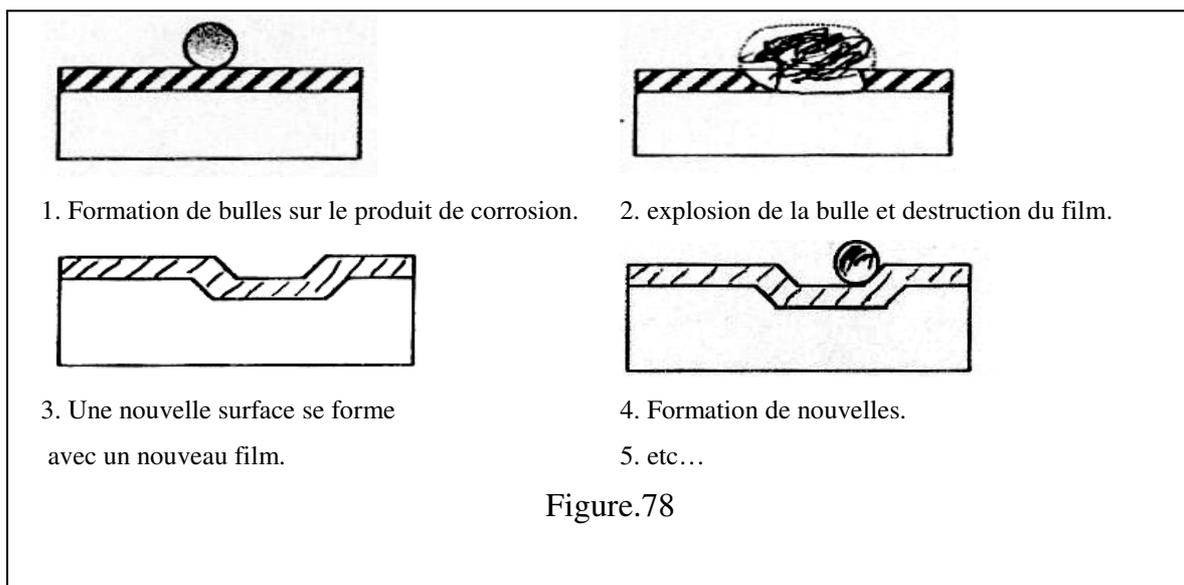
2.11.2.6. Corrosion par érosion

Elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière. Elle a souvent lieu sur des métaux exposés à l'écoulement rapide de fluide (fig. 77).



Lorsque les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et continu à la surface du métal, la vitesse de corrosion est généralement diminuée si cette dernière est éliminée en certains points, par abrasion du métal due à l'écoulement du liquide ou particules solides. Il y a donc accélération de la corrosion.

Une forme spéciale de corrosion par érosion est la corrosion par cavitation, qui se produit dans les turbines hydrauliques, pompes etc. Ce type de corrosion est causé par la formation et l'explosion de bulles de vapeur dans un liquide en contact de la surface du métal (fig. 78).



2.11.2.7. Corrosion galvanique

Appelée aussi corrosion bimétallique, elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux et la dégradation du métal le moins résistant s'intensifie.

2.11.2.8. Corrosion sélective

C'est l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse.

2.12. Moyens de protection contre la corrosion

La corrosion étant le résultat de l'action entre deux partenaires, le métal ou l'alliage d'une part, et la solution (réactif), d'autre part. Il sera impossible de lutter contre ce phénomène, en agissant sur l'un ou l'autre des deux partenaires. En ce qui concerne la solution, il est, la plus part du temps, impossible de modifier sa nature. Seule l'addition de faibles quantités d'un corps appelé inhibiteur de corrosion pourra être faite. Généralement, il est plus facile d'agir sur la nature du métal, par exemple, en utilisant un métal noble ou un alliage inerte chimiquement ou passif dans le milieu considéré.

Donc la protection contre la corrosion a pour but de garantir une certaine durée de vie à un matériau pour un coût minimal. Les méthodes essentielles de protection de prévention contre la corrosion sont les suivantes :

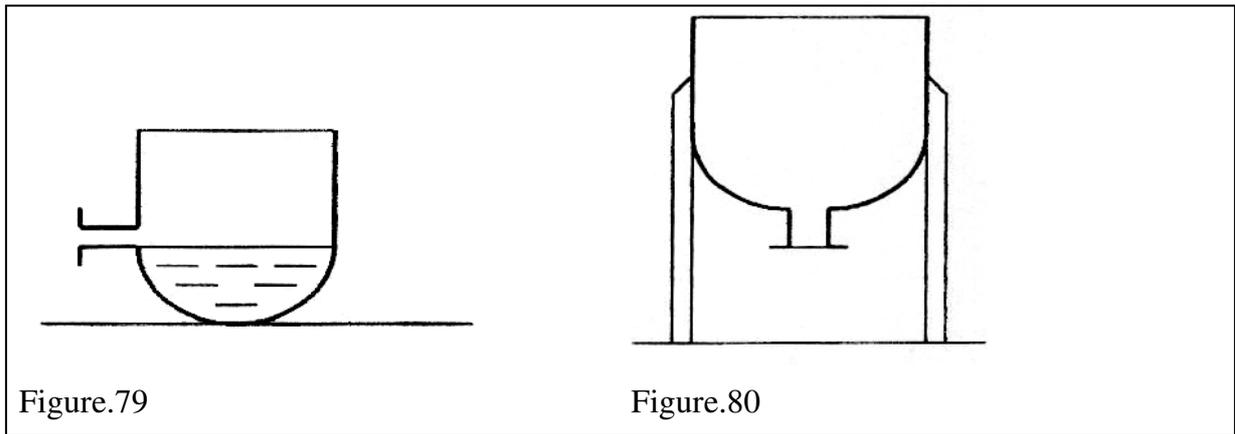
- Prévention par une forme adaptée des pièces.
- Prévention par un choix judicieux des matériaux.
- Protection par revêtements.
- Protection par inhibiteurs de corrosion.
- Protection électrochimique.

2.12.1. Prévention par une forme adaptée des pièces

En donnant une forme adaptée aux objets, on peut diminuer les risques de corrosion car la forme d'un objet peut influencer sa durée de vie de façon déterminante. Les exemples suivants illustrent ces propos.

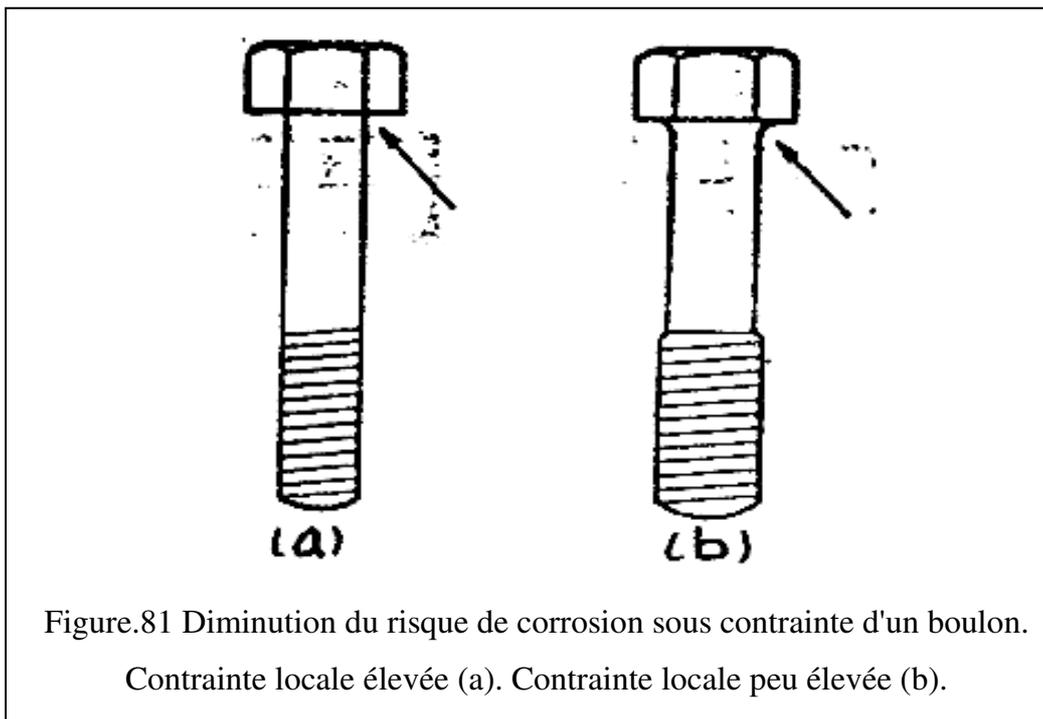
a. Zones humides

En industrie chimique, il faut assurer une vidange complète des récipients pendant la phase de non exploitation. La diminution du risque de corrosion à l'intérieur d'un réacteur chimique, pendant les temps morts, est schématisée par une vidange incomplète (fig.79), favorisant la corrosion et une vidange complète (fig.80), diminuant le risque de corrosion.



b. Contraintes :

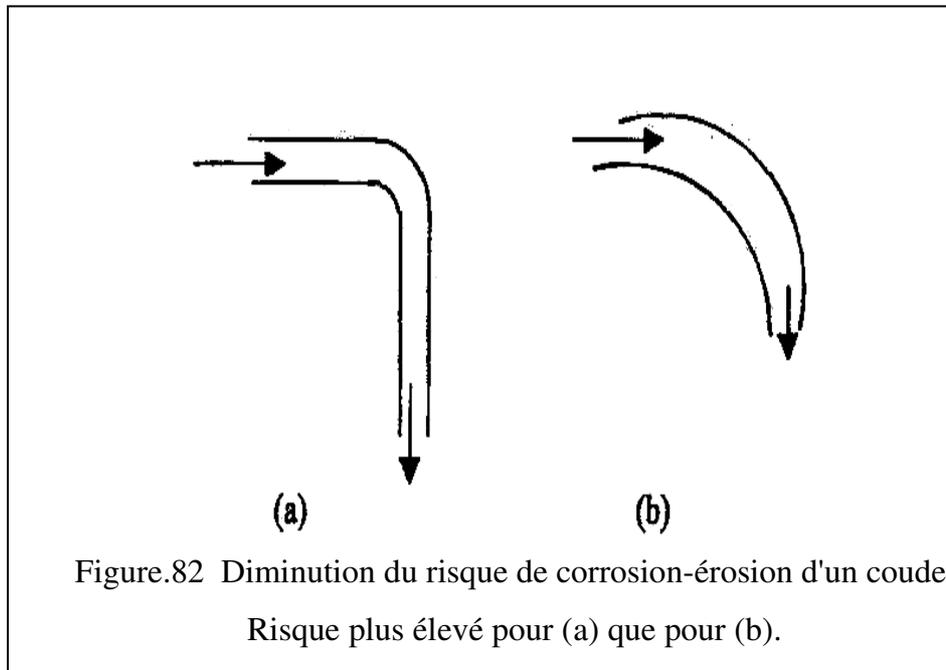
La distribution des contraintes dans une pièce influence sa sensibilité à la corrosion sous contrainte. Une forme arrondie au voisinage de la tête d'un boulon évite la concentration des contraintes (fig. 81).



L'usinage introduit souvent des contraintes résiduelles dans les pièces, un traitement thermique adéquat permet alors de les réduire, indépendamment de la forme.

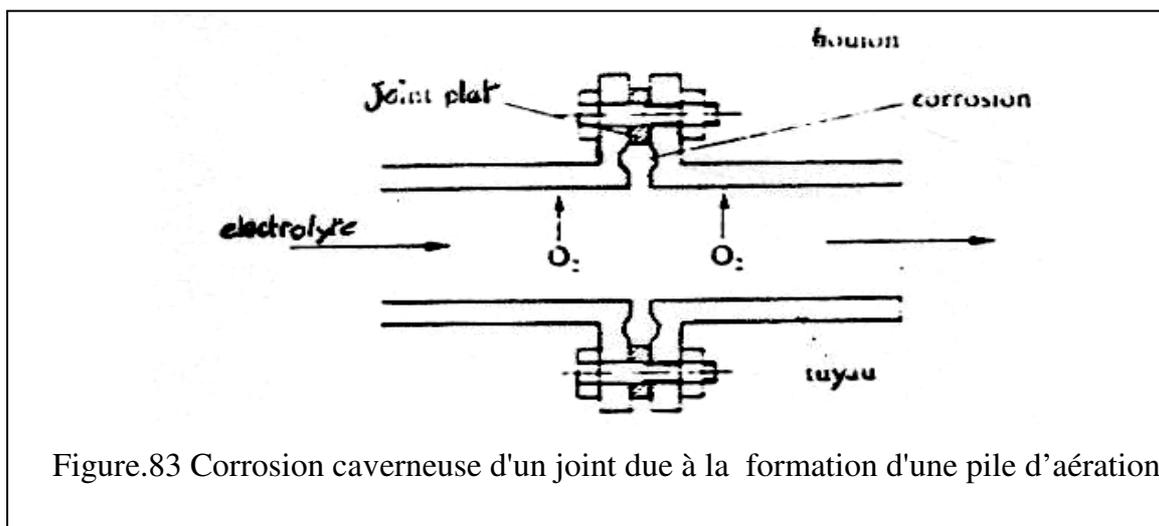
c. Ecoulement des fluides :

Une conception judicieuse de l'écoulement des fluides réduit le risque de corrosion par érosion et de corrosion par cavitation. Il faut éviter les changements brusques de direction. Le rayon du coude d'une conduite doit être supérieur à 3 fois son diamètre (fig. 82).



d. Endroits inaccessibles :

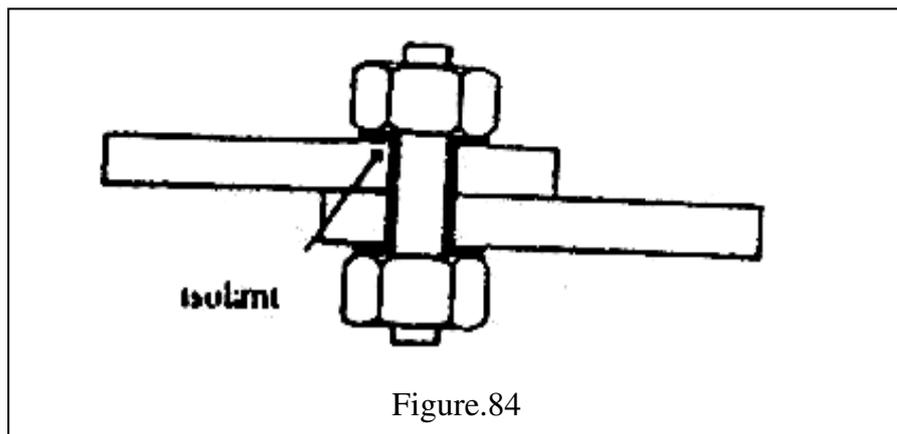
Les fentes et autres endroits inaccessibles permettent la formation de piles d'aération et amènent la corrosion cavernueuse. Une fente due à un joint mal dimensionné par exemple, (fig. 83).



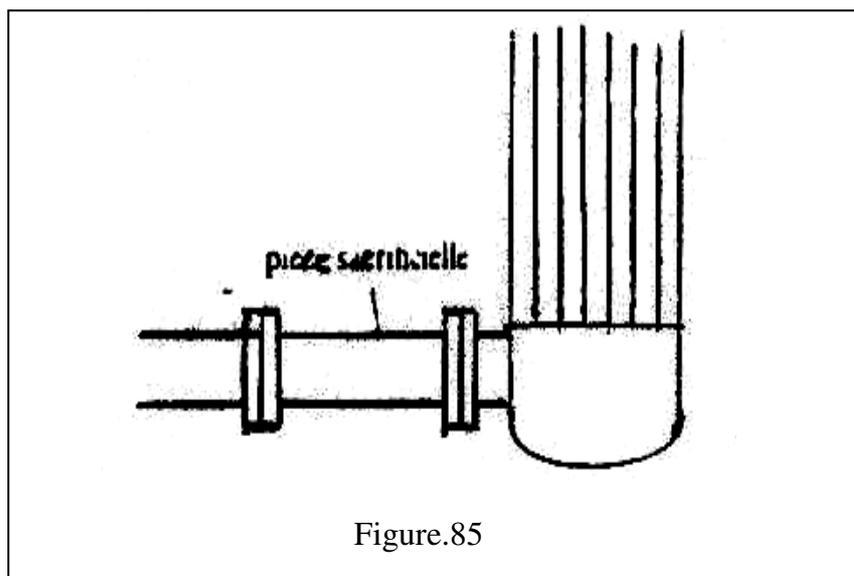
L'emploi de pièces soudées, est de ce point de vue, souvent préférable à celui d'assemblages rivetés ou vissés.

e. Contact entre matériaux différents :

Un contact électrique et électrolytique entre différents métaux permet la formation de piles galvaniques, causant une corrosion accélérée du métal moins noble. Par un choix adapté des matériaux, en séparant différents métaux par un isolant, on évite ce type de corrosion (fig. 84).



Dans les installations de taille importante, il n'est pas toujours possible d'isoler électriquement différents métaux. L'emploi de pièces sacrificielles, peu coûteuses et facilement remplaçables, permet de résoudre le problème dans certains cas. Par exemple, le cas de la figure 85, elle représentant une pièce sacrificielle en acier, placée entre une conduite en laiton et un échangeur de chaleur en acier.



2.12.2. Prévention par le choix du matériau

Le choix du matériau doit principalement tenir en compte de l'influence défavorable et des conditions de fonctionnement. Il n'existe pas de métaux ou alliages qui ont une résistance absolue à la corrosion, mais on connaît uniquement des matériaux résistants à la corrosion dans certains milieux agressifs. Le comportement à la corrosion n'est qu'un critère parmi d'autres dans le choix des matériaux, bien qu'il s'avère souvent, déterminant. La résistance à la corrosion est une propriété du système métal-milieu et non du métal seul. Le tableau ci-dessous indique la résistance intrinsèque à la corrosion de quelques métaux purs dans les différents milieux.

Milieu	Fe	Cr	Ni	Cu	Al	Zn	Ti	Ta
Air humide	-	+	+	+	+	m	+	+
Eau froide naturelle aérée	m	+	+	+	-	+	+	+
Eau de mer	-	+	+	m	m	-	+	+
Acide non oxydant	-	m	m	+	-	-	+	+
Acide oxydant	-	+	m	-	-	-	+	+
Acide + Cl ⁻	-	+	m	-	-	-	m	+
Base + O ₂	+	+	+	+	-	-	+	m
Oxydation à haute température	m	+	+	-	-	-	m	-

+ : Bonne résistance, m : Résistance moyenne, - : Mauvaise résistance

2.12.3. Résistance des alliages à la corrosion

Le comportement à la corrosion des alliages s'apparente souvent à celui du métal principal qu'ils contiennent.

a. Aciers au carbone et aciers inoxydables :

Généralement les aciers au carbone rouillent au contact de l'air humide et doivent être protégés par revêtement. Les aciers inoxydables résistent bien à la corrosion grâce à l'emploi du chrome surtout comme élément d'alliage, car le chrome est normalement passif et résiste bien à la corrosion. Pur, il ne sert que sous forme de revêtement car sa fragilité le rend inapte à un emploi massif.

Quand la teneur en chrome dépasse 12 à 13 %, les aciers deviennent inoxydables. Au contact de l'air humide, un film passif protecteur se forme spontanément et empêche l'acier de rouiller. Ils peuvent contenir d'autres éléments en faibles quantités notamment du Cu, Mn,

W, Ti, Nb, Ta, P, Si, N, plus le % Cr croit, plus la résistance croit car cet élément stabilise le film passif.

Malheureusement les aciers à haute teneur en chrome, coûtent cher et leur mise en oeuvre (formage, soudage) est plus délicate que celle des autres aciers inoxydables courants contenant 13 à 18 % Cr.

On divise généralement les aciers inoxydables en six familles, dont le tableau ci-dessous expose les compositions chimiques des six familles d'aciers inoxydables.

Six Familles	Structure cristalline	Cr	Ni	Mo	C	S	N
Martensitique	Tetrag.	12-18	0-2	> 0,75	0,2	< 0,03	-
Ferritique	cc	12-24	0-2	0-0,75	0,1	< 0,03	-
Austénitique	cfc	18-20	8-14	0-3	< 0,08	< 0,03	-
Super-ferritique	cc	26-39	0,3-4	3-4	< 0,02	< 0,01	0,02
Super-austénitique	cfc	20	18-25	6-6,5	0,02	< 0,002	0,2
Duplexe ou auténo-ferritique	cfc + cc	22-26	6-7	4-4	0,02-0,04	0,001-0,03	0,2

Le molybdène et l'azote améliorent la résistance à la corrosion par piqûres en milieu chlorure, le soufre diminue la résistance à la corrosion, une teneur en carbone réduite et de faibles quantités de Nb ou Ta minimisent le risque d'une corrosion intergranulaire.

b. Alliage de nickel :A l'instar du chrome, le nickel pur sert surtout comme revêtement. Le nickel résiste bien aux solutions neutres et alcalines, ainsi qu'à la corrosion atmosphérique, Il ne résiste toutefois pas bien aux acides oxydants. De nombreux alliages de nickel, notamment ceux à base de Cu, de Cr ou de Fe possèdent à la fois de bonnes propriétés

mécaniques et une résistance à la corrosion élevée. En raison de leurs prix très élevés, leur utilisation est limitée.

Les différents types d'alliages de nickel sont désignés sur le tableau ci-dessous.

Famille	Désig.	Ni	Cr	Fe	Mo	W	Cu	Autres
Ni	200	99,2		< 0,4				
Ni-Cu	400	Cd 67		1,25			31,5	1 Si
Ni-Mo	B		< 1	5	26			
Ni-Cr-Fe	600	Cd 76	16	8			< 0,5	1,35 Al
	800	32,5	21	44			< 0,75	1 Si
Ni-CR-Fe-Mo	825	42	21,5	29	3	< 1	2	1 Ti
	G	43	22	19,5	6,5	< 1	2	2 Nb
Ni-Cr-Mo-W	C-270	57	15,5	5,5	16	4		
	C-22	56	22	< 3	13	3		

c. Alliages de cuivre :

Le cuivre résiste bien à la corrosion dans l'air, de même que dans l'eau chaude ou froide avec des vitesses d'écoulement ne dépassant pas 1 m/s. Il résiste aussi en milieu acide car il possède un potentiel plus noble que l'hydrogène. Par contre il se corrode en présence d'oxydants ayant un potentiel standard supérieur. Le tableau suivant indique les principales familles d'alliage de cuivre.

Famille	Composé	Exemples	Nom
Laiton	Cu-Zn	Cu-30Zn	Laiton jaune
		Cu-30Zn-1Sn	Laiton d'amiante
		Cu-40Zn-0,75Sn	Laiton naval
Bronze	Cu-Sn	Cu-Sn-P	Bronzes au phosphore
		Cu-Al-Ni-Fe-Si-Sn	Bronzes-aluminium
		Cu-Si-Sn	Bronzes au silicium
Cuivre-Nickel	Cu-Ni	Cu-30Ni-2Fe	Monel
		65Cu-18Ni-17Zn	Cuivre-nickel-zinc

Les laitons (Cu-Zn) ont un comportement à la corrosion semblable à celui du cuivre. On ajoute parfois en faibles quantités Sn, As, Sb, ou P pour diminuer la sensibilité à une attaque de corrosion sélective.

Les bronzes (Cu-Sn) contenant de l'aluminium résistent mieux à la corrosion-érosion que le cuivre et les laitons, car il y a incorporation d'oxyde Al_2O_3 dans les films superficiels.

Les alliages de Cu-Ni, résistent généralement bien en milieu salin neutre contrairement aux laitons, ils ont une sensibilité réduite à la corrosion sans contrainte.

d. Alliages d'aluminium :

L'aluminium résiste bien à la corrosion atmosphérique, car il est protégé par un film d'oxyde stable. La résistance à la corrosion uniforme des alliages d'aluminium dépend, quelque peu, de leur composition et ne diffère généralement pas beaucoup de celle du métal pur. Les principaux alliages d'aluminium sont Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu. Le fer et le cuivre réduisent la tenue à la corrosion.

e. Alliages de titane :

Le titane forme des films passifs stables de TiO_2 , et de ce fait, possède une très bonne résistance à la corrosion en milieu acide oxydant et en milieu chlorure. En milieu réducteur, le titane devient plus sensible à la corrosion, car la formation du film passif, nécessite la présence d'un oxydant. Les principaux éléments d'alliages de titane sont l'aluminium et le vanadium, on les trouve dans les alliages tels que Ti-3Al-2,5V, Ti-6Al-4V. Le comportement à la corrosion de ces alliages ressemble à celui du titane.

2.12.4. Protection par revêtements

Plusieurs types de revêtements sont utilisés et nécessitent tous une préparation de la surface du métal de base, de façon à ce que le revêtement soit adhérent. La mise à nu ou décapage des métaux ferreux est particulièrement importante.

Décapage des métaux ferreux :

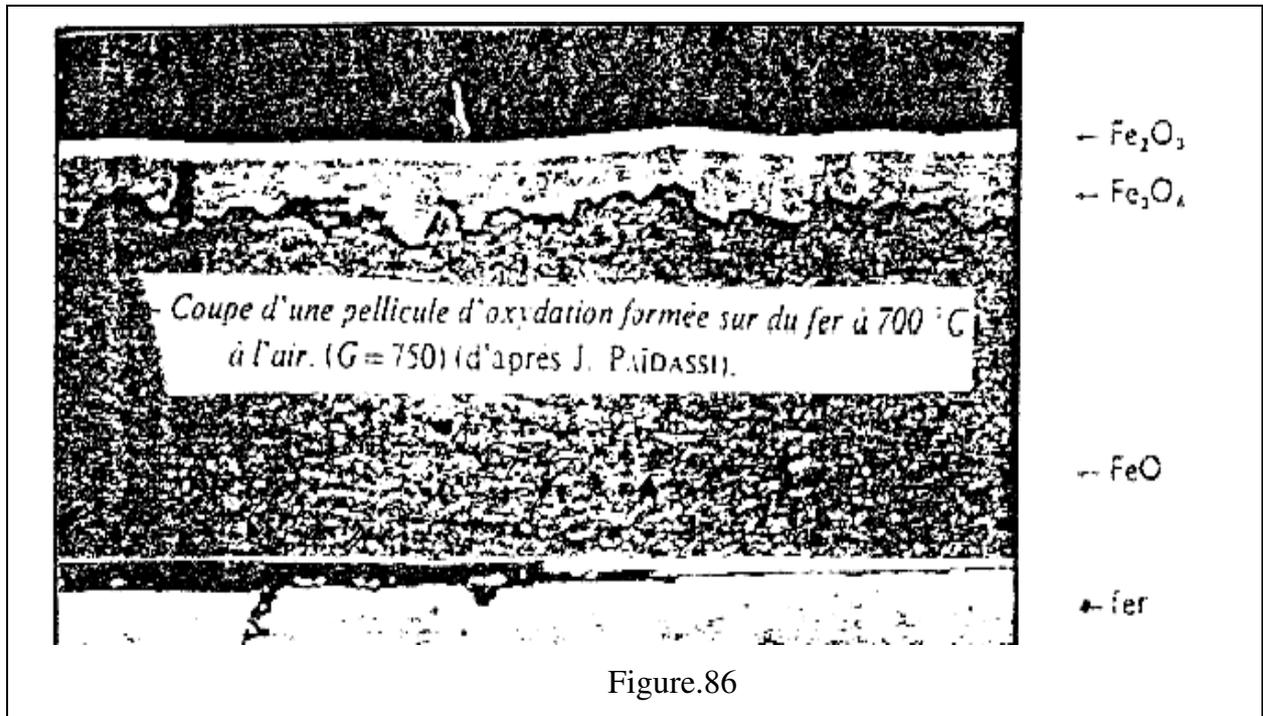
En général toutes les surfaces des pièces sont recouvertes soit de :

- Corps gras destinés à éviter la corrosion pendant leur stockage.
- Rouille.
- Oxydes de fer qui se sont formés à haute température pendant les opérations de traitement thermique ou de traitements mécaniques.

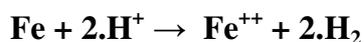
Le décapage peut être effectué par voie mécanique, brossage, sablage, grenailage ou par voie chimique. L'élimination des corps gras est faite par des solvants chlorés et des détergents alcalins. La rouille est, le plus souvent, éliminée par les acides, en ce qui concerne

les oxydes formés à haute température (calamine), leur composition dépend de la température à laquelle la pièce a été portée.

$T < 570^{\circ}\text{C}$: magnétite Fe_3O_4 au contact du métal et de ses oxydes Fe_2O_3 à la partie supérieure de la pellicule. $T > 570^{\circ}\text{C}$: Protoxyde de fer FeO qui se forme au contact du métal, puis Fe_3O_4 et enfin Fe_2O_3 , (fig. 86).



L'élimination de ces oxydes se fait par l'acide chlorhydrique 5N à 30°C ou l'acide sulfurique à 2N entre 50 et 80°C ou encore l'acide citrique. Le danger principal du décapage du fer réside dans la formation d'hydrogène qui a tendance à pénétrer dans le fer et à le fragiliser.



2.2.4.1. Protection par revêtements non métalliques

Il s'agit principalement des peintures et matières plastiques. Elles doivent posséder un certain nombre de qualités telles que l'imperméabilité à l'eau et aux gaz, la grande adhérence, la stabilité chimique, l'élasticité élevées et la bonne résistance à l'usure.

a. Peintures :

Pour les peintures, plus l'adhérence est bonne, plus ces conditions sont remplies. L'importance économique des peintures dépasse de loin celle des autres méthodes de protection contre la corrosion. La plupart des métaux sont protégés par des peintures. Il est nécessaire d'appliquer deux ou plusieurs couches. Certaines peintures contiennent des

pigments qui agissent comme primaires anti-corrosion. Les principaux constituants d'une peinture sont :

- Le liant : C'est le composant le plus important d'une peinture, il assure la cohésion du film et son adhérence au substrat (PVA, PVC, époxydes, etc.).

- Le solvant : permet d'appliquer la peinture à l'état liquide (l'huile de lin, solvants organiques) une fois la peinture appliquée, l'eau s'évapore et le liant qui possède normalement une masse moléculaire élevée, forme un film compact par coagulation.

- Les pigments : sont des composés que l'on ajoute aux peintures pour donner la couleur, les plus connus sont Pb_3O_4 , $ZnCrO_4$. Ils sont toxiques.

- Les additifs et les charges : sont destinées à modifier certaines propriétés des peintures comme la viscosité, la résistance à l'oxydation ou la tension de surface. Les charges, substances bonnes marchées, telles que l'oxyde de titane ou le carbonate de calcium augmentent la masse et le volume des peintures. Elles peuvent également améliorer certaines propriétés de films comme la résistance à l'abrasion.

b. Matières plastiques :

L'utilisation des revêtements plastiques pour les métaux, s'accommode bien pour la protection contre la corrosion. Ils présentent beaucoup d'avantages par rapport aux peintures, tels que l'épaisseur de la couche (100 à 500 μm), en même temps, il joue le rôle d'isolateur. L'inconvénient des plastiques, réside dans la faible résistance à la température et leur instabilité dans plusieurs solvants organiques. Les revêtements plastiques utilisés sont :

- Les thermoplastes (polyéthylène, polypropylène, PVC, ..).
- Les caoutchoucs (naturels ou synthétiques).
- Les thermodurcissables (polyuréthanes, époxydes, polyesters).

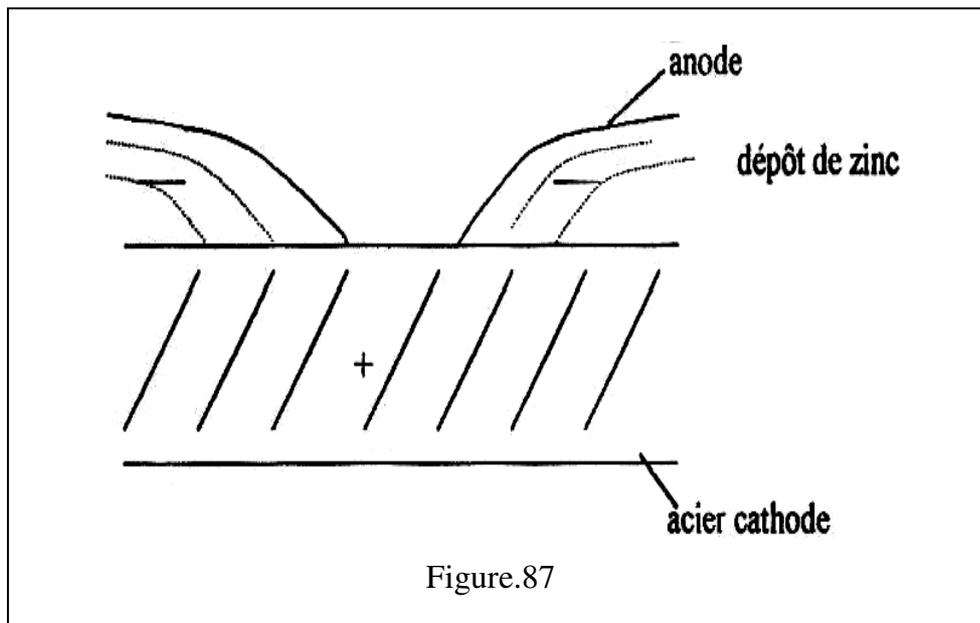
En général le revêtement par les matières plastiques se fait de la façon suivante : la pièce à revêtir est préchauffée puis saupoudrée avec les grains de matière plastique ou plongée dans un lit fluidisé de la poudre.

2.12.4.2. Protection par revêtements métalliques

Les revêtements métalliques sont couramment employés pour protéger l'acier contre la corrosion atmosphérique. Les revêtements métalliques, outre leur effet anti-corrosion, remplissent souvent une fonction décorative. On les utilise aussi comme protection contre l'usure. Il existe deux types de revêtements métalliques ceux plus nobles que le substrat cathodique et ceux moins nobles que le substrat anodique.

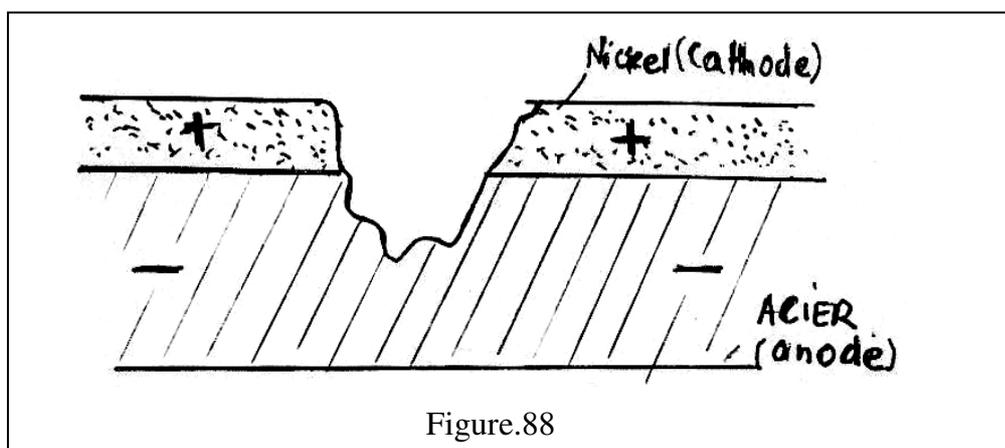
a. Revêtement anodique :

Dans le cas des aciers, le zinc, le cadmium et l'aluminium forment des revêtements moins nobles que l'acier (voir classification électrochimique). Dans le cas d'un revêtement de zinc par exemple, (fig.87), l'acier constitue la cathode de la pile, c'est donc le zinc qui est attaqué. L'acier est protégé cathodiquement par le zinc qui est moins noble que lui (protection cathodique).



b. Revêtement cathodique :

Dans le cas d'un revêtement de plomb, d'étain, de nickel, de cuivre, d'argent, d'or, de rhodium ou de platine, on dit qu'ils forment des revêtements plus nobles, donc constituent la cathode et l'acier est considéré comme l'anode. Dans le cas du revêtement de l'acier par le nickel, l'acier constitue l'anode de la pile et le nickel la cathode, (fig. 88).



La moindre fissure dans le revêtement entraînera l'attaque de l'acier, il est donc nécessaire que le revêtement soit parfaitement continu et ne contient aucun défaut. Les procédés de revêtement métalliques sont :

- Immersion dans un bain fondu.
- Electrolyse.
- Métallisation au pistolet..
- Métallisation sous vide.
- Dépôt en phase gazeuse

Pour l'immersion, le métal à protéger est plongé dans un bain de métal protecteur fondu. Cette méthode est utilisée en particulier pour le dépôt de zinc (galvanisation) ou d'étain (étamage). Pour l'électrolyse, le dépôt présente toujours une certaine porosité, on est donc conduit à effectuer des dépôts d'épaisseur suffisante pour qu'il n'y ait pas continuité entre les ports.

Pour la métallisation sous vide, il s'agit d'un revêtement obtenu par vaporisation sous vide d'un métal porté à haute température par un chauffage électrique. Cette technique est utilisée, par exemple en optique et en électronique pour déposer l'aluminium sur l'acier (surfaces réfléchissantes). En ce qui concerne la dernière méthode, la pièce à revêtir est portée à une température légèrement supérieure à celle qui correspond à la décomposition. On a la réduction du composé métallique gazeux. Le dépôt est effectué sous pression réduite du composé. Elle est utilisée en anti-corrosion pour la protection de pièces de formes complexes.

2.12.5. Protection par inhibiteurs de corrosion

Un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui, ajouté en petite quantité au réactif corrosif, permet de diminuer la vitesse de corrosion ou d'annuler son agressivité vis-à-vis du métal. Il ne modifie donc pratiquement pas la nature, ni la concentration du milieu. Les inhibiteurs de corrosion agissent en créant une barrière entre le métal et le réactif. Ils viennent se fixer à la surface du métal sous une forme qui dépend de leur nature.

a. Classement selon leur domaine d'utilisation :

Il existe des inhibiteurs pour milieux aqueux, pour milieux acides, employés pour éviter une attaque chimique de l'acier lors du décapage ou au fluide de forages, pour milieu neutres. Ils servent surtout à protéger des circuits d'eau de refroidissement.

En milieux organiques, ils sont utilisés surtout dans les lubrifiants pour moteur et dans l'essence car ces liquides contiennent souvent des traces d'eau. Les inhibiteurs pour peintures

et les inhibiteurs pour phase gazeuse sont employés pour une protection temporaire de différents objets emballés pendant le transport et le stockage (instruments de précision, composants électroniques, machines, etc.).

Il s'agit le plus souvent de composés organiques ayant une pression de vapeur élevée. Les composés s'absorbent sur la surface métallique et la protègent contre la corrosion.

b. Classement selon la réaction partielle

La précipitation d'un produit insoluble peut se faire sur les anodes, cathodes ou à la fois sur les anodes et les cathodes, donc on distingue les :

- Inhibiteurs anodiques :

L'anion de l'inhibiteur forme sur les anodes locales avec les cations provenant de l'oxydation du métal, un composé insoluble. Ainsi le phosphate de sodium est un inhibiteur de la corrosion de fer par une solution aqueuse de chlorure de sodium grâce à la formation de phosphate de fer sur les anodes.

- Inhibiteurs cathodiques :

Le cation de l'inhibiteur forme sur les cathodes locales un hydroxyde insoluble. Ainsi le chlorure de magnésium est un inhibiteur de la corrosion du fer dans l'eau de mer en formant l'hydroxyde de magnésium $Mg(OH)_2$ sur les cathodes.

- Inhibiteurs mixtes :

Ils agissent sur les anodes et les cathodes. Ainsi l'hydrogène-carbonate de calcium forme du carbonate de fer sur les anodes et de l'hydroxyde de calcium sur les cathodes.

2.12.6. Protection électrochimique

La corrosion électrochimique d'un métal est le résultat du passage d'un courant anodique dans les piles locales. Pour supprimer le phénomène de corrosion, il faut porter le métal à un potentiel pour lequel l'intensité de la réaction élémentaire anodique est nulle ou très faible.

Deux types de protection électrochimiques peuvent être envisagés :

- Protection cathodique.
- Protection anodique.

2.12.6.1. Protection cathodique

La corrosion d'une pièce métallique peut être empêchée par la protection cathodique. Elle a été déjà employée avant le développement de la science de l'électrochimie. Humphrey Davy a utilisé la protection cathodique en 1824 pour protéger un bateau de guerre britannique contre la corrosion.

Elle est surtout utilisée pour la protection des canalisations métalliques (tuyauteries) souterraines ou les constructions se trouvant en contact avec l'eau, tels que les câbles, les réservoirs, les conduites, etc. L'avantage de la protection cathodique est la grande économie avec une utilisation pratiquement illimitée.

La protection cathodique a obtenue aussi une grande importance dans l'application dans le domaine de transport du pétrole et gaz. Le principe de la protection cathodique consiste à abaisser le tension métal-milieu de manière à l'emmener dans sa zone d'immunité. Par convention, le courant circule du positif (+) vers le négatif (-), par conséquent le métal est protégé si le courant entre dans la structure en provenance de l'électrolyte. Dans le cas contraire, si le courant passe de la structure à l'électrolyte, la corrosion est accélérée, le courant de protection est produit soit par :

- L'anode réactive ou sacrificielle. Dans ce cas la force électromotrice (fem) nécessaire, est obtenue à partir de la différence entre la tension moyenne du couple de corrosion et la tension propre (plus négative) d'une anode dite sacrificielle.
- Un courant imposé, en utilisant un générateur extérieur de f-e-m, réglable et une anode auxiliaire.

Deux paramètres fondamentaux contrôlent la protection cathodique : le potentiel de protection et la densité de courant de protection.

a. Potentiel de protection :

Si le potentiel d'un métal est égal ou inférieur au potentiel de protection E_{prot} , la vitesse de corrosion ne peut, pour des raisons thermodynamiques, dépasser une certaine valeur que l'on suppose négligeable. On peut donc protéger un métal contre la corrosion en lui imposant un potentiel tel que : $E \leq E_{prot}$.

On définit le potentiel de protection comme :

$$E_{prot} = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln.10^{-6} \text{ (mol/l)}$$

Pour $T = 25^{\circ}\text{C}$, cette expression devient :

$$E_{prot} = E^{\circ} + \frac{0,354}{n} \text{ (V)}$$

Par exemple, le potentiel de protection de l'acier vaut - 0,62 V, celui du cuivre est de 0,16 V et celui du plomb 0,30 V. La figure 89 nous indique dans quel domaine de potentiel, un métal actif bénéficie d'une protection cathodique.

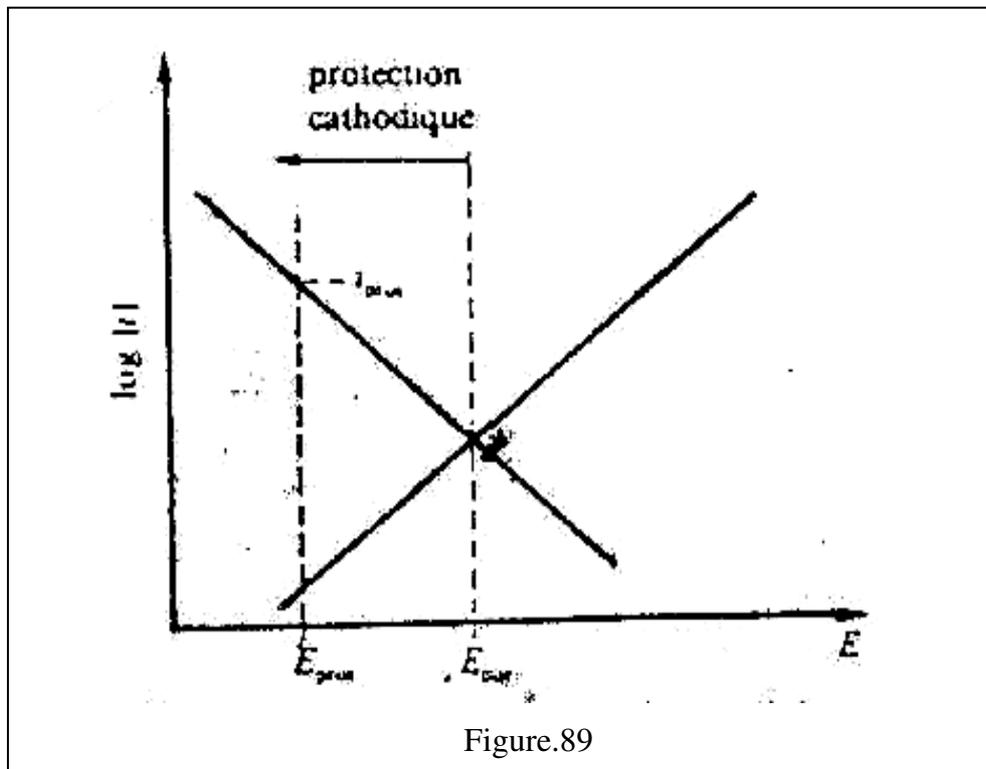


Figure.89

Le principe de la protection cathodique selon la figure 46 est de déplacer le potentiel dans le domaine de protection correspondant à $E < E_{prot}$. La densité de courant partiel cathodique au potentiel de protection vaut $i_c = i_{prot}$. Le tableau suivant donne un aperçu sur les valeurs de potentiel de protection nécessaire pour la protection cathodique de quelques métaux.

Métal	milieu	Potentiel de protection (V)
Plomb	Sol	- 0,55 à - 0,70
Acier	Sol	- 0,85 à - 0,95
Zinc	Sol	- 1,15
Acier	Eau de mer	- 0,84
Aluminium	Eau de mer	- 0,94

b. Courant de protection :

Le courant cathodique, pour imposer le potentiel de protection correspond au courant de protection I_{prot} , sa valeur dépend de la surface à protéger A et de la densité de courant de protection i_{prot} .

$I_{prot} = I_{prot} A$ Les courants nécessaires pour la protection cathodique d'une surface géométrique de $1m^2$ sont donnés tableau ci-dessous :

Structure à protéger	milieu	I_{prot} (mA)
Acier non revêtu	Sol	10 à 50
Acier avec revêtement	Eau de mer	20 à 150
Polyéthylène, épaisseur : 2 mm	Sol	$5 \cdot 10^{-4}$

La densité de courant partiel anodique étant négligeable en potentiel de protection I_{prot} équivaut donc à la densité de courant partiel cathodique i_c au potentiel $E = E_{prot}$.

La relation suivante donne I_{prot} pour une réaction dont la cinétique obéit à l'équation de Butler-Volmer :

$$I_{prot} = i_c = -i_{c0} \cdot \exp\left[\frac{-E_{prot} - E_{cor}}{\beta_{CH}}\right]$$

β_{CH} : coefficient de Tafel cathodique.

En pratique, la protection cathodique et les revêtements organiques forment une combinaison efficace.

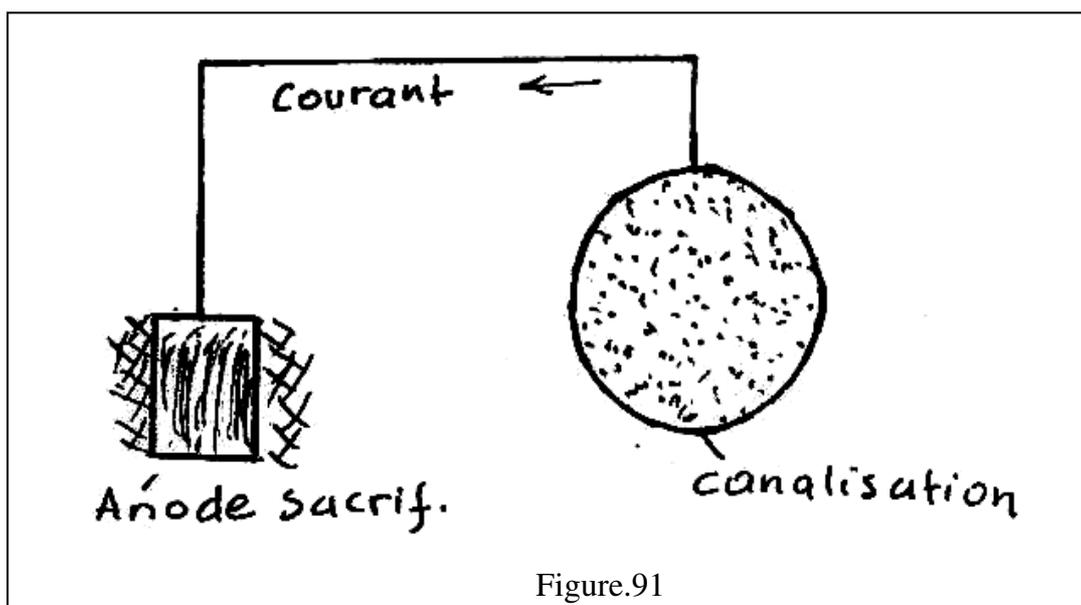
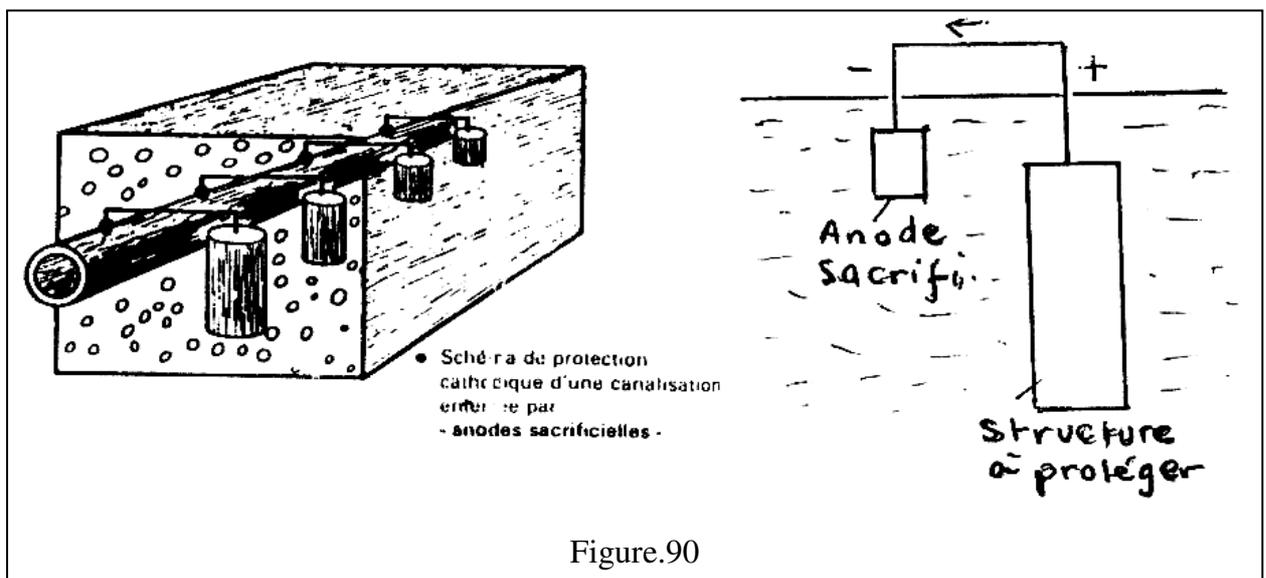
La protection cathodique évite la corrosion aux endroits défectueux de revêtement (pores, griffures), de plus, la surface métallique réellement exposée à l'environnement est alors nettement inférieure à la surface totale. Un courant relativement faible suffit donc à protéger une surface géométrique importante.

1. Protection cathodique par anode sacrificielle :

Le métal à protéger est relié électriquement à une électrode constituée par un métal moins noble que lui et qui joue le rôle d'anode sacrificielle. L'anode sacrificielle forme une pile électrochimique avec le métal à protéger qui joue le rôle de cathode. Si le potentiel que prend le métal à protéger est suffisamment négatif, celui-ci n'est plus attaqué car la réaction élémentaire anodique ne peut plus se produire.

Cette technique, très simple, est souvent utilisée dans la pratique, mais elle se heurte à un certain nombre de difficultés. La différence de potentiel existant en circuit ouvert entre les deux métaux qui constituent la pile, est déterminée par leur nature même. Les figures 90 et 91 présentent des exemples de la protection cathodique par anode sacrificielle.

Lorsque la pile débite, une résistance est introduite et dont la valeur dépend de la résistivité de l'électrolyte ou du sol dans le cas des canalisations enterrées. Il en résulte qu'une chute ohmique intervient et que le potentiel auquel certains points de la structure à protéger sont effectivement portés supérieurs à la valeur nécessaire pour assurer la protection. Il faut alors utiliser plusieurs anodes judicieusement réparties autour de la pièce à protéger.



Les diverses anodes sacrificielles utilisées pour la protection des métaux usuels tels que le fer et le cuivre sont à base de magnésium (G-A6Z3), à base d'aluminium (AZ6, AZ6HgO, O4) et à base de zinc (ZHgO, 15). Le tableau suivant compare les caractéristiques principales de ces trois métaux..

Paramètres	Mg	Al	Zn
E° (V)	- 1,5	- 1,28	- 0,76
Ecor dans le sol (V)	- 1,1 à 1,3	- 0,6 à - 0,9	- 0,6 à - 0,8
Potentiel par rapport à l'acier (V)	- 0,6	- 0,3	- 0,2
Capacité théorique Ah/dm ³)	3840	8050	5840
Rendement (%)	50	80	90
Masse pouvant fournir 0,1 A pendant 10 ans (Kg)	8	3,7	12

On utilise de préférence le magnésium pour protéger les structures enterrées, car il donne la différence de potentiel la plus élevée et possède la meilleurs capacité volumique. En effet le magnésium a tendance à se recouvrir de magnésie, ce qui a pour effet de diminuer le débit de la pile.

En revanche, dans l'eau de mer, qui constitue un électrolyte de bonne conductivité, la différence de potentiel est moins critique, on utilise souvent l'aluminium et le zinc pour la construction des bateaux, des plate-formes de forage, etc. Les anodes sacrificielles possèdent différentes formes telles que tiges, blocs, anneaux, etc., soit on les fixe sur l'objet à protéger, soit on les enterre à une certaine distance de 1 à 3 m.

Interprétation électrochimique :

Prenons l'exemple de la protection du fer par le zinc. Si le fer est seul, il prend par rapport à la solution un potentiel E_{Fe} , et une intensité de corrosion i_{Fe} . Le zinc seul, prend par rapport à la solution le potentiel E_{Zn} . Si l'on réunit les deux métaux, ils prennent un potentiel E_m . Le fer n'est plus attaqué, jusqu'à ce potentiel, la réaction : $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2.e$ ne peut pas se

produire. Par contre le zinc est attaqué et le courant anodique i_m est plus élevé que le courant de corrosion i_{Zn} relatif au Zn isolé. Pratiquement, on admet que pour protéger le fer dans l'eau il faut le porter à un potentiel de - 0,8 V/E.C.S.

2. Protection cathodique par courant imposé :

Dans cette méthode, le courant de protection nécessaire est obtenu à partir d'une source extérieure de courant continu, ce qui implique l'utilisation d'un redresseur. Donc la différence de potentiel entre l'anode et la structure à protéger n'est pas naturelle. Le métal est polarisé cathodiquement (pratiquement aucune formation d'ion métallique). L'intensité du courant doit être suffisante pour porter le métal à protéger à un potentiel où la réaction élémentaire anodique n'a pas lieu. Cette méthode a l'avantage de pouvoir régler la tension (ou le courant), en fonction des besoins. Ce ci permet d'optimiser le système et de protéger de grandes surfaces. En revanche la protection par courant imposé, nécessite une ligne électrique et demande un entretien continu. La figure 92 représente un exemple de la protection cathodique par courant imposé.

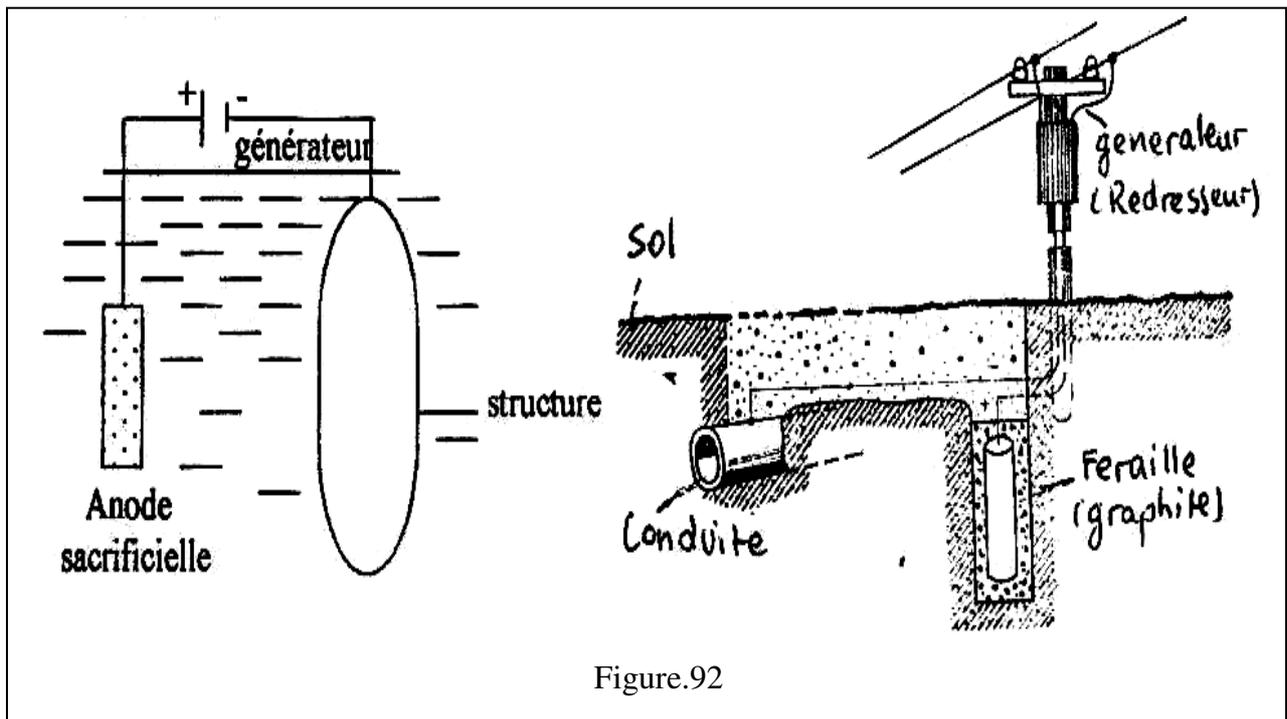


Figure.92

Pour protéger selon cette méthode des structures enterrées (conduite gaz, câble haute tension), on utilise généralement des anodes de Fe-Si à 15 % Si ou en graphite. Pour préserver les armatures de béton, des réacteurs chimiques ou des bateaux, on emploie des anodes en titane recouvertes d'oxydes de métaux nobles. La longueur de la construction à protéger, dépend de l'état de l'isolation, de la grandeur de la surface de protection et du

potentiel de protection utilisé et elle peut varier de 2 à 20 km.

Interprétation électrochimique :

Lorsque le métal à protéger est plongé dans un électrolyte (réactif), en l'absence de courant imposé, l'intensité du courant imposé I_{corr} est donnée par le diagramme théorique de polarisation, (fig. 93).

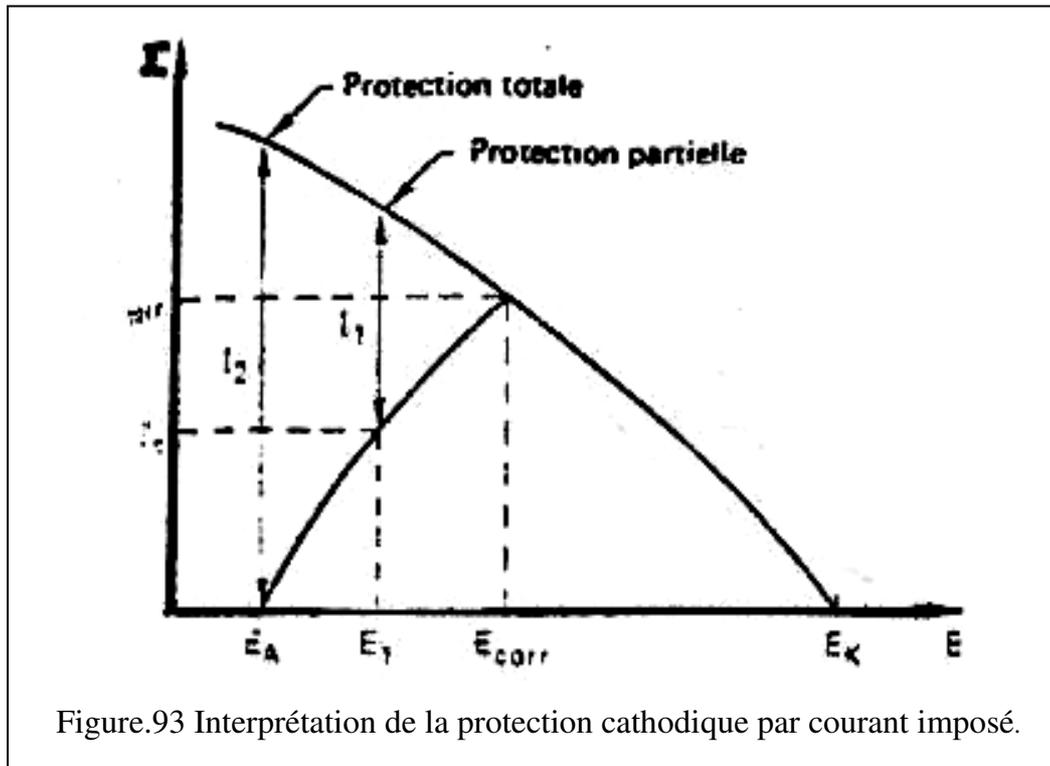


Figure.93 Interprétation de la protection cathodique par courant imposé.

E_{corr} est le potentiel que prend alors le métal. Si l'on porte le métal placé à la cathode de la pile à un potentiel $E_1 < E_{corr}$ en imposant un courant I_1 , il est partiellement protégé puisque le courant de corrosion est réduit à i_c . Pour obtenir une protection complète, il faut imposer le passage d'un courant I_2 . Le métal prend alors un potentiel E_A qui correspond au seuil de la réaction anodique.

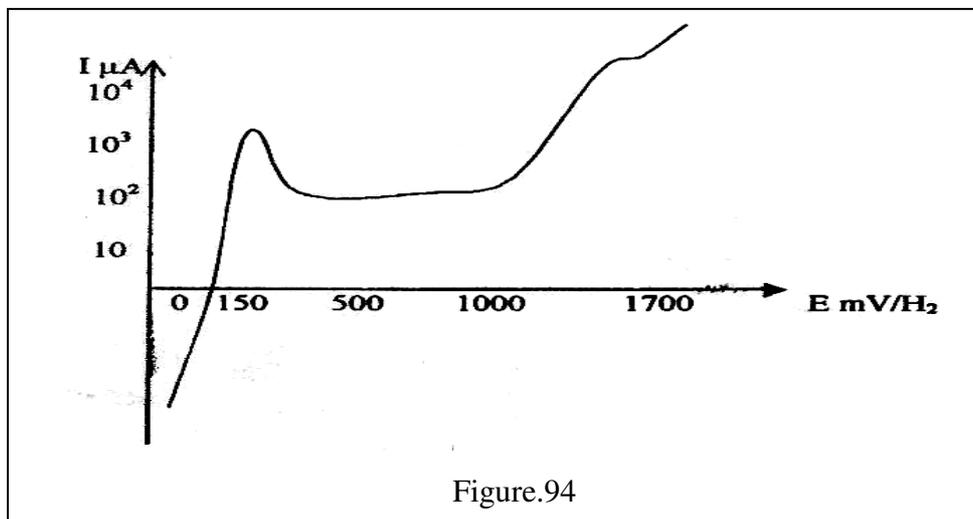
Donc, pour que le courant anodique soit supprimé, il faut que le métal soit porté à un potentiel cathodique inférieur ou égal à E_A , il est important de noter qu'il ne suffit pas qu'un métal soit à la cathode d'une pile pour être protégé. Encore faut-il que son potentiel soit suffisamment négatif, ainsi dans le cas de la figure 52, le métal porté au potentiel E_1 tel que : $E_A < E_1 < E_{corr}$ est encore le siège d'un courant anodique I_{corr} , donc attaqué.

Cette méthode de protection est assez délicate et sensible aux incidents mécaniques et électriques car elle nécessite une isolation complète de l'installation. Elle exige une surveillance régulière car toute modification de l'intensité du courant risque d'entraîner une

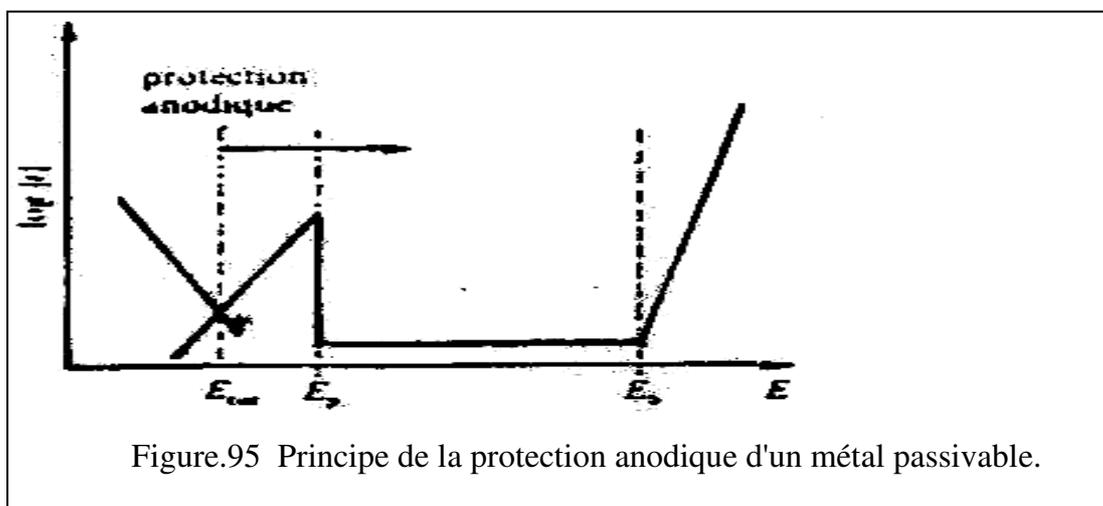
variation du potentiel appliqué à la pièce à protéger. Donc il faut déterminer une corrosion intense puisque l'on travaille dans le domaine anodique. Par contre, le courant utilisé est bon marché et le nombre d'anodes nécessaires est faible. Elle est d'un emploi courant pour la protection des structures enterrées ou immergées.

2.12.6.2. Protection anodique

Cette méthode s'applique aux méthodes passivables, dont le potentiel de corrosion se situe dans le domaine actif ($E_{corr} < E_p$). Son principe repose donc sur la propriété que possèdent certains métaux et alliages de se passiver dans un milieu donné, lorsqu'ils sont parcourus un courant anodique. Pour que cette méthode puisse être appliquée, il faut que le courbe intensité-potentiel présente un palier de passivation entre 500 et 1000 mV/H₂, (fig. 94).



Une polarisation anodique permet dans ce cas, de déplacer le potentiel dans le domaine passif, (fig. 95).



Déplacement du potentiel dans le domaine passif correspondant à $E_p < E < E_b$.

La densité du courant nécessaire pour maintenir le métal à l'état passif équivaut à la densité de courant passif i_{pp} qui est normalement très faible. Le maintien d'une protection anodique ne nécessite pas l'utilisation d'une quantité d'électricité trop élevée, même en l'absence de revêtement organique.

En revanche, pour atteindre l'état passif, il faut appliquer initialement une densité de courant nettement plus élevée, car elle doit être supérieure à la densité de courant de passivation i_p . Cette méthode a déjà été appliquée dans les différents domaines industriels par exemple pour la protection des réservoirs en acier inoxydable de 2 m³ contenant de l'acide sulfurique. Il suffit de faire passer un courant de quelques ampères pendant une fraction de seconde pour obtenir la passivation. L'intensité du courant d'entretien n'est ensuite que de 150 mA environ.

2.12.7. Les courants vagabonds

Si un courant électrique continu peut avoir pour effet de protéger cathodiquement une structure lorsqu'il circule dans un sens convenable, il peut provoquer sa corrosion lorsqu'il circule dans le sens opposé. Mais en général, les courants vagabonds se propagent dans le sol selon un chemin autre que celui prévu.

Donc ils peuvent entrer dans une structure conductrice enterrée puis en ressortir plus loin, provoquant une corrosion par dissolution anodique. Ces courants sont variables en direction et en intensité et pour cette raison, ils ont reçu la nomination de courants vagabonds.

Les canalisations, les câbles enterrés, situés au voisinage de réseaux électriques, d'usines électriques, les systèmes de transports utilisant un courant continu (tramway, chemin de fer) et les postes de soudures, constituent la source la plus fréquente des courants vagabonds. La figure 96 donne le plus fréquent de la corrosion d'une canalisation voisine d'une ligne de traction électrique. La caténaire est portée à une tension de plusieurs kilovolts. Lorsqu'une motrice passe, le courant doit retourner à la sous station par les rails. Du fait que leur isolement n'étant pas parfait, une partie du courant passe par le sol si sa résistivité est assez faible. Si une canalisation métallique se trouve au voisinage de la voie ferrée, le courant peut l'emprunter et ne la quitte qu'à proximité de la sous station. La région A où le courant sort de la canalisation fonctionne comme anode et se trouve corrodée.

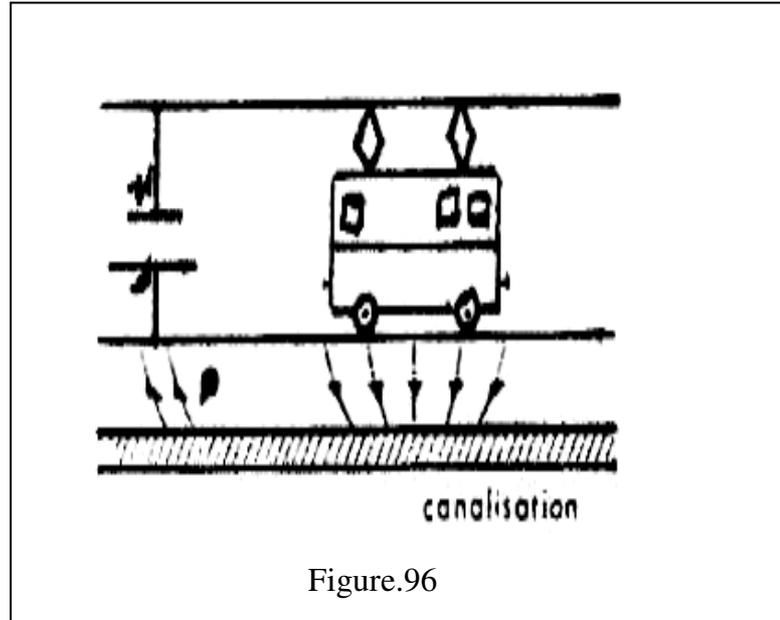


Figure.96

Moyens de protection :

a. Protection passive : Isolation de la canalisation par revêtement isolant de bain de houille, bitume ou polyéthylène.

b. Joints isolants : Les différents tronçons de la canalisation sont isolés électriquement les uns des autres. Cependant; le courant électrique peut dans certains cas, passer d'un tronçon à l'autre par le liquide transporté et augmente ainsi le nombre de points de sorties du courant, donc c'est l'anode.

c. Déversoirs de courants : Dans les régions anodiques, on relie électriquement la canalisation à des pièces métalliques enterrées dont la résistance totale est plus faible que celle de la conduite par rapport au sol c'est donc le déversoir qui est attaqué, (fig. 97).

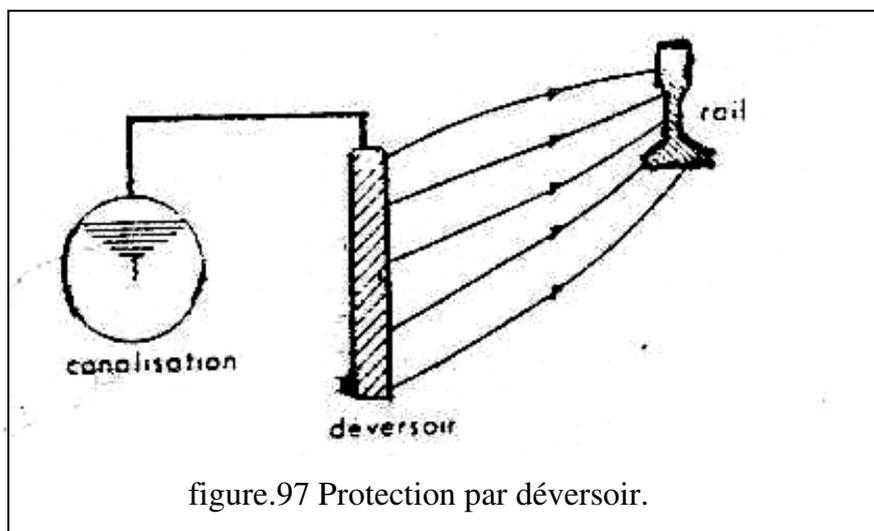
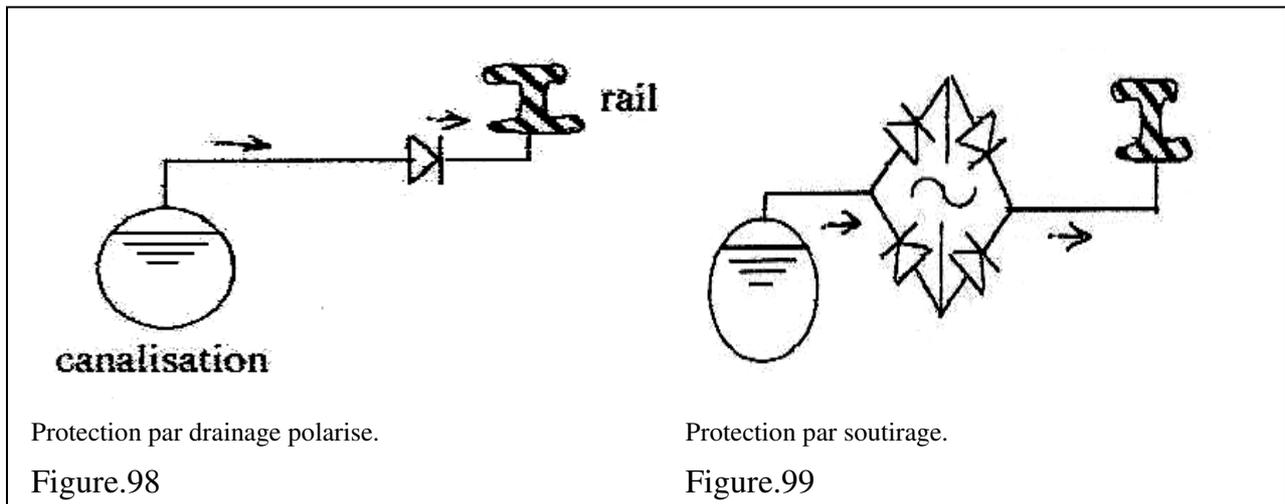


figure.97 Protection par déversoir.

d. Protection active : Les déversoirs peuvent dans certaines régions servir d'entrée pour les courants vagabonds. On introduit alors dans le circuit un redresseur au sélénium qui ne permet pas le passage du courant que dans le sens canalisation-sol, c'est le drainage polarisé (fig. 98). Il est possible également d'utiliser une tension auxiliaire qui permet un soutirage de courant (fig. 99).



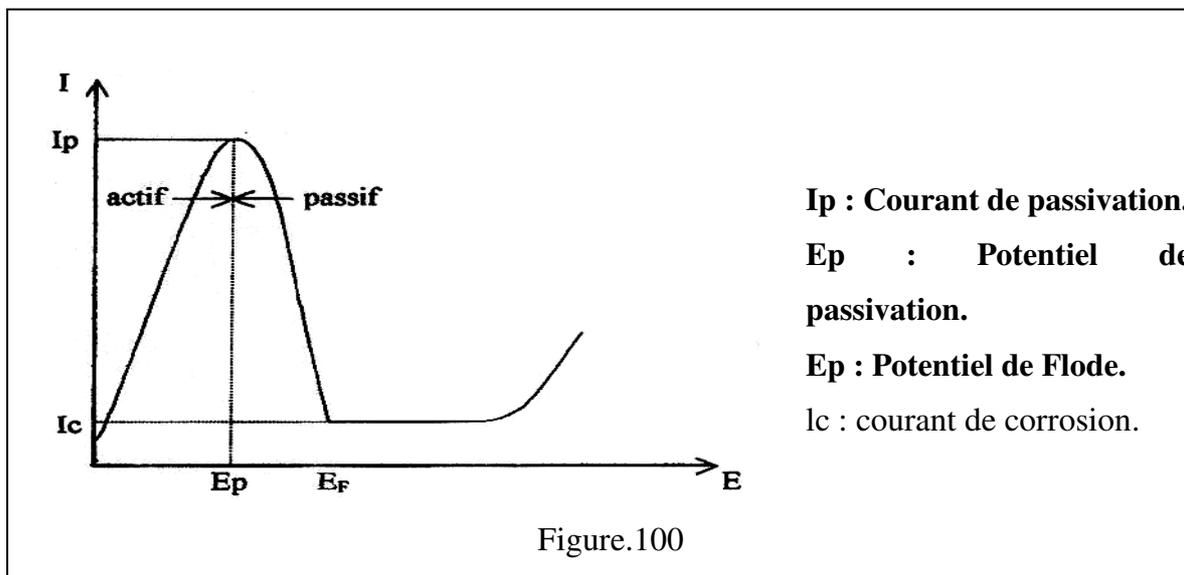
2.12.8. Phénomènes de passivité des métaux

Un métal ou un alliage est dit passif lorsqu'il résiste à la corrosion dans une solution où l'attaque est thermodynamiquement possible. Pour des courants anodiques de l'ordre de $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ou des électrolytes à oxydation forte de forme à la surface du métal, ou de la porosité des couches passives lesquelles bloquent ou diminuent complètement la corrosion (vitesse de corrosion $< 0,001 \text{ mm/a}$), ce comportement résulte d'un ralentissement du processus anodique et se traduit généralement par un anoblissement du potentiel. Les métaux actifs conservent un contact direct avec la solution.

La plupart des métaux et alliages qui résistent bien à la corrosion sont à l'état passif, tels que les aciers inoxydables comme les alliages spéciaux à base de nickel et de chrome, de titane, de tantale, d'aluminium, etc. L'épaisseur du film passif atteint typiquement 2 à 3 nm. Il est bien connu que le fer s'attaque rapidement dans l'acide nitrique dilué alors qu'il est non attaqué dans l'acide nitrique concentré, 12 N par exemple. On dit que le fer est alors passif.

Faraday, a émis le premier, l'hypothèse de l'existence dans l'état passif; d'un film protecteur invisible à la surface du métal, l'isolant du réactif corrosif et c'est grâce à la présence du film passif que la dissolution passive, qui correspond à un certain potentiel, est plus lente que la dissolution active.

Les films passifs sont des oxydes dont la structure et la stœchiométrie exacte dépendent des conditions de formation. Souvent (mais pas toujours), les films passifs formés sur les métaux résistent bien à la corrosion ont une structure amorphe. La croissance d'un film amorphe ne dépend pas de l'orientation des grains du substrat, et en conséquence, de tels films sont plus homogènes que des films cristallins. Ils devraient donc mieux protéger le métal. Revenons à l'exemple du fer qui montre sous les conditions normales une faible passivité, afin de constater sous quelle condition, le fer devient passif. On considère la courbe potentiocinétique : $I = f(E)$, et pour ce but, on introduit dans un électrolyte une anode de fer avec une cathode de platine liées avec la même source de tension. Pour des faibles tensions, l'anode de fer se dissout dans la solution, tandis qu'à la cathode il y a développement de l'hydrogène (fig. 100).



Avec l'augmentation du potentiel, le courant augmente et le métal se dissout avec une grande vitesse. Au dessus d'un certain potentiel (potentiel de passivation), le courant diminue brusquement pour atteindre le courant passif. Donc il y a lieu, le passage de l'état actif à l'état passif. La cause de ce blocage de la dissolution du métal, est la formation d'une pellicule (film) d'oxyde passive ayant une grande résistance électrique. Avec l'augmentation du potentiel et lorsqu'on dépasse le potentiel d'activation (potentiel de Flode), il y a dissolution de la couche passive et le fer est à nouveau attaqué. Le potentiel de Flode dépend surtout de la valeur du PH de l'électrolyte, les ions de chlore peuvent détruire la couche passive. Une passivation du fer peut avoir lieu dans des électrolytes à oxydation forte. Si on plonge un morceau de fer dans l'acide nitrique HNO_3 , au début, s'effectue une dissolution sans

développement d'hydrogène, mais après un temps très court, le fer présente un état passif et devient insoluble dans le HNO_3 .

Par contre le chrome est passif et grâce à ce comportement, il est utilisé dans les alliages tels que les aciers au chrome avec une teneur en chrome à partir de 13 %, ces types d'aciers sont généralement résistants à la corrosion. Les films passifs sur les alliages Fer-chrome contiennent généralement plus de chrome que l'alliage. Les couches passives peuvent être produites artificiellement par les techniques suivantes :

- Oxydation anodique dans un électrolyte (Fe, Al, Sn).
- Etablir un potentiel $E > E_{\text{Flode}}$ avec la présence d'un acide faible.
- Trempage des (aciers Cu, Al, Zn) dans des solutions de chromate ou bichromate.

Résumé des moyens de protection contre la corrosion :

Il est exposé ci-dessous, un résumé des cinq principaux moyens de protection contre la corrosion :

1. Choix du matériau.

2. Par forme adaptée.

3. protection passive.

- Revêtements non métalliques.
 - Bitume, houille de braie et goudron.
 - Peinture.
 - Matière plastique.
- Revêtements métalliques.
 - Revêtements anodiques.
 - Revêtements cathodiques.

4. Protection active.

- Protection anodique.
 - Courant anodique.
- Protection cathodique.
 - Courant imposé.
 - Anode sacrificielle.

5. Inhibiteurs de corrosion.

- Inhibiteur anodique.
- Inhibiteur mixte.
- Inhibiteur cathodique.

2.13. Oxydation et corrosion atmosphérique

2.13.1. Oxydation à basse température

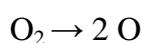
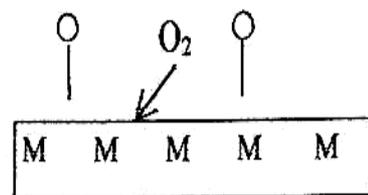
La plupart des métaux ne sont pas stables au contact de l'air, ils réagissent spontanément en formant un oxyde. L'oxydation à basse température est caractérisée par la réaction du métal avec l'oxygène sans présence d'un électrolyte et lorsque la diffusion n'intervient pas dans le processus de croissance de l'oxyde, c'est à cause du coefficient de diffusion trop faible. Cette condition est remplie aux températures peu élevées $< 300^{\circ}\text{C}$. Au dessus de ces températures, la vitesse de croissance des oxydes est contrôlée partiellement ou entièrement par la diffusion, il s'agit dans ce cas d'une oxydation à haute température.

A basse température, la vitesse d'oxydation diminue fortement avec l'épaisseur de l'oxyde et elle atteint une valeur quasiment nulle dès que cette épaisseur atteint quelques nanomètres. Ce type d'oxydation consomme donc peu de matériel et de ce fait ne pose normalement pas de problèmes du point de vue de la durée de vie des réalisations techniques. Néanmoins, elle influe sur les propriétés de surface des métaux (adhésion, frottement, usure). En plus, elle joue un certain rôle dans la fabrication de circuits intégrés, permettant une oxydation sélective de certaines parties.

La corrosion atmosphérique désigne la réaction d'un métal avec l'oxygène de l'air lorsqu'à la surface, l'humidité et les polluants forment un électrolyte. Contrairement à l'oxydation à basse température, les films d'oxyde et autres produits de corrosion formés sont, en général, non compacts et leur présence à la surface métallique n'arrête pas la corrosion. Le mécanisme de ce type d'oxydation ressemble à celui de la corrosion en milieu liquide, car on a la présence de réactions partielles anodiques et cathodiques aux interfaces métal-électrolyte et oxyde-électrolyte. Pour expliquer le phénomène d'oxydation, on considère un métal M en contact avec l'oxygène et décrivons les trois étapes de la formation de l'oxydation.

Première étape :

Les molécules O_2 entrent en collision avec la surface du métal et se transforment en atome d'oxygène chimisorbés, donc c'est la première étape de la réaction de la surface métallique avec l'oxygène qui s'appelle chimisorption.



En réalité, une molécule d'oxygène se transforme en deux atomes, dont les positions relatives ne sont pas indépendantes, mais varient en fonction de l'orientation cristalline du substrat.

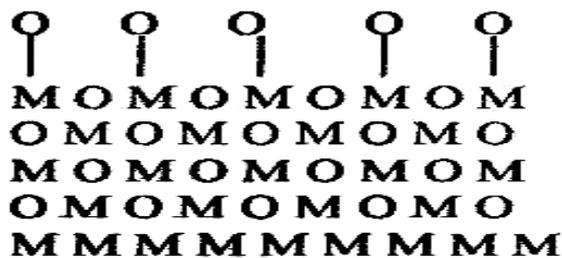
Deuxième étape : La deuxième étape est la formation et croissance latérale d'îlots.



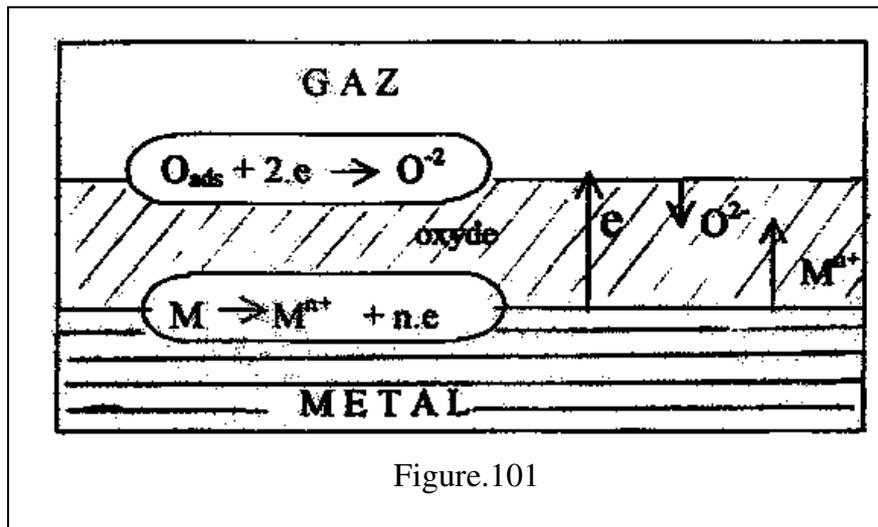
Les atomes d'oxygène absorbés, possèdent une forte affinité pour les électrons de valence du métal et forment des liaisons partiellement ioniques avec celui-ci. Ils acquièrent ainsi une charge négative et se repoussent mutuellement. Le système peut alors atteindre une configuration énergétique plus favorable si certains atomes d'oxygène échangent leur place avec des atomes métalliques superficiels.

Ce phénomène conduit à la formation d'un germe d'oxyde épais d'une seule couche moléculaire. Or un germe croît seulement s'il dépasse une certaine taille critique. La formation d'un germe stable nécessite donc plusieurs échanges de places, d'abord la croissance latérale des germes, puis leur coalescence, aboutit à la formation d'une couche d'oxyde.

Troisième étape : La troisième étape est la croissance d'un film compact.



Les étapes 1 et 2 ne sont pas observables que pour des doses d'oxygène très faibles. Dès que la pression partielle devient élevée, équivalente à la pression atmosphérique, par exemple, la couche d'oxyde recouvre très rapidement toute la surface et seule l'étape 3 reste mesurable. La vitesse de croissance de l'oxyde dicte alors. Les réactions qui contribuent à la croissance d'une couche d'oxyde compacte sont résumées sur la figure 101



A l'interface oxyde-gaz, l'oxygène se réduit en O^{2-} en acceptant deux électrons. A l'interface métal-oxyde, les atomes métalliques s'oxydent en cations M^{n+} et libèrent n électrons. Ces électrons doivent donc traverser l'oxyde pour réagir avec l'oxygène. De plus les cations M^{n+} se déplacent vers la surface extérieure du film tandis que les anions O^{2-} migrent vers l'intérieur, le plus lent de ces processus détermine la vitesse de croissance.

2.13.2. Corrosion atmosphérique

L'air ambiant se compose approximativement de 77 % N_2 , 21 % O_2 , 1 % Ar, 1 à 2 % H_2O , 0,03 % CO_2 . On y trouve en plus des traces de gaz rares (He, Kr, etc.) des polluants notamment du SO_2 et de NO_2 , des ions Cl^- et des poussières. Le SO_2 est le polluant le plus important, il provient essentiellement de la combustion du pétrole et du charbon. Le NO_2 provient de la combustion à haute température notamment dans les moteurs d'automobiles et joue un rôle moins important que le SO_2 et les ions Cl^- .

Les chlorures n'existent normalement que dans les régions maritimes. Ils proviennent de gouttelettes d'eau salée emportées par le vent. Par ailleurs, le salage des routes en hiver constitue une autre source de chlorures. Les poussières sont d'origine naturelle ou dues à des sources de pollution. Les particules de suie, par exemple, provenant d'une combustion incomplète, ont des propriétés corrosives qui les rendent particulièrement nuisibles.

La température d'un métal exposé à l'atmosphère diffère parfois de celle de l'air. Cela explique deux phénomènes souvent rencontrés : la condensation sur la paroi extérieure d'un tuyau de refroidissement mal isolé ou sur une toiture froide dans un garage chauffé.

Des sels déposés sur la surface, issus de réactions avec des polluants, réduisent la pression de vapeur saturante. Un tel cas favorise d'autant plus la corrosion que les composés ioniques

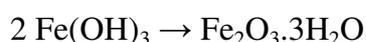
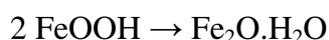
augmentent la conductivité de l'électrolyte qui se forme. Les surfaces des métaux exposés à l'atmosphère sont souvent recouvertes par des produits de corrosion poreux ou par des poussières

2.13.3. Oxydation des métaux ferreux

On peut présenter la corrosion atmosphérique de l'acier par l'équation stœchiométrique suivante :



La formule chimique FeOOH désigne globalement la rouille. Il s'agit d'un oxyde hydraté, d'une stœchiométrie intermédiaire entre l'oxyde ferrique Fe_2O_3 et l'hydroxyde ferrique $\text{Fe}(\text{OH})_3$.



En réalité, la réaction du fer avec l'oxygène et l'eau peut, suivant les conditions, donner naissance à une multitude d'oxydes et hydroxydes comme le montre le tableau ci-dessous.

Formule	Nom	Système cristallin
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hématite	Trigonal
$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Maghémite	Cubique
Fe_3O_4	Magnétite	Cubique
FeO	Wustite	Cubique
$\alpha\text{-FeOOH}$	Goethite	Rhomboédrique
$\beta\text{-FeOOH}$	Acaganéite	Tétragonal
$\gamma\text{-FeOOH}$	Lépidocrocite	Rhomboédrique
$\delta\text{-FeOOH}$		Héxagonal
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	Hydroxyde ferreux	
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	Hydroxyde ferrique	
$\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot 4\text{Fe}(\text{OH})_2 \cdot \text{FeSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Rouille verte du type II	

La rouille désigne un mélange complexe de différentes phases, cristallines et amorphes, d'oxydes et d'hydroxydes du fer. Sa stœchiométrie ne correspond approximativement à la formule FeOOH.

Les trois composants principaux de la rouille sont :

- a. α -FeOOH (géothite).
- b. γ -FeOOH (lépidocrocite).
- c. Fe_3O_4 (magnétite).

La composition de la rouille varie en fonction des conditions climatiques et de la durée d'exposition à l'atmosphère. De plus, elle varie généralement entre l'intérieur et l'extérieur de la couche. En effet, les couches de rouille contiennent normalement une partie intérieure (adjacente au métal), relativement dense, formée de magnétite et de phases amorphes du FeOOH, ainsi qu'une partie extérieure, poreuse, principalement constituée de lépidocrocite et de géothite.

La rouille influence la vitesse de corrosion atmosphérique de deux façons. D'une part, sa porosité augmente la surface exposée à l'atmosphère par rapport à la surface géométrique initiale de l'échantillon. Le nombre de sites d'adsorption augmente donc considérablement. Une plus grande quantité de polluants adhèrent à la surface et l'eau condense plus facilement. La rouille crée donc des conditions favorables à la corrosion.

D'autre part, les couches de rouilles ralentissent la corrosion car elles masquent partiellement la surface réactivée et diminuent la vitesse de transport de l'oxygène. Lorsqu'on expose un acier non corrodé à l'atmosphère, l'effet de ralentissement domine en premier temps. La vitesse de corrosion diminue avec le temps d'exposition. Après une certaine période, qui dure souvent plusieurs années, la vitesse de corrosion atteint une valeur constante qui ne dépend que de la corrosivité de l'environnement et du type d'acier. L'effet d'accélération compense alors l'effet de ralentissement.

Mécanismes réactionnels :

Une surface d'acier polie et humide exposée à l'atmosphère, se couvre rapidement d'un film mince, brunâtre, composé de produits de corrosion. Cette réaction est d'autant plus rapide que la surface est contaminée par des ions, notamment de sulfates. L'explication de ce phénomène réside dans le mécanisme suivant. L'oxygène de l'air, diffusé au travers du film liquide, et se réduit à la surface du métal simultanément, le fer s'oxyde en ions ferreux qui se dissolvent alors dans l'électrolyte, (fig. 102).

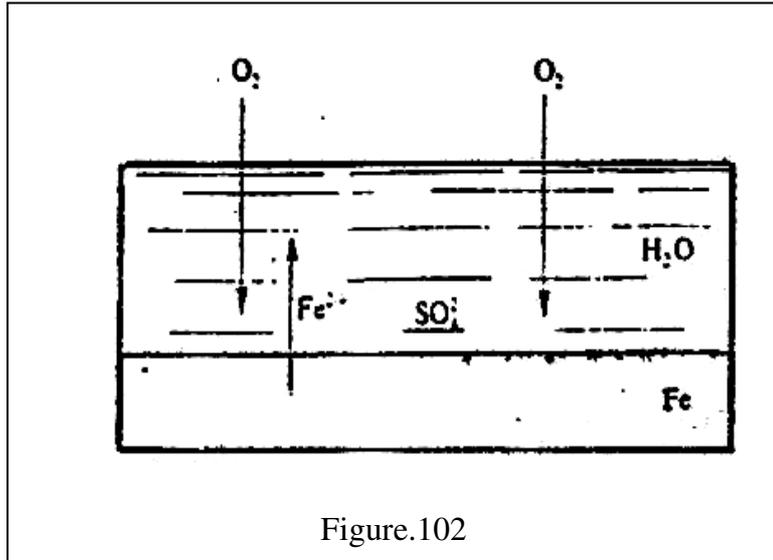
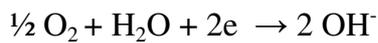
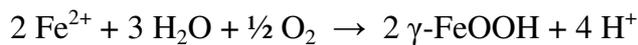


Figure.102



Les ions ferreux réagissent avec l'oxygène et on observe la précipitation de γ -FeOOH.



Le γ -FeOOH n'est pas le seul produit de réaction (rouille verte). D'autres phases cristallines et amorphes apparaissent aussi, tels que le $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Le transport de l'oxygène vers la surface, limite la vitesse de corrosion du fer. La quantité de rouille augmente au fur et à mesure que la corrosion progresse pour deux raisons :

- L'oxygène diffuse sur une distance de plus en plus grande.
- La surface métallique active, ayant un contact direct avec l'électrolyte, diminue.

Le film ci-dessous représente la surface d'un acier recouvert d'une couche de rouille poreuse à l'état mouillé, (fig. 103). Sur cette surface, le fer se dissout en formant des ions ferreux, cette réaction a lieu au fond des pores où le métal touche l'électrolyte.

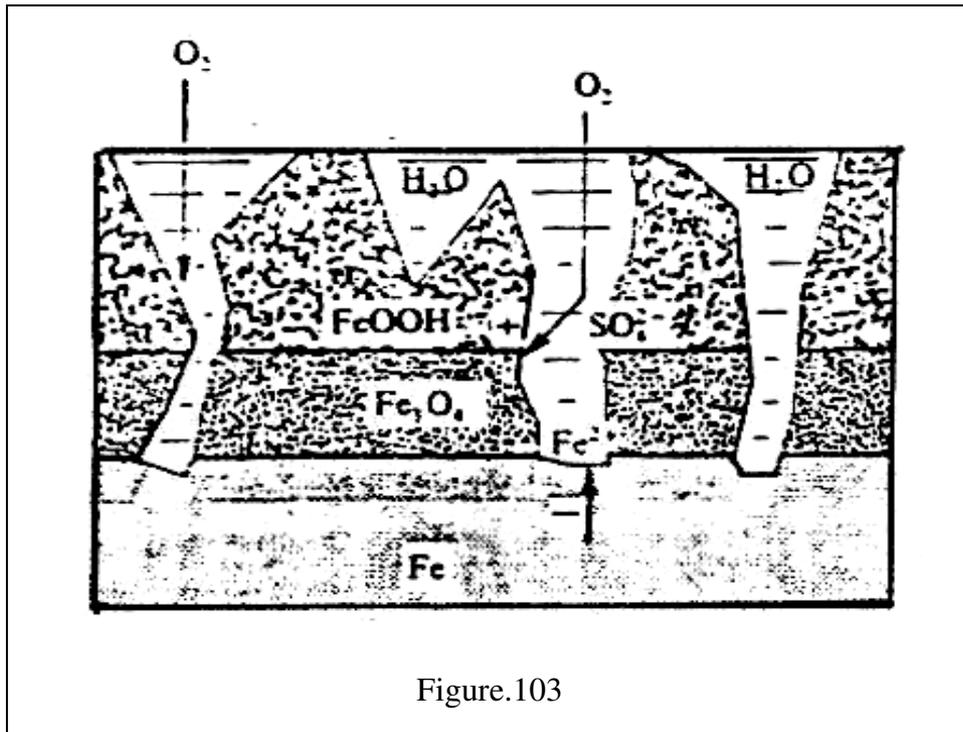


Figure.103

Deux réactions partielles cathodiques sont possibles en présence de la rouille :

- La réduction de l'oxygène.
- La réduction du $\gamma-FeOOH$.

La figure 104 représente une surface à l'état sec.

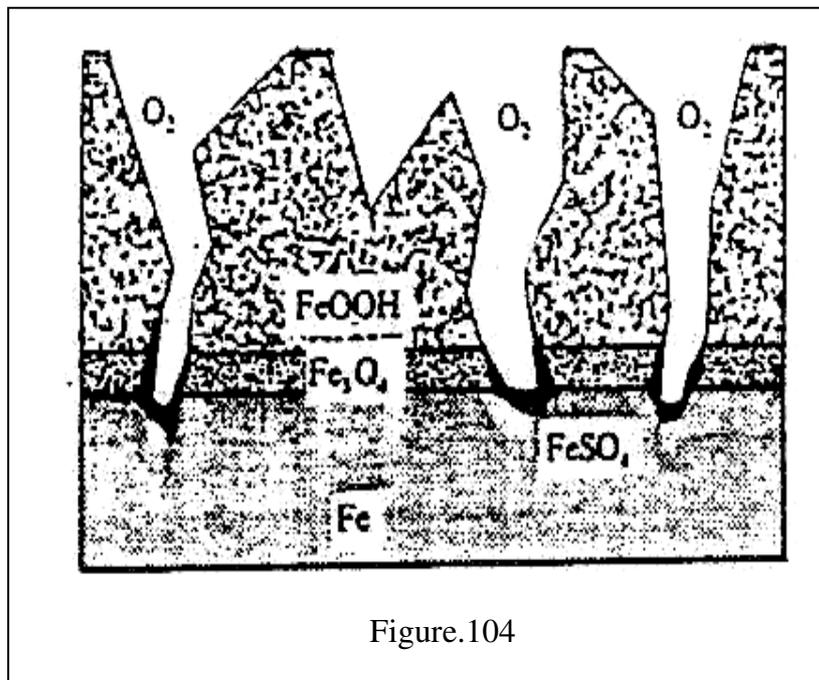


Figure.104

2.13.4. Oxydation des métaux non ferreux

Parmi les métaux non ferreux, les plus utilisés, sont : Zn, Al et Cu, car ils sont souvent employés en construction. Le tableau suivant indique leur vitesse de corrosion moyenne dans différents atmosphères. Par rapport aux aciers, ces vitesses sont plutôt faibles. Les valeurs entre parenthèses indiquent la profondeur maximale des piqûres (μm) après vingt ans d'exposition.

Atmosphère	Zinc	Cuivre	Aluminium
Rurale	0,2 à 2	< 1	< 0,1
			(10 à 55)
Urbaine et industrielle	2 à 16	1 à 3	< 1
			(100 à 190)
Marine	0,5 à 8	1 à 2	0,4 à 0,6
			(85 à 260)

Le taux d'humidité relative et les polluants atmosphériques ont des effets très remarquables sur la vitesse de corrosion du zinc, la durée d'exposition a peu d'influence, tandis que la teneur en SO_2 dans l'atmosphère possède une grande influence.

Dans l'atmosphère, l'aluminium se corrode très lentement, car un film d'oxyde mince ($<5\mu\text{m}$) le protège. La partie du film, adjacente au métal, contient notamment de l'alumine ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) et la partie extérieure de la boémite ($\gamma\text{-AlOOH}$) et de la bayerite ($\text{Al}(\text{OH})_3$). En revanche la présence de chlorures ou de sulfates, entraîne l'apparition de piqûres microscopiques. Au contact de l'atmosphère, le cuivre forme des patines brun-noires qui deviennent bleu-vertes avec les années. En effet, dans un premier temps, il se forme des oxydes Cu_2O et CuO . Puis en présence de polluants, ces produits se transforment en :

- Hydro-sulfates : $\text{Cu}(\text{OH})_x(\text{SO}_4)_y$
- Hydroxy-carbonates : $\text{Cu}(\text{OH})_x(\text{CO}_3)_y$
- Hydroxy-chlorures : $\text{Cu}(\text{OH})_x\text{Cl}_y$

Les principaux produits de corrosion du Zn, Cu et Al sont :

Zn	ZnO	$\text{Zn}(\text{OH})$		$\text{Zn}(\text{OH})_x\text{Cl}_y$	$\text{Zn}(\text{OH})_x(\text{CO}_3)_y$
Cu	Cu_2O	CuO	$\text{Cu}(\text{OH})_x(\text{SO}_4)_y$	$\text{Cu}(\text{OH})_x\text{Cl}_y$	$\text{Cu}(\text{OH})_x(\text{CO}_3)_y$
Al	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	$\gamma\text{-AlOOH}$	$\text{Al}(\text{OH})_x(\text{SO}_4)_y$	$\text{Al}(\text{OH})_x\text{Cl}_y$	$\text{Al}(\text{OH})_3$

3. LE MOULAGE

3.1 Généralités

Les organes et pièces constituant les machines et appareils proviennent de sources diverses de fabrication tels que forgeage, usinage, estampage, fonderie etc.

La technique de fonderie est la plus souvent utilisée car elle est non seulement économique mais :

- Elle permet de produire des pièces de formes complexes (difficilement réalisables par usinage ou par d'autres procédés).
- La série des pièces est identique.
- Obtention de pièces massives telles que bâtis, volants etc.

Le moulage ou fonderie est un ensemble de procédés qui permet de réaliser des pièces métalliques brutes. Le moulage proprement dit consiste à réaliser des pièces brutes par coulée du métal en fusion dans un moule en sable ou en métal (représentant l'empreinte de la pièce à obtenir), le métal en se solidifiant, reproduit les contours et dimensions de l'empreinte du moule (figure.105)

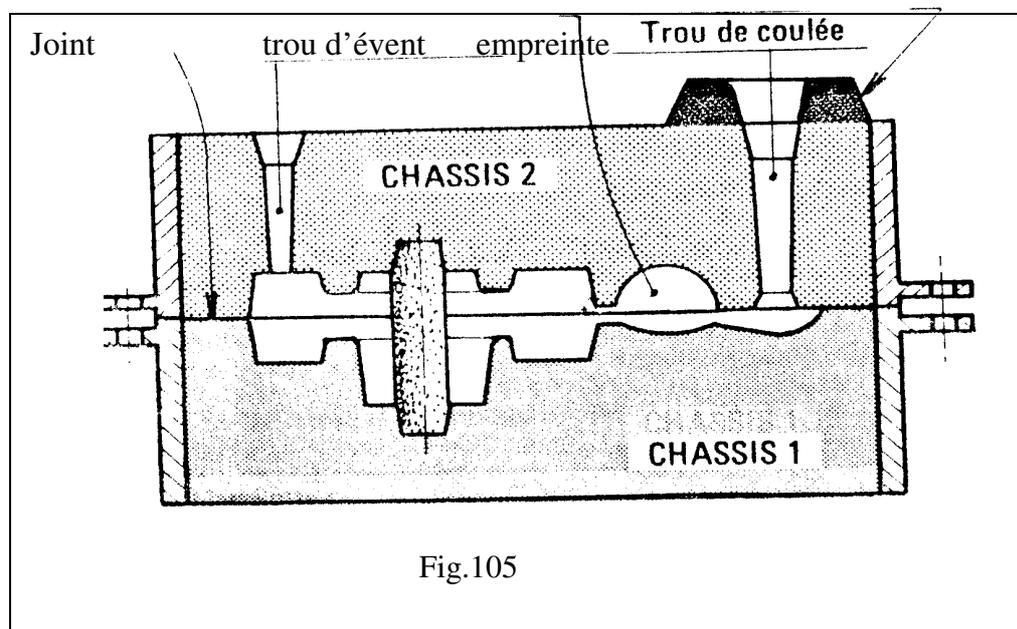


Fig.105

Dans la spécialisation de la fonderie, on distingue pratiquement les fonderies suivantes

a) Selon la nature des métaux et alliages

- Fonderie de fonte.
- Fonderie d'acier.
- Fonderie d'aluminium et ses alliages.
- Fonderie de cuivre, bronzes, laitons etc...

b) Selon l'utilisation

- Fonderie d'art.
- Fonderie d'ornement (bijoux).
- Fonderie de mécanique industrielle.

c) Selon le procédé de moulage

- Moulage en sable (manuel ou mécanique).
- Moulage en carapaces.
- Moulage à la cire perdue.
- Moulage en coquilles (moule permanent).

Dans ces procédés le moule peut-être permanent ou non permanent (destructible).

Le moule non permanent est utilisé qu'une seule fois, pour extraire la pièce, il faut le détruire, l'empreinte est obtenue par moulage du matériau constitutif autour d'un modèle réalisé en bois ou en métal.

Le moule permanent peut servir un grand nombre de fois, il est réalisé en plusieurs parties pour faciliter l'extraction de la pièce. Il est utilisé surtout lorsque la quantité de pièces à couler est importante.

Le choix des procédés de moulage dépend du métal à couler. En général la température de fusion du métal coulé doit- être inférieure à la température de fusion du matériau constituant le moule.

Métaux et Températures de fusion	Moulage en sable	Moulage en coquille
<p>Fontes : 1100°C à 1250°C</p> <p>Aciers : 1200°C à 1500°C</p>	<p>1. Moulage en sable avec ou sans noyau.</p> <p>2. Moulage en carapace : procédé Cro- ning.</p> <p>3. Moulage à la cire perdue.</p>	<p>Moulage impossible sans détériorer les coquilles.</p>
<p>Cuivre et ses alliages : Laiton : 940°C</p> <p>Aluminium et ses alliages : Alpax : Zamak : environ 610°C</p>	<p>1. Moulage en sable : pour les grosses pièces. <i>Exemples :</i> - cloches en bronze - hélices de bateaux</p> <p>pour les petites séries.</p>	<p>Moulage en coquilles: - pour les grandes séries.</p> <p>- avec ou sans pièce (prisonnier) insérée au moulage.</p> <p>- par gravitation ou sous pression ex. - carter de boîte de vitesses (alpax) <i>corps de carburateur</i> (zamack)</p>

Comme il a été déjà cité, le moulage est généralement très économique, mais les caractéristiques d'un alliage coulé sont plus faibles que celles du même alliage forgé. Les défauts de fonderie, fréquents dans les pièces moulées, diminuent encore leur résistance globale, certains de ces défauts, dus aux gaz occlus ou à la contraction du métal au refroidissement, peuvent être évités par un tracé judicieux des formes.

2.2. Moulage en sable

Le moulage en sable consiste à couler le métal en fusion dans l'empreinte du moule en sable, réalisée d'après un modèle ayant la forme de la pièce à obtenir.

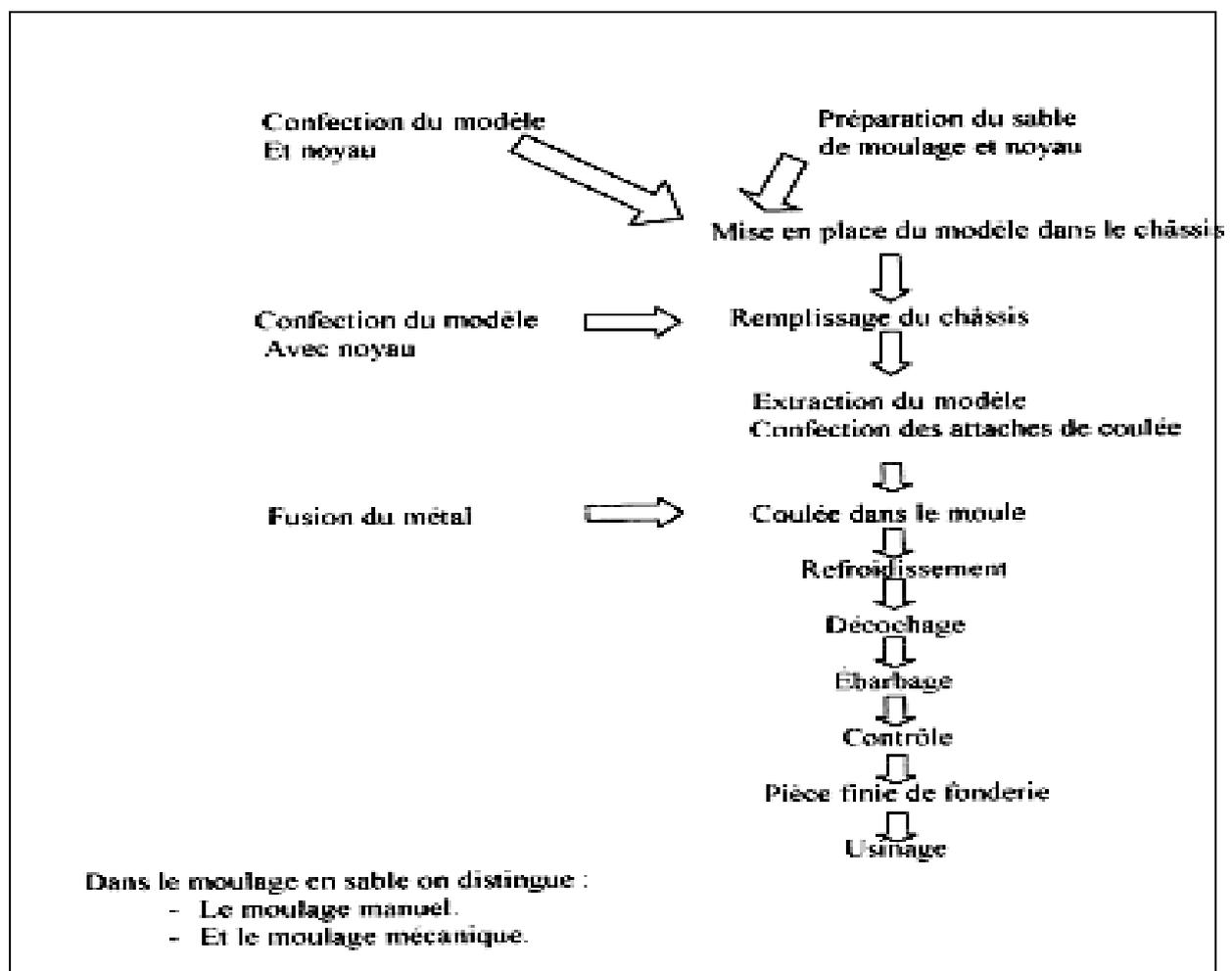
Le moulage en sable est le procédé Le plus ancien et convient presque pour tous Les métaux et alliages de moulage. Il s'adapte bien aux petites séries de production et surtout pour les pièces de grandes dimensions.

Un moule simple est constitué de deux parties :

- La partie supérieure.
- Et la partie inférieure.

La figure 106 représente un moule en sable avec les différentes parties essentielles. Le métal en fusion est coulé à travers le trou du système de coulée, en traversant les canaux jusqu'à remplissage de l'empreinte. Après refroidissement et solidification, la pièce est sortie pour subir les différentes opérations de finition. L'ensemble des opérations de moulage en sable est donné par le schéma

ci-dessous :



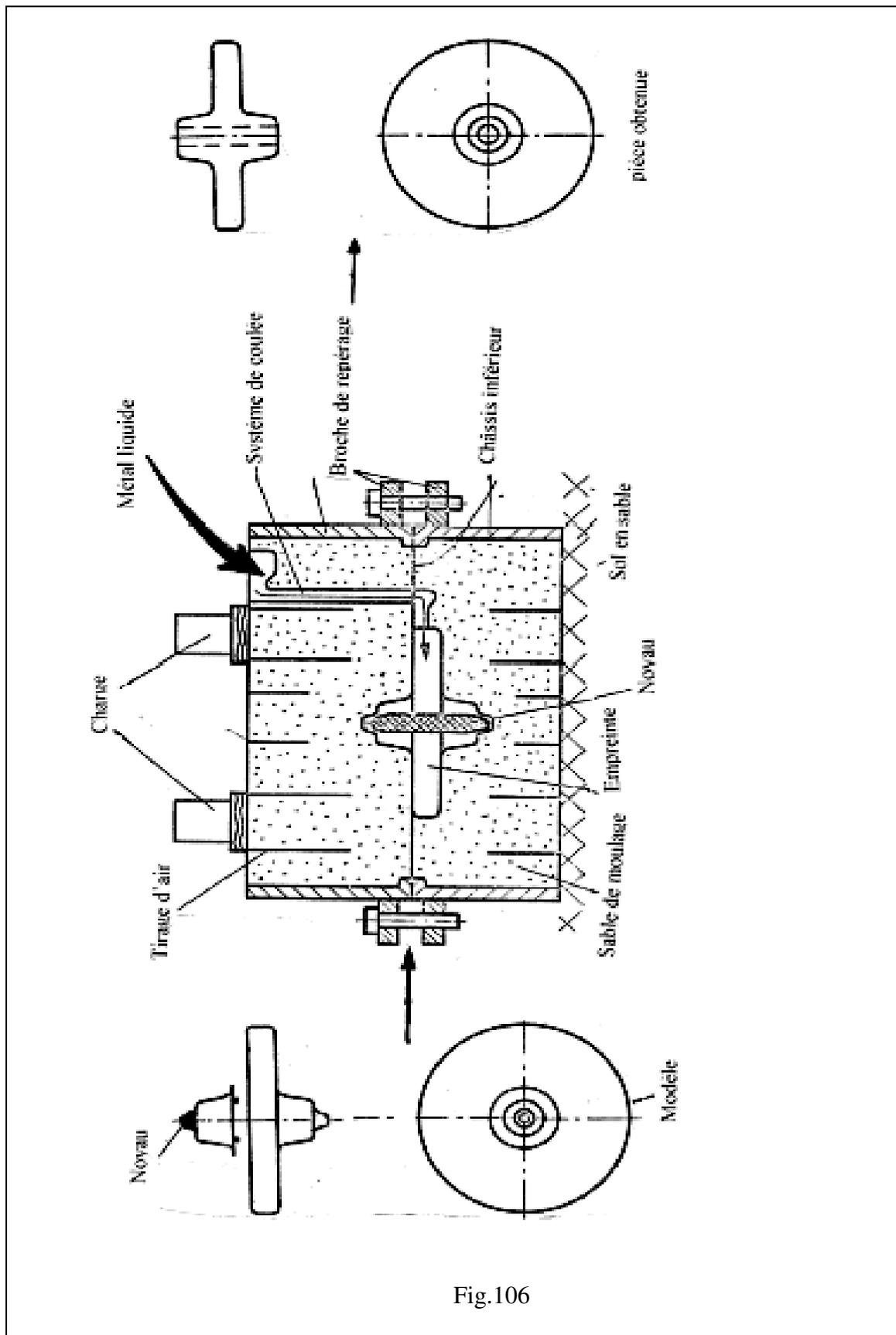


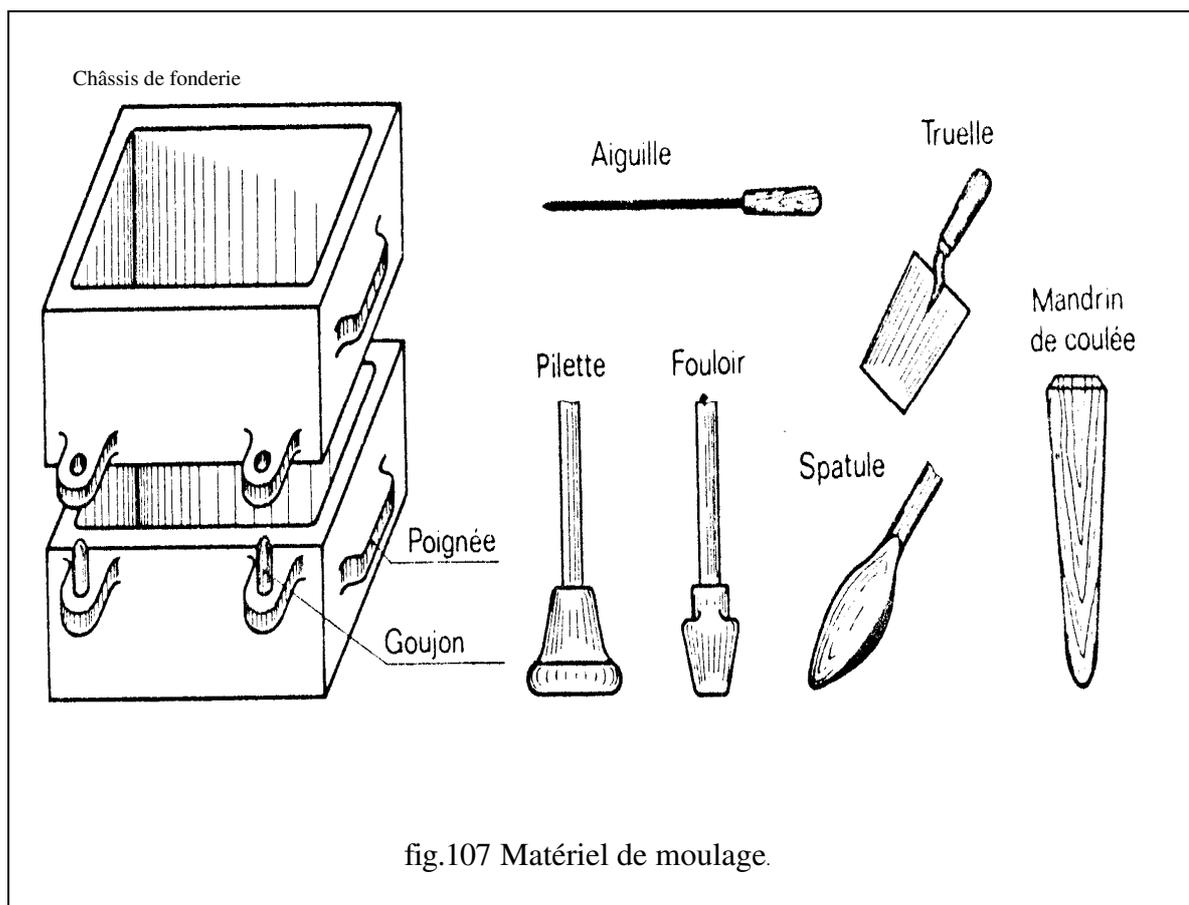
Fig.106

3.2.1. Moulage en sable manuel

Le moulage en sable manuel est utilisé surtout pour la fabrication des pièces unitaires et des pièces de grandes dimensions, qui ne peuvent pas être réalisées dans des machines de moulage.

La figure 107 représente le matériel nécessaire pour le moulage en sable manuel :

- Modèle et noyau.
- Châssis.
- Sable de moulage.
- Métal liquide.
- Aiguille (pour la confection de trous d'air).
- Truelle (pour rendre lisse la face de joint du moule).
- Pilette, Fouloir (pour le compactage du sable).
- Spatule (pour rendre lisse les différentes surfaces du moule après démoulage).
- Mandrin de coulée (pour la confection du trou de coulée).
- marbre; (sur lequel s'effectue la préparation du moule).



3.2.1.1. Le modèle

Le modèle est une représentation sous forme d'une pièce ou ensemble de pièces de l'objet à fabriquer et permettant la confection de l'empreinte du moule en sable.

Il est exécuté en bois ou en métal d'après le dessin de fabrication, c'est à dire le matériau utilisé pour la confection du modèle dépend essentiellement du procédé de moulage (manuel ou mécanique).

Un modèle doit posséder :

- Une bonne résistance contre les contraintes mécaniques.
- Une bonne résistance contre les contraintes chimiques (humidité, liant du sable, gaz etc.).
- Une bonne résistance contre les contraintes thermiques (échauffement du modèle dans les différents procédés de moulage).
- Une précision de la forme et des dimensions.
- Bas prix de revient.

Le bois reste depuis longtemps la matière essentielle pour la confection des modèles. Pour chaque type de bois on trouve des propriétés différentes. On utilise surtout des bois traités, sans fissures et sec (moins de 10% d'humidité) pour prévenir leur déformation au cours du séchage.

La surface de travail doit être lisse et résistante à l'usure. Pour exécuter des pièces en grande série, les modèles sont métalliques, ils sont usinés, polis et montés sur des plaques modèles métalliques.

Ils sont conçus à partir de différents alliages tels que :

- Alliage d'aluminium.
- Alliage de magnésium.
- Alliage de zinc.
- Alliage de cuivre.
- Fontes et aciers.

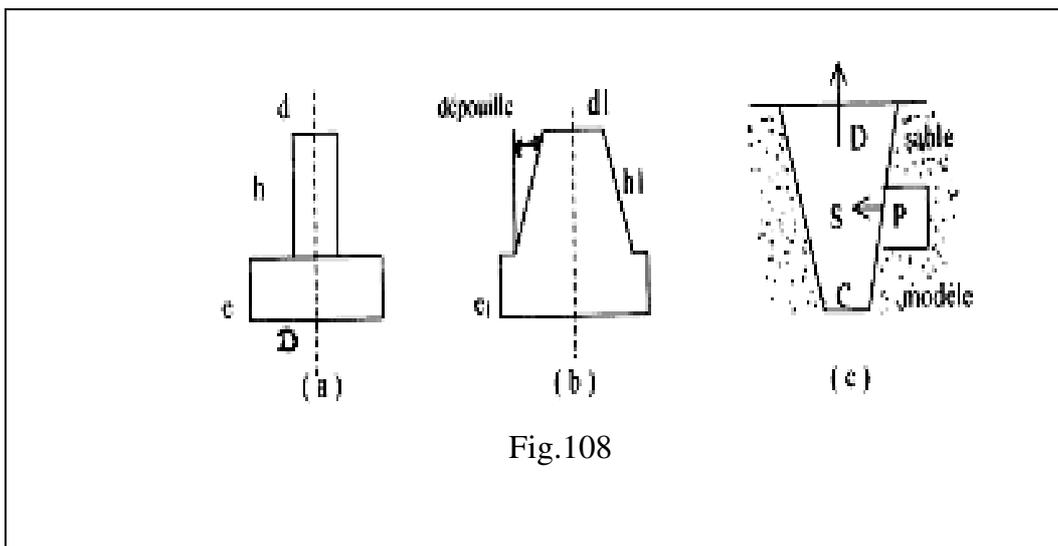
Sur les surfaces des modèles sont appliqués des enduits destinés à améliorer leurs propriétés de surface. La couche mince d'enduit ne doit pas avoir une influence sur la forme et les dimensions du modèle.

Les enduits métalliques sont obtenus par galvanisation ou chromatisation et non métalliques par peinture.

Lors de la réalisation du modèle on doit tenir compte :

- a) De l'usinage s'il y a lieu, dans ce cas la pièce brute doit comporter des surépaisseurs qui seront enlevées durant l'opération d'usinage. Donc les dimensions du modèle doivent être augmentées de 2 à 3 mm. Généralement la grandeur de la surépaisseur d'usinage est choisit suivant un tableau spécial. Elle dépend essentiellement de la nature du métal à couler, des dimensions de la pièce et de la position de ses surfaces pendant la coulée.
- b) Du retrait, car lors du refroidissement le métal se contracte, le retrait est la valeur de cette contraction. Donc on majore les dimensions du modèle de 1% pour la fonte et 2% pour l'acier.
- c) De la dépouille, les formes du modèle doivent permettre son extraction du sable sans dégradation du moule. Dans ce but, on donne une certaine inclinaison aux parois du modèle c'est la dépouille (pente de 3 à 10%), figure4.b. La dépouille est absolument nécessaire.

La dépouille peut se faire en augmentation à égalité de la pièce ou encore en diminuant les dimensions de la pièce, si le rôle de celle ci n'est pas important. En général le modèle est souvent en plusieurs parties démontables pour faciliter le démoulage et permettre la sortie des parties en contre dépouille. Lorsqu'une partie du modèle fait saillie sur le modèle et a une direction autre que celle générale du moulage, il est bien évident que l'on ne peut démouler cette partie au même temps que le modèle sans arracher une portion du sable du moule. Pour éviter cet inconvénient on fait cette partie du moule démontable, au moment du démoulage le corps C (figure.108 c) est démoulé dans la direction générale du démoulage D, alors que la partie démontable P reste dans le moule, et elle est ensuite démoulée suivant la direction S dans la cavité du moule laissé par le corps C démoulé.

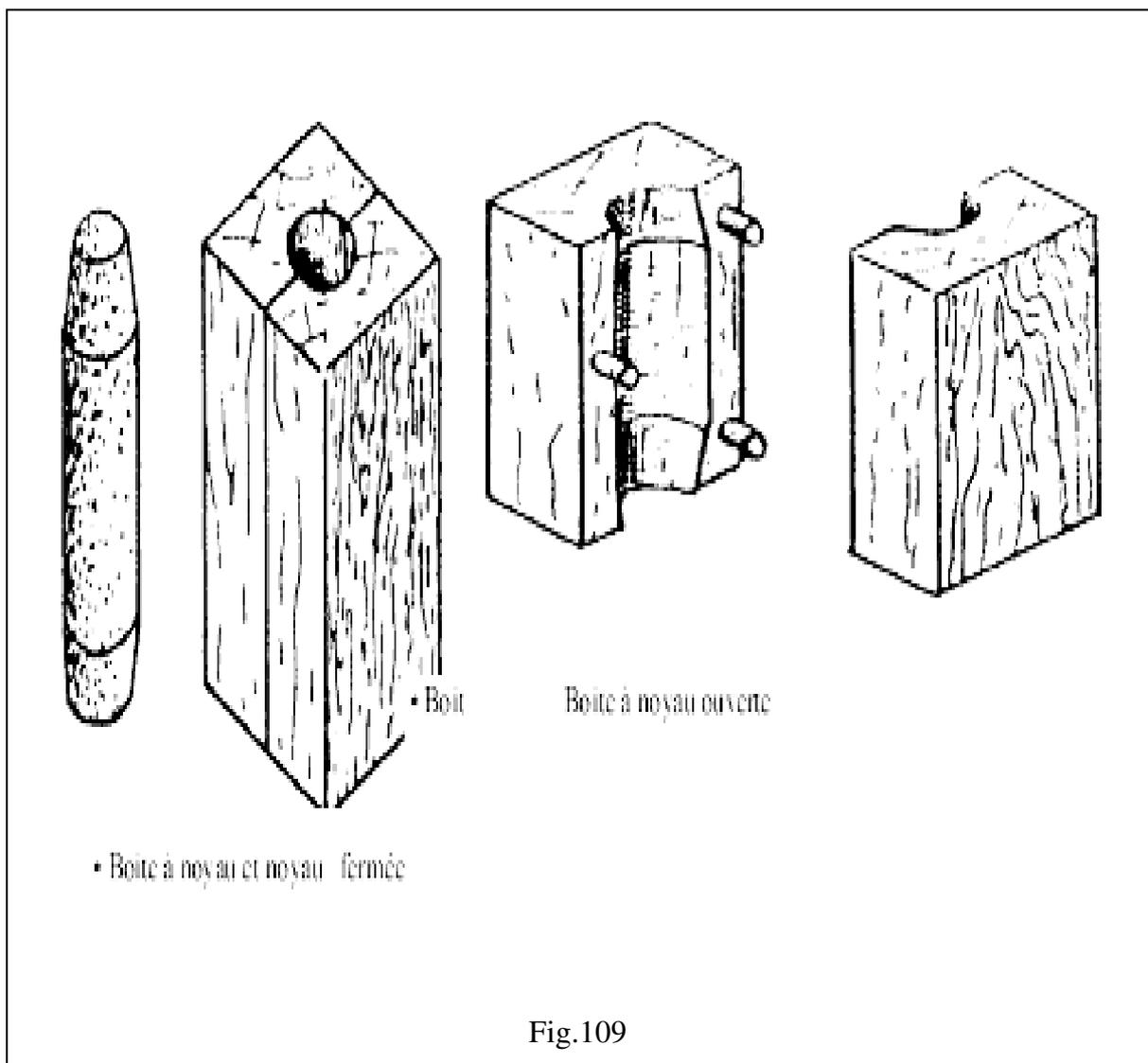


Les modèles peuvent être aussi creux ou pleins. Les modèles de petites dimensions sont massifs et au contraire ceux de grandes dimensions sont creux afin de diminuer le prix de revient, ainsi que leur poids.

3.2.1.2. Noyau et boîte à noyau

Pour obtenir le contour intérieur de la pièce on emploie les noyaux, qui sont placés dans le moule. Le moulage avec noyau s'impose lorsque les pièces présentent des évidements qu'il serait difficile ou même impossible d'obtenir par moulage au naturel.

Le noyau est confectionné en sable auto-siccatif, dans un moule appelé boîte à noyau en bois ou métallique figure. 109 et se compose de deux parties assemblées par des groupes de repérage.



Lorsque le sable est serré ce dernier prend la forme du moule. Le noyau est sorti de la boîte sans détérioration, ensuite il est séché (cuit) à F étuve pour lui donner une solidité lui permettant de résister à l'érosion du métal en fusion et aux efforts de compression qu'il subit lors du refroidissement de la pièce

L'incorporation de certaines résines synthétiques au sable du noyau permet :

- Soit un moulage du noyau dans une boîte métallique chauffée modérément et dans laquelle le sable est injecté. Le durcissement dure alors moins d'une minute. Un dispositif pneumatique porté par la machine assure l'ouverture et la fermeture de la boîte.
- Soit un moulage à la main et un durcissement à froid moins rapide, mais qui dispense de l'étuvage habituel (séchage thermique ou durcissement chimique).

Les dimensions du noyau sont établies comme celles du modèle, en tenant compte des surépaisseurs d'usinage, du retrait et de la dépouille éventuellement. Pour la fabrication des pièces en petites série, on utilise les noyaux perdus, qui sont confectionnés à partir du sable siliceux et liant. Ces noyaux sont détruits lors de l'extraction de la pièce coulée.

Pour la fabrication de pièces en grande série, on utilise le plus souvent les noyaux en acier ou en fonte, afin d'éviter leur collage avec la pièce, ils sont peints avant la coulée avec un noir résistant à la chaleur. Lors de l'extraction de la pièce, ils ne sont pas détruits et peuvent être réutilisés.

2.2.1.3. Le sable de moulage

Le sable de moulage doit être infusible (résister à la température de coulée du métal), résistant (résister à l'érosion du métal liquide) et poreux (ne peut s'opposer au passage des gaz produits au moment de la coulée), et se compose en général :

- a)** de sable quartzeux (86-96%) pratiquement infusible en contact avec le métal liquide.
- b)** d'argile (bentonite) (3-10%) qui lie les grains de silice entre eux et empêche le moule de se détériorer après enlèvement du modèle. Dans certains cas au lieu de l'argile on utilise d'autres liants tels que : huiles végétales, verre soluble, dextrine, résine, bitumes, lessive sulfurique etc...
- c)** Le noir de fonderie, graphite pulvérisé ou noir végétal (2-6%) (Charbon de bois pulvérisé) qui brûle en contact du métal en fusion et donne ainsi au moule la porosité et la perméabilité nécessaire à l'évacuation des gaz (eau, vapeur d'eau, oxyde de carbone) qui seraient emprisonnés dans l'empreinte.
- d)** On incorpore de l'eau, des résines turanniques accompagnées d'un catalyseur dans la proportion globale de 1,5%. Les résines provoquent le durcissement assez rapide du moule à la température ambiante. On distingue les sables :

- de contact qui adhèrent à la surface du modèle et se trouve en contact avec le métal en fusion.
- de remplissage (vieux sable) utilisé pour combler tout le volume du châssis.
- unique utilisé dans les fonderies mécanisées, où on a recours au sablage mécanique.

On emploie le sable unique pour remplir tout le volume du châssis. Sa cohésion, sa perméabilité et refractairité sont élevées. Les compositions et différentes propriétés des différents types de sables sont représentées dans le tableau ci-dessous.

Composition et propriétés des sables de moulage
(pour le sable vert)

Sable de moulage	Composition %				Propriétés		
	Sable décaoché	Sable quartzeux	Argille (bentonite)	additions	Humidité %	Perméabilité	Résistance à la compression en état humide ($K_g \cdot t / cm^2$)
Sable unique	85-90	Moulage de 10-5	3 (1-0.5)	Lessive 1-sulfurique 0.5 charbon	4-5	70-80	0.4-0.6
Sable de contact	50-60	40-30	6.5-5.0 (2-1.5)	2-lessive sulfurique 3-charbon	4.5-5.5	80-100	0.5-0.6
Sable de remplissage	96-98	3-45	1.0-0.5	-----	5-5.5	60	0.3-0.4
Sable unique à grande résistance (pour la machine automatique)	93-96	3.5-2	----- (2-1.5)	1-charbon 0.1-amidon	3-3.4	120-150	1.5-1.7

Moulage de l'acier

Les sables utilisés pour le moulage de l'acier doivent être plus réfractaires et ne contiennent pas de charbon. Pour les sables au lieu de l'argile on utilise la bentonite. Afin d'augmenter la réfractarité du sable de contact, on introduit dans le dernier un quartz pulvérisé.

Moulage des aciers non ferreux

Sable unique pour Les alliages d'aluminium	82-87	10-5	10-8	-----	4.5-5.5	20	0.3-0.5
Sable unique pour les bronzes	80-85	10-5	12-8	1.5-char-	4.5-5.5	30	0.3-0.5

3.2.1.4. Sable a noyaux

La composition des sables de moulage et de noyaux est très diverse et dépend de la nature du métal, de l'épaisseur des parois de la pièce, de sa masse, forme etc...

Les sables a noyaux doivent être plus compressibles, réfractaires et perméables que les sables de moulage car autour du noyau se trouve le métal liquide, c'est pourquoi pour le noyautage on utilise des matériaux plus réfractaires (la proportion en sable quartzéux est élevée). Donc l'élément de base d'un noyau est le sable siliceux avec addition des agglutinants et agglomérants. L'argile naturelle représente un type d'agglutinant et peut devenir plastique en présence de l'eau, son rôle est de souder entre eux les grains de silice. L'agglomérant est destiné à donner une résistance après cuisson. Les différents types d'agglomérants utilisés en fonderie sont la dextrine, huile de lin, l'huile cuite, produit de pétrole distillé, lessive sulfurique. Ces deux types de liants sont introduits en quantité de 1 à 5% pour augmenter les propriétés du sable et cela grâce a la formation d'une pellicule dure autour des grains du sable pendant le séchage. Pour la fabrication des pièces en alliages non ferreux on utilise du sable argileux et pour les alliages a base de magnésium on ajoute 0.51% de soufre jusqu'à 0.5%, d'acide borique pour éviter l'action nocive de l'oxygène. Dans le cas des sables spéciaux tels que, le sable au silicate de soude, le sable soumis l'action du gaz carbonique (CO₂) durcit instantanément, ce sable contient 95÷97% de sable quartzéux, d'argile, 5÷7% de verre soluble ou de sable auto-durcissable qui assure son durcissement pendant 3÷5min. Pour cela on doit introduire dans le sable 5% de verre soluble et 2+3% de laitier contenant Cr₂O₃.

3.2.1.5. Le châssis

C'est un cadre rigide fabrique en fonte, en acier ou en aluminium parfois en Bois, sans fond destiné à contenir et à soutenir le sable constituant le moule. Un châssis complet comprend au moins deux parties figure.110

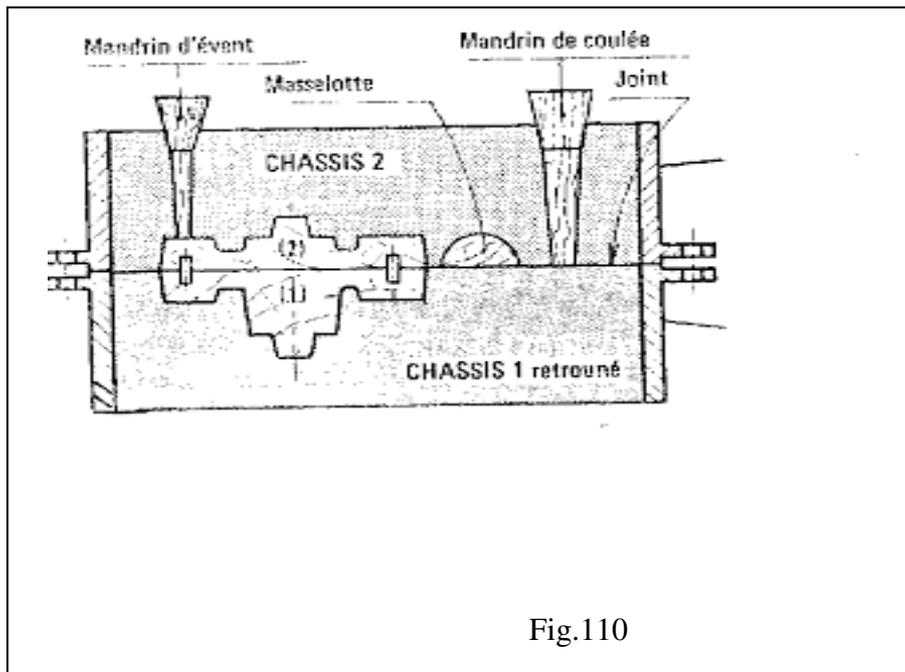


Fig.110

- Partie supérieure ou châssis de dessus.
- Partie inférieure ou châssis de dessous.

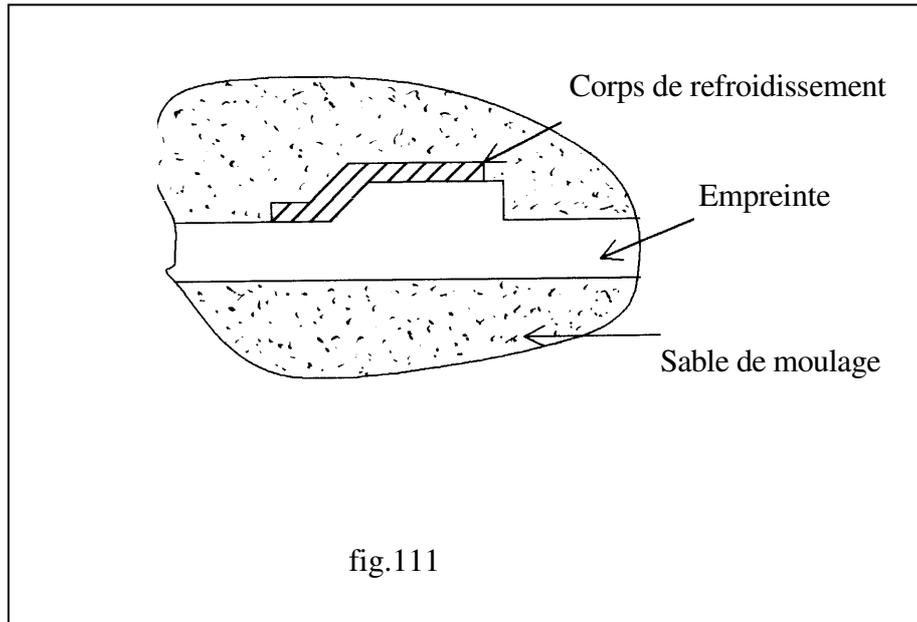
Les châssis sont nervurés intérieurement et dans le cas échéant, quand les conditions de moulage l'exigent on ajoute une partie intermédiaire appelée chape (partie du moule intercalée entre le dessous et le dessus).

Les châssis portent des oreilles percées permettant un repérage précis à l'aide des broches ou des goujons. On trouve également sur les cadres des poignées de manœuvres et de pattes de crampons qui servent à placer des serre-joints ou des étriers destinés à empêcher la partie du moule de s'écraser sous la pression du métal liquide lors de la coulée (dans le cas des châssis en bois).

On appelle motte, le modèle dont on a enlevé le châssis, avant coulée pour l'utiliser de nouveau.

3.2.1.6. Les corps de refroidissement

Les corps de refroidissement forment une certaine partie à la surface de la pièce coulée et sont destinés à absorber rapidement la chaleur du métal coulé. Ils sont introduits dans le moule aux endroits favorisant les retassures figure.111.



L'épaisseur du corps de refroidissement est d'environ 0.7 fois l'épaisseur de la paroi de la pièce.

3.3 Opérations d'exécution manuelle d'un moule en sable.

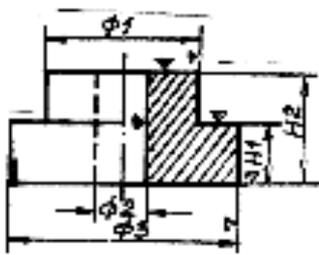
Soit à exécuter le moule de la pièce représentée par son dessin de définition figure.112.1, le modèle est représenté par la figure.112.2

L'exécution manuelle d'un moule en sable comprend les opérations suivantes :

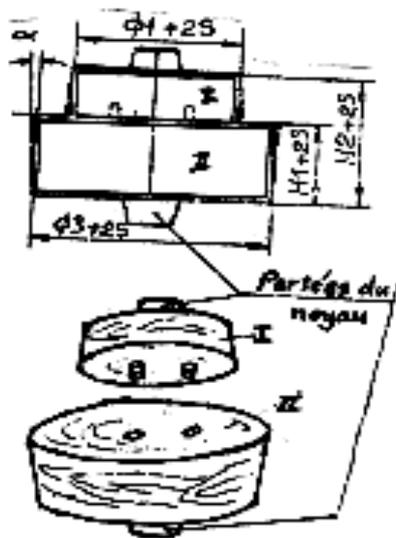
a) Confection de la partie inférieure du moule

- La partie II du modèle est placée sur un marbre sur lequel se trouve le châssis inférieur.
- Le sable de moulage neuf est tamisé sur la face du joint, autour et au dessus du modèle.
- Remplir progressivement le châssis de sable vieux tout en serrant au fouloir et à la pilette.
- Le châssis est retourné pour que la face de joint soit lissée à la truelle, ensuite elle est saupoudrée avec du sable blanc sec exempt d'argile. Ensuite enfoncer légèrement le mandrin de coulée et le mandrin d'évent.

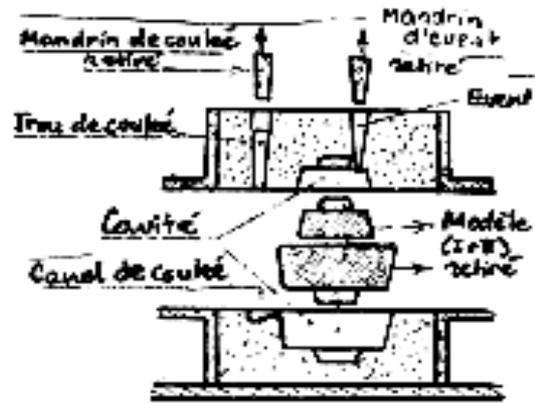
① Dessin de définition



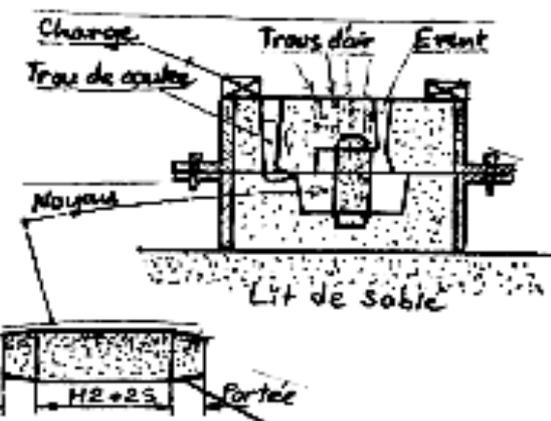
② Modelage



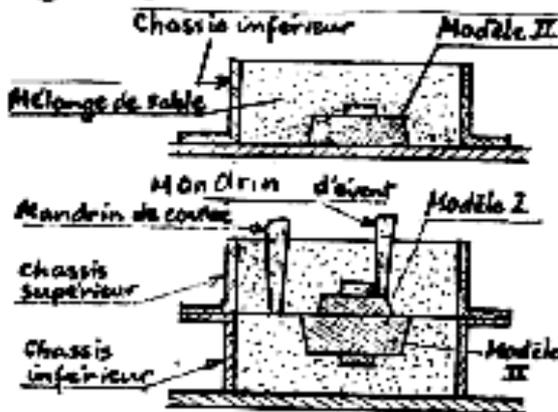
④ Démoulage



⑤ Remouillage



③ Montage



⑥ Coulée du métal

⑦ Pièce brute



Fig.112

b) Confection de la partie supérieure du moule

- Goujonner le châssis de dessus.
- Placer la partie I du modèle.
- Tamiser du sable de moulage neuf, puis enfin de sable vieux et serrer.
- A l'aide de l'aiguille piquer les trous d'air qui faciliteront l'évacuation des gaz.

c) Démoulage du modèle et du mandrin

- Enlever le mandrin de coulée est d'évent.
- Séparer les deux châssis, que le sable blanc saupoudré sur la face des joints empêche d'adhérer l'un à l'autre.
- Sortir le modèle après l'avoir ébranlé doucement en utilisant un tire fond qui facilitera la prise du modèle.
- Exécuter et lisser à la spatule, le bassin de coulée (masselotte) dans le dessus du châssis et le canal de coulée dans le dessous du châssis.
- Lisser légèrement l'empreinte et le saupoudrer de noir de fonderie qui donnera à la pièce des faces bien lisses.

d) Remoulage

Il s'agit de la préparation du moule déjà exécuté en vue de la coulée du métal.

- Pose du noyau s'il y a lieu, on donne au noyau un appui par sa partie ou ses parties hautes, car à défauts lors de la coulée, il serait soulevé par la poussée du métal liquide (principe d'Archimède).
- Pose du châssis de dessus sur le châssis de dessous en vérifiant leur position relative et leur contact. Le moule est posé sur un lit de sable.
- Placer sur le châssis supérieur des poids afin d'éviter son soulèvement lors de la coulée du métal qui forme une certaine pression.

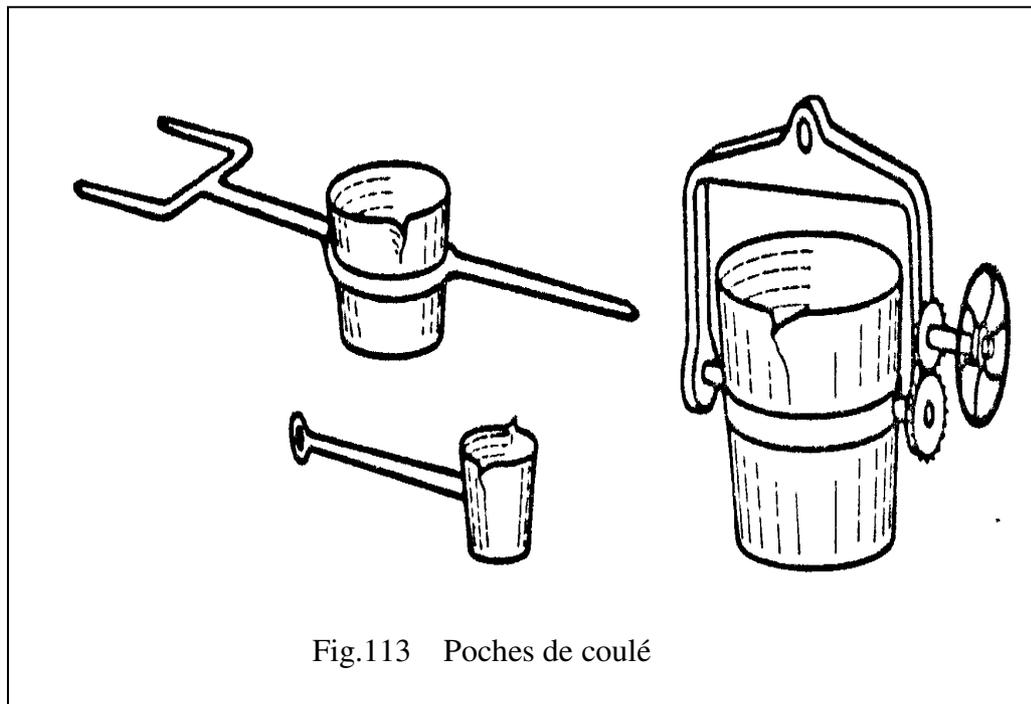
e) Coulée du métal

On peut utiliser le moule tel qu'il vient d'être réalisé et dans ce cas le moulage est dit moulage à vert (en raison de l'humidité du sable, des surfaces externes des pièces, surtout pour la fonte sont durcies après refroidissement ce qui peut provoquer la détérioration rapide des outils de coupe.

Pour éviter ce durcissement superficiel, on pratique le moulage étuvé. Après avoir badigeonné les parois de l'empreinte avec de la poudre noir de fonderie, pour les rendre moins friables, on sèche les moules en étuve. Cette pratique prend beaucoup de temps et nécessite des installations très coûteuses. Ce mode de moulage est évité actuellement par l'emploi de sables contenant des résines furaniques dont le durcissement à froid se prête au moulage à vert dans de très bonnes conditions.

Le métal liquide destiné à remplir l'empreinte du moule est obtenu après fusion dans le cubilot ou dans des fours de fusion, il est recueilli dans une poche de coulée, représentant un récipient en tôle d'acier garnie intérieurement d'un revêtement réfractaire préalablement chauffé fig.113.

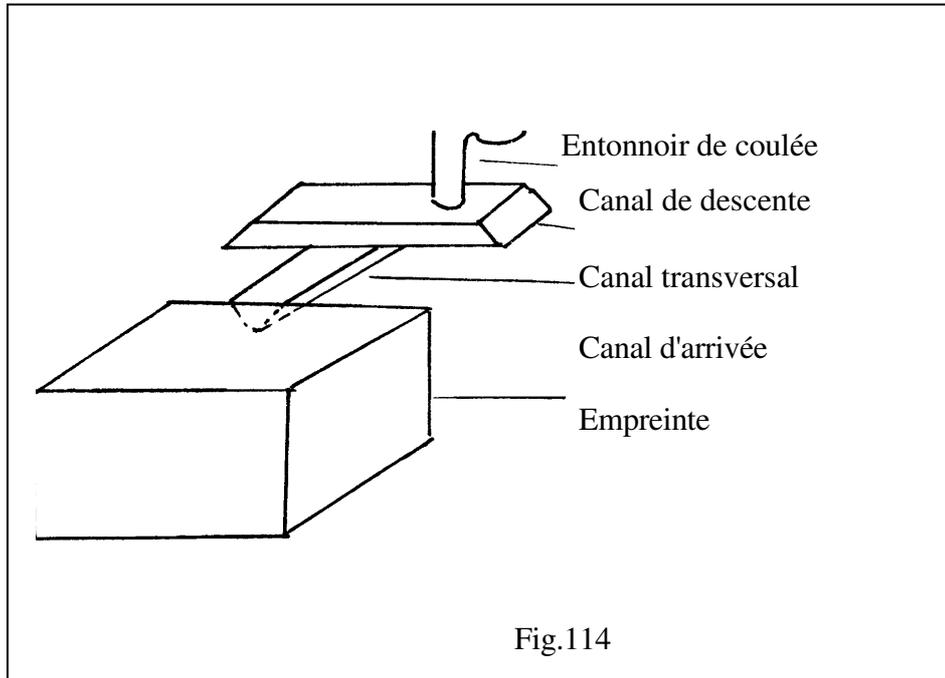
La poche de coulée est transportée et manœuvrée à la main ou mécaniquement, cela dépend de la capacité de cette dernière.



Afin d'éviter les fuites du métal qui se produisent dans le plan de joint du moule à cause de la poussée verticale du métal arrivant dans l'empreinte, on charge le châssis avec des poids (fonte en gueuse par ex.) ou on relie les deux châssis par des goujons.

Le métal liquide est versé par le trou de coulée jusqu'à remplissage complet. Lorsque la quantité de métal à couler est relativement importante ou lorsque la pièce représente des parties hautes, on ajoute des masselottes (évent), dont le volume disponible à pour effet de nourrir l'empreinte, donc ce sont des réserves de métal en fusion qui facilitent le bon remplissage de l'empreinte.

Lors de la coulée, le métal liquide pénètre dans l'empreinte du moule à travers le système de coulée. En général un système de coulée figure. 114 se compose de :



Entonnoir de coulée : Destiné à recevoir et à couler le métal liquide provenant de la poche de coulée vers le canal de descente.

Canal de descente : C'est un canal vertical, destiné à conduire le métal liquide vers les autres éléments du système de coulée.

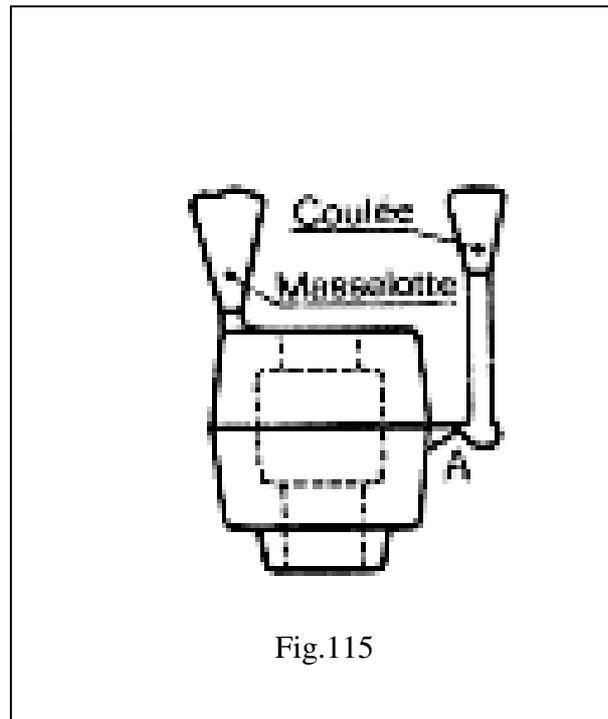
Canal transversal : C'est un canal horizontal ayant en plus le rôle de la conduite du métal, un autre rôle c'est la retenue des particules de la scorie et les autres impuretés non métalliques.

Canal d'arrivée : Il conduit le métal liquide directement dans l'empreinte du moule .

Le plus souvent l'entonnoir de coulée, le canal de descente et le canal transversal se trouvent dans la partie supérieure du moule (châssis supérieur). Les systèmes de coulée peuvent être à 2, 3 ou 4 éléments.

f) Décochage

On commence le décochage de la pièce, seulement lorsque la température est assez basse c'est-à-dire lorsque la pièce est totalement solidifiée. Le système de coulée et éventuellement la masselotte sont séparés de la pièce à l'aide d'un marteau sans détérioration de cette dernière figure.115



g) Le dessablage

L'opération de dessablage est nécessaire, afin de débarrasser la pièce du sable qui adhère à ses surfaces. Au contact du sable froid, le métal se refroidit rapidement et sa surface extérieure est enrobée de grains de sable, on procède le plus souvent par décalaminage par sable (choc au sable silicieux bien sec) ou grenailage par acier projeté au moyen d'un jet d'air comprimé. Le sable provenant du décochage et du dessablage est tamisé, régénère ensuite réutilisé.

h) Ebarbage

L'ébarbage consiste à éliminer le talon de coulée, les bavures aux joints, les picots de trous de coulée et les rugosités, on l'exécute le plus souvent à la meule.

i) Contrôle et traitement thermique s'il y a lieu

j) Usinage, finition, perçage s'il y a lieu

3.4 Différents types de moules

Les moules peuvent être confectionnées en une, deux ou plusieurs parties.

a) Moule à un élément (figure.116)

Ce type de moule se compose d'une seule partie et il est rarement utilisé. L'empreinte reste ouverte à la partie supérieure, ou elle peut être fermée par un noyau.

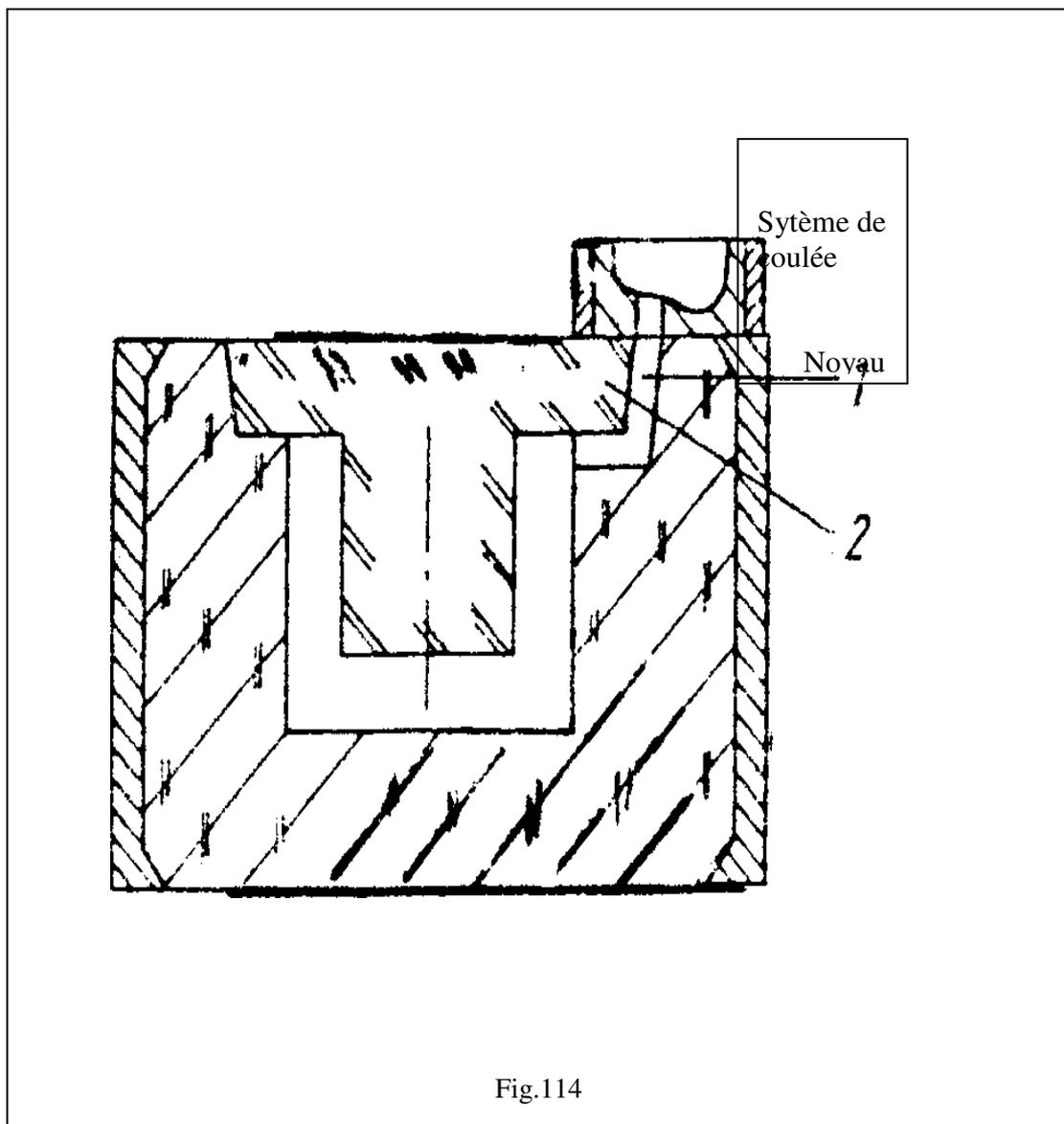
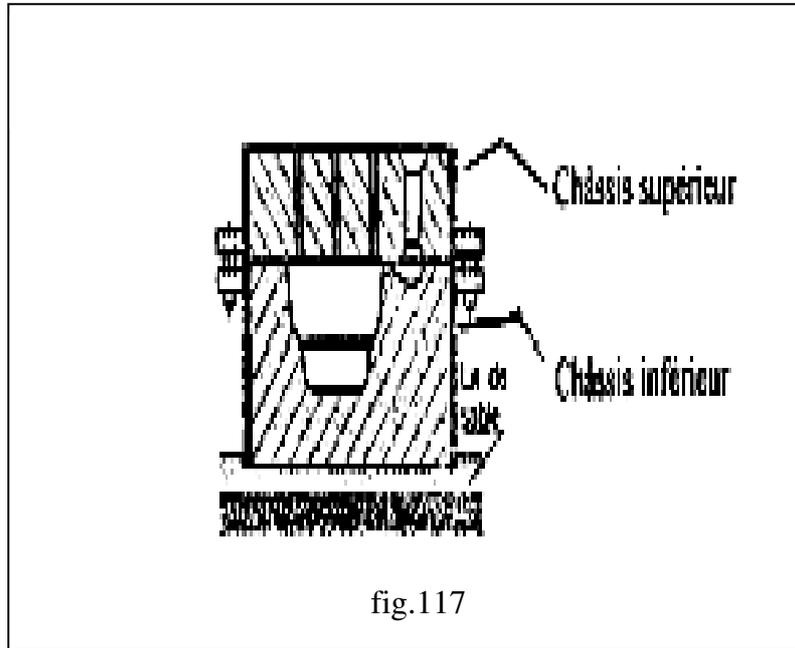


Fig.114

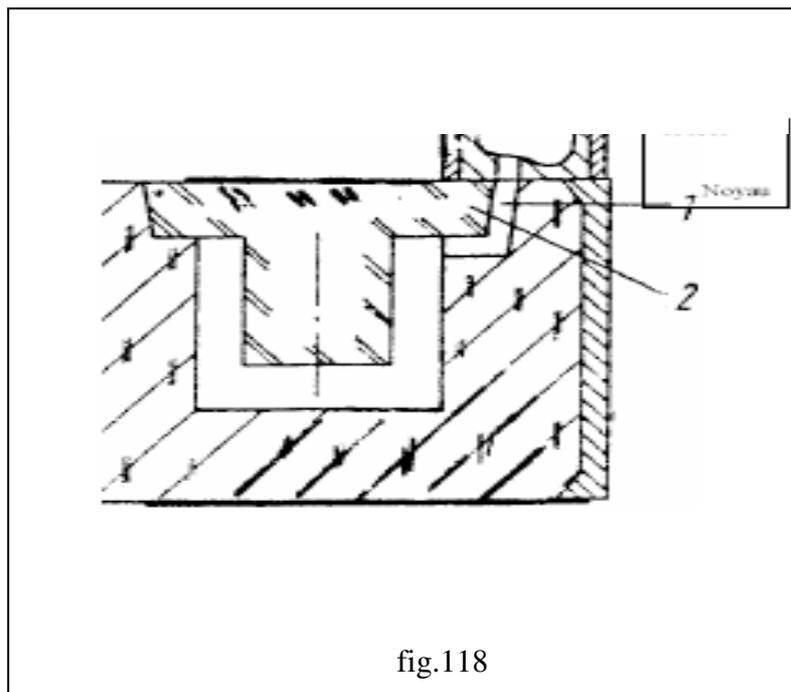
b) Moule à deux éléments (figure.117)

La plupart des moules en fonderie se composent de deux parties, le châssis supérieur et le châssis inférieur. Dans ce cas la plus grande surface des modèles doit se situer dans le plan de joint des châssis.



c) Moule à plusieurs éléments (figure. 118)

Dans ce cas le moule est constitué de trois ou plusieurs éléments. Le châssis intercalé entre le châssis supérieur et inférieur est appelé chape. Pour ce type de moule, le modèle doit avoir deux plans de joint.



Le rendement du moulage en sable manuel est très bas et ne peut être utilisé pour une production du type grande série, le plus souvent on a recourt au moulage à la machine ou aux procédés spéciaux tels que moulage en coquille sous pression, centrifuge, en carapace ou en cire perdue et autres.

3.5 Moulage à la machine (mécanique).

Le moulage à la main ne se pratique que pour un nombre de pièce réduit ou pour des pièces volumineuses, en plus la serre du sable à la main est longue, pénible et souvent peu régulière. De plus le démoulage est délicat, car s'il n'est pas fait verticalement, les arrachements du sable imposent des retouches et peuvent rendre le moule inutilisable. Tous ces inconvénients peuvent être supprimés par le moulage mécanique.

Donc dans le moulage mécanique, le sable est serré mécaniquement soit :

- Par pression.
- Par secousses.
- Ou le plus souvent par combinaison des deux procédés (pression et secousses).
- Et par projection.

L'empreinte de la pièce n'est plus donnée par un modèle ordinaire, mais par un modèle fixe sur un support dont l'ensemble est appelé plaque modèle, d'où les pièces obtenues par moulage mécanique sont limitées en dimension s par la grandeur des châssis.

3.5.1 Plaques modèles

a) Plaques modèle double face

C'est une plaque métallique portant sur une face la forme du joint et du relief donnant une des deux parties du moule et sur l'autre face le joint et le relief de l'autre partie du moule. Après assemblage ces deux parties doivent être en parfaite concordance (la surface de joint sépare le modèle en deux parties situées de part et d'autre d'une plaque d'épaisseur constante). La plaque modèle double face porte souvent des tourillons qui sont montés dans des paliers de la machine à mouler et permettent à la plaque de tourner sur elle même. Une seule machine à mouler peut donc serrer alternativement les deux parties du moule en faisant faire à chaque fois un demi-tour à la plaque modèle.

b) Plaques modèle réversibles

Cette plaque porte la même face, les modèles des deux faces d'une plaque double face. Elles sont disposées de façon que le moule permette la coulée de deux pièces à la fois.

Donc elle est composée de deux parties identiques retournées l'une sur l'autre.

3.5.2 Machine à mouler

Les machines à mouler sont destinées au :

- Remplissage et serrage du sable dans le moule (moulage).
- Séparation du modèle du moule (démoulage). Elles sont classées selon le principe de démoulage en :

a) Démoulage par montée du moule (figure. 119)

La table de travail demeure fixe dans sa position basse ou elle est revenue après la serre du sable.

Deux positions commandées mécaniquement ou par air comprimé soulèvent alors le moule.

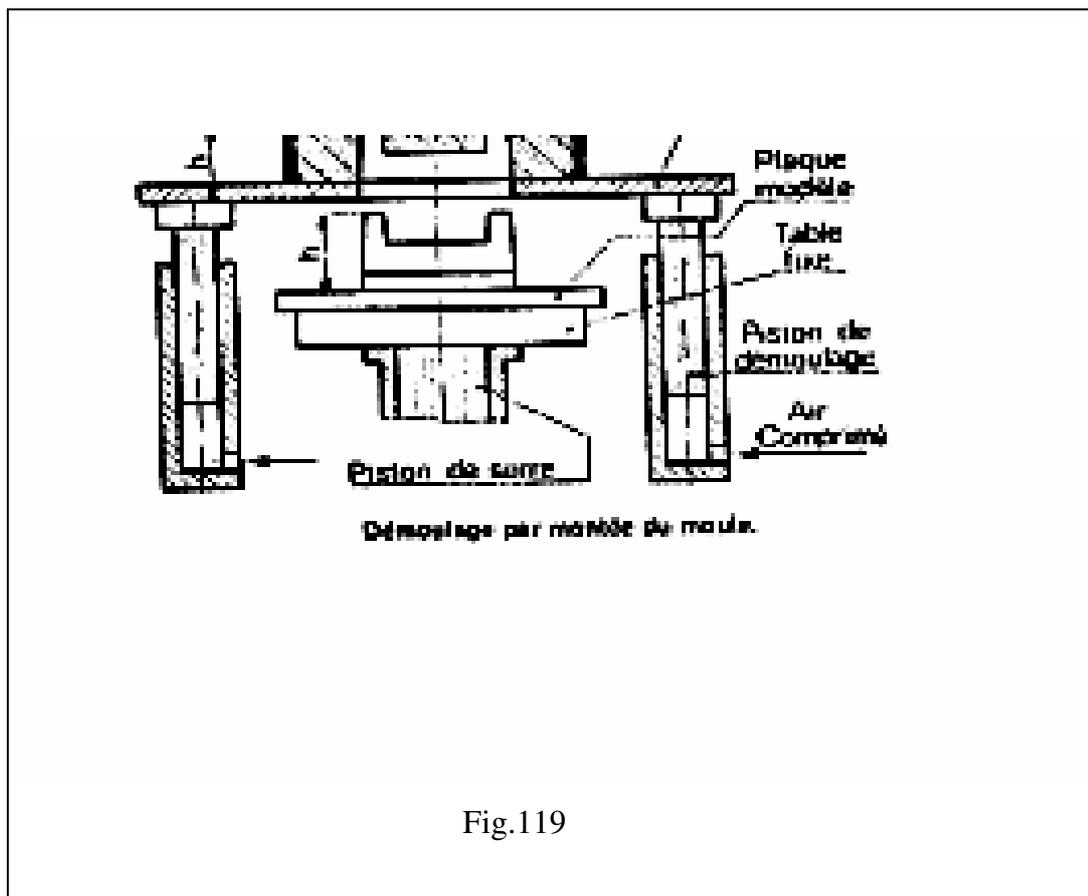
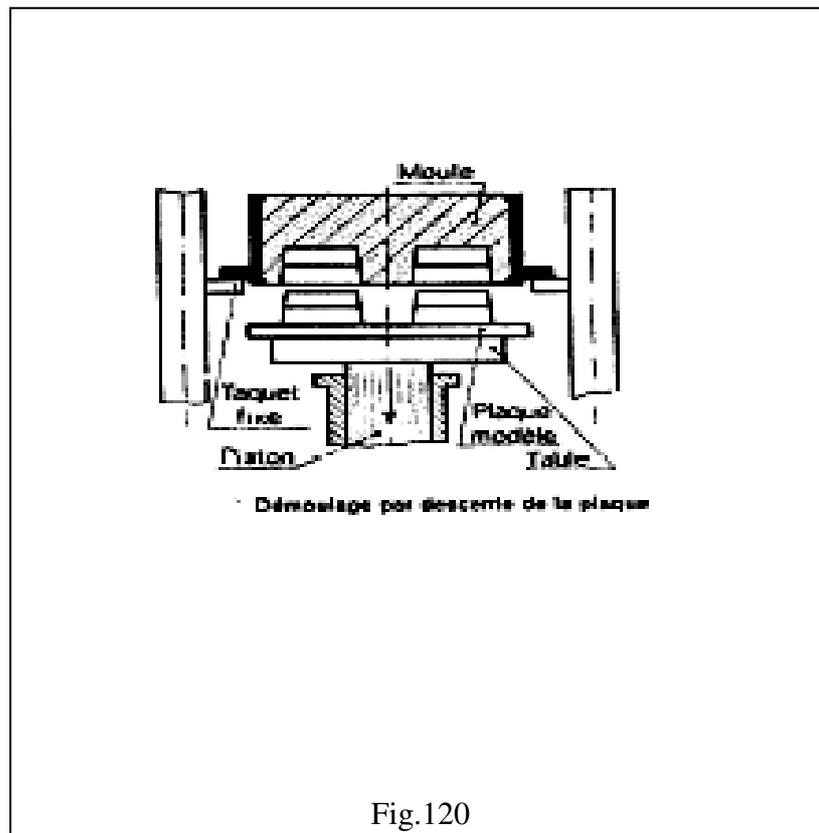


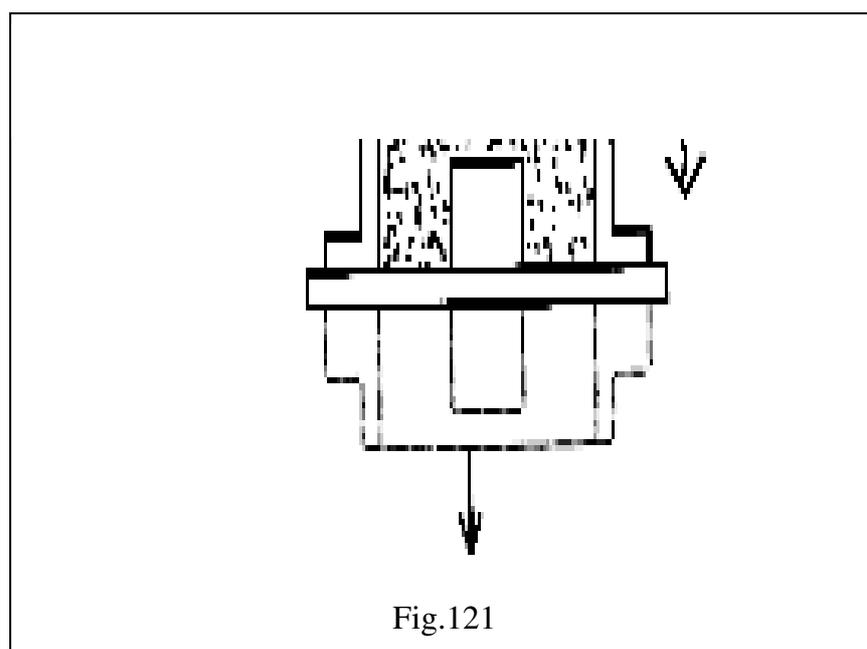
Fig.119

b) Démoulage par descente du modèle (figure. 120)



Le démoulage de la plaque se fait par descente de la table sur laquelle est fixée cette dernière.

c) Démoulage par rotation de la plaque modèle (figure. 121)

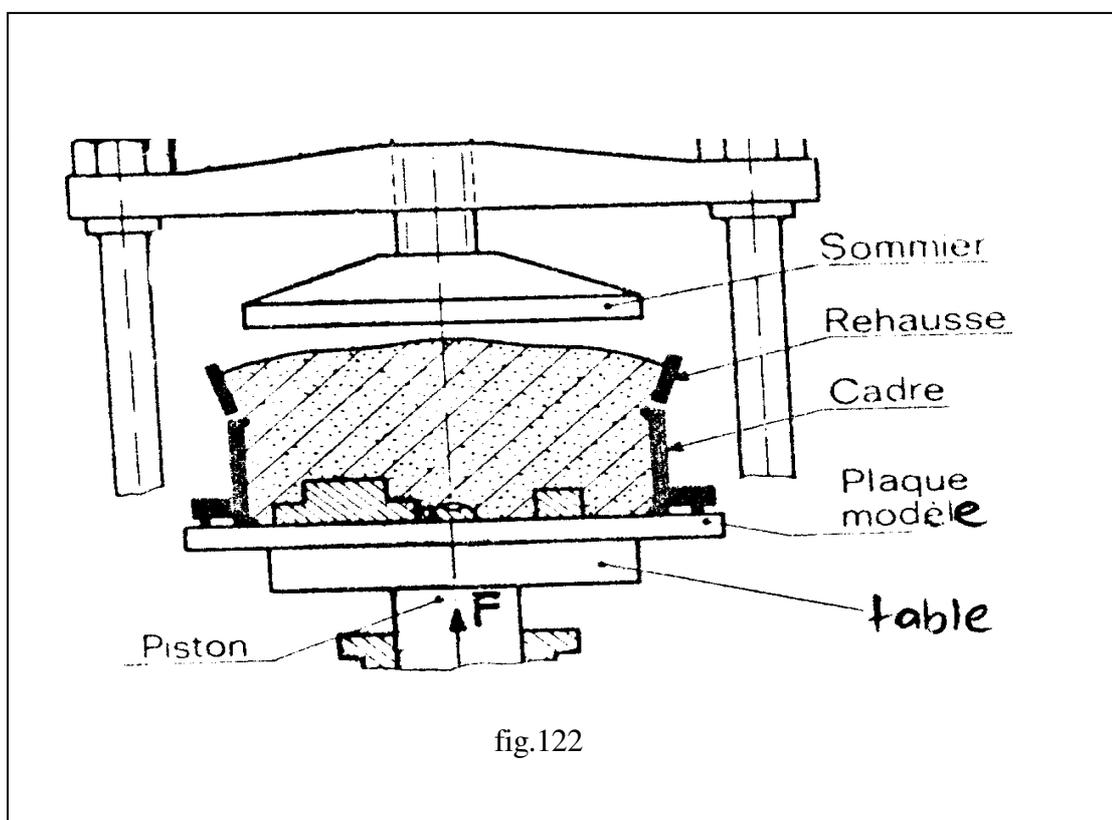


Le démoulage est effectué grâce à la rotation de la plaque modèle. Selon la méthode de moulage et serrage du sable on distingue :

- a) Moulage par pression.
- b) Moulage par secousses.
- c) Moulage par pression et secousses.
- d) Moulage par projection.

1. Moulage par pression

La plaque modèle est généralement fixée sur la table de travail et reçoit le châssis surmonté d'une rehausse destinée à recevoir le volume du sable strictement nécessaire au serrage (figure.122).



Le serrage du sable est possible grâce à la force de serrage F obtenue hydrauliquement, mécaniquement ou par air comprimé.

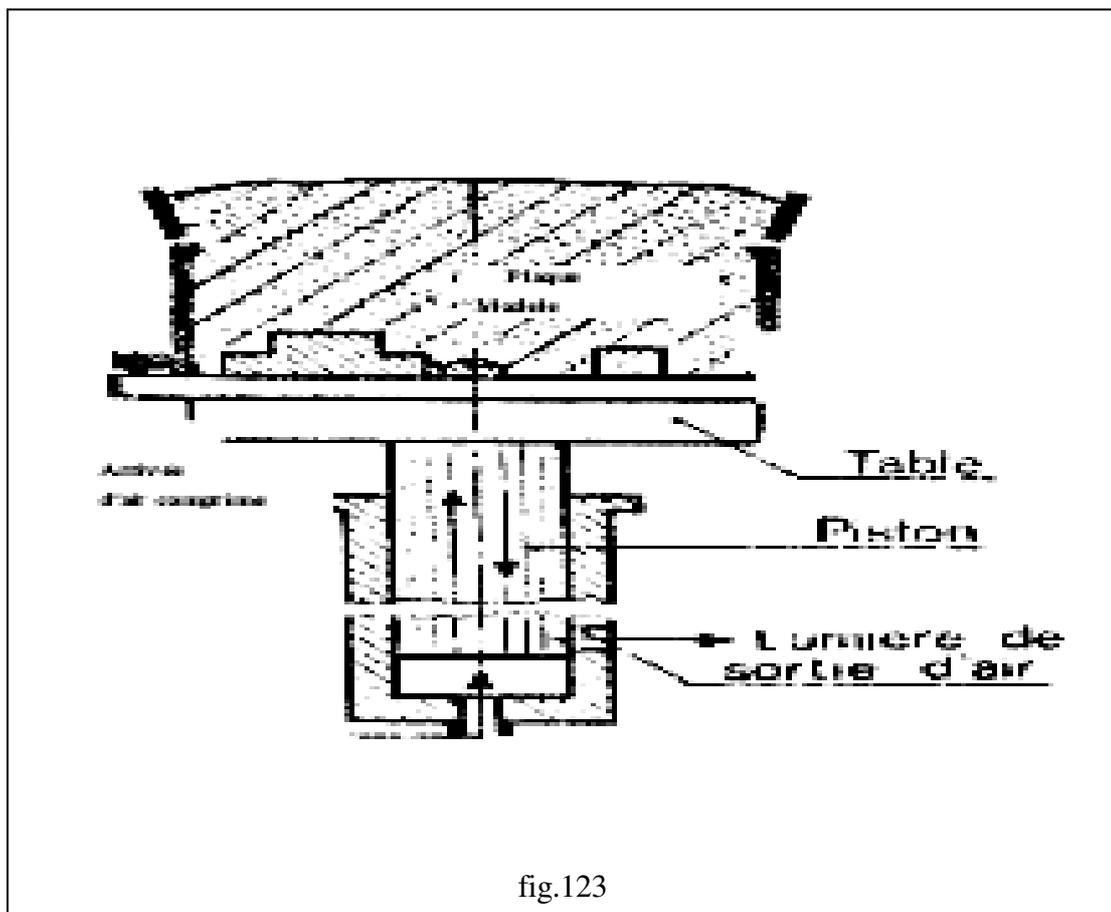
Ce procédé donne une empreinte exacte, donc une pièce à faible tolérance, il est surtout utilisé pour les pièces à faible hauteur.

2. Moulage par secousses

Un piston solidaire d'une table qui porte la plaque modèle et le châssis rempli de sable, le tout est soulevé à une hauteur (30 -100mm)grâce à l'air comprimé arrivant par l'entrée (figure.123).

Lorsque le piston arrive à l'orifice d'échappement, de l'air se dégage et ce qui provoque la chute brutale de la masse et donne le tassement du sable par inertie. Cette opération se répète périodiquement (30 -60 fois pour chaque moule).

La qualité du tassement au sable dépend du nombre de secousses et de la hauteur de la chute.



3. Moulage par secousses et pression

Afin d'éviter les inconvénients du moulage par pression et par secousses, on utilise actuellement la combinaison des deux principes où la serre du sable est plus uniforme au sein de la masse entière du moule. Ce type de machines procède par secousses dans une première action et par pression dans l'action qui suit. L'inconvénient de ces machines est le développement de bruit

3.6. Moulage en carapace (Procédé Croning)

Le moulage en carapace est comme le moulage mécanique en sable et dont il a un aspect particulier. Le métal liquide est coulé dans un moule constitué de deux coquilles appelées carapaces ou masques (figure.124).

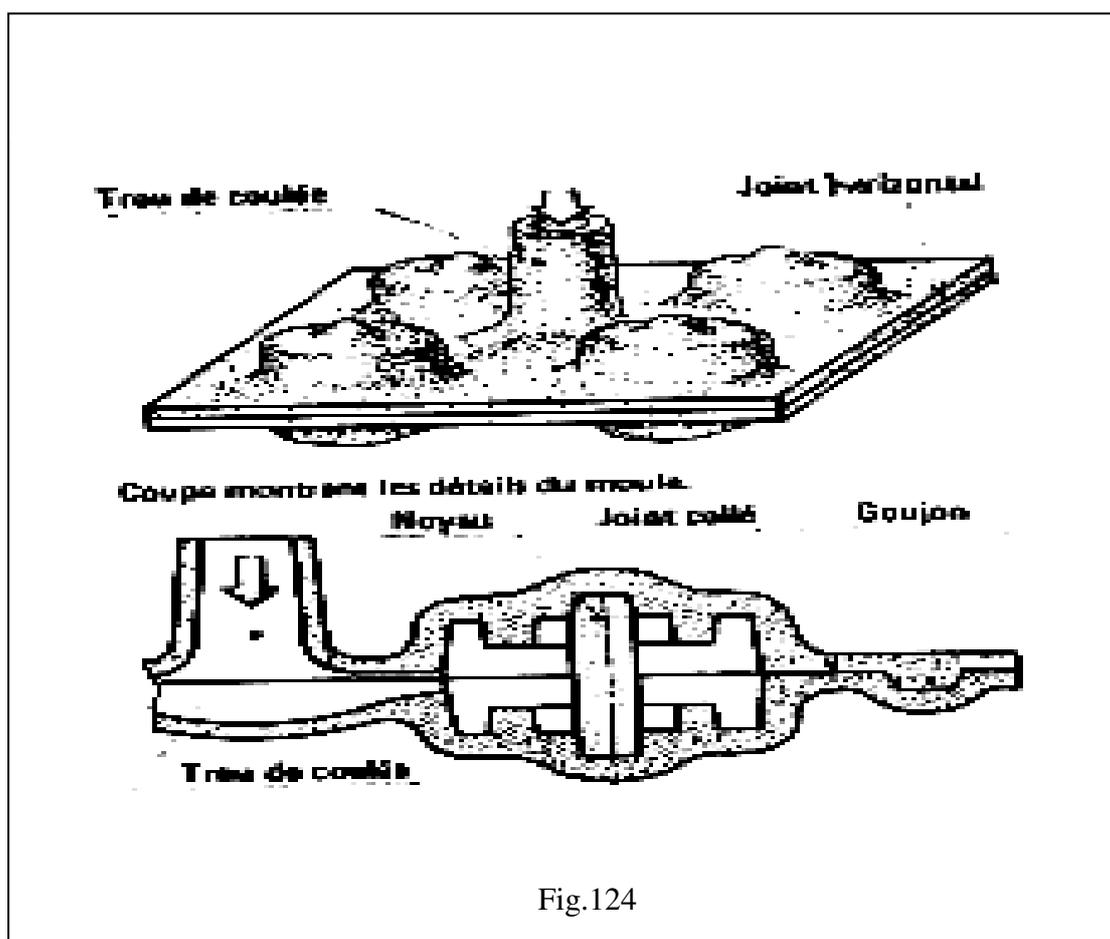


Fig.124

Principe du procédé

1. Préparation du sable de moulage (séchage, additions).
2. Chauffage de la plaque modèle (réversible) jusqu'à 200 -300°C après pulvérisation d'une émulsion destinée à empêcher le collage ultérieur du masque. Le chauffage de la plaque est effectué par un dispositif incorporé à la machine et dont la puissance de chauffage est réglable.
3. Verser sur la plaque-modèle chauffée un mélange de grains de silice (sable) et de résine thermodurcissable (indéformable à la chaleur après solidification). C'est ce mélange de sable

qui est en contact de la plaque modèle chaude qui formera ainsi en 15 secondes une carapace solide d'épaisseur uniforme d'environ 5mm et qui constitue le moule (figure. 125)

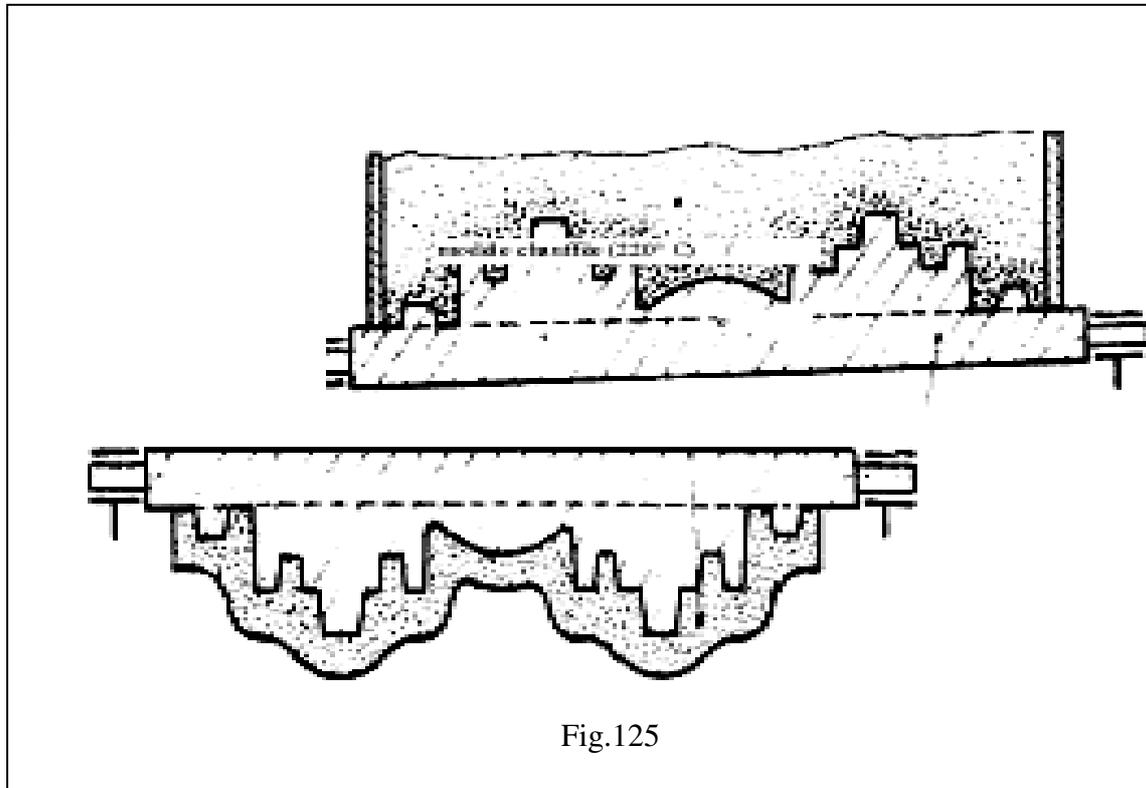


Fig.125

4. L'ensemble caisson et plaque modèle est retourné (basculé) pour laisser tomber le mélange de sable et de résine qui n'a pas adhéré à la plaque modèle.
5. La plaque modèle et la carapace sont ensuite placées dans une étuve pendant 1 à 2 minutes à la température de 350°C. La carapace devient alors très dure et rigide. La surface intérieure en contact avec la plaque modèle est parfaitement lisse, ce qui va donner à la pièce moulée un très bon état de surface.
6. La deuxième partie est préparée identiquement, mais la plaque modèle est munie de mandrin de coulée facilement adaptable et démontable.
7. Les carapaces ainsi formées sont assemblées, éventuellement avec des noyaux et collés. Les trous d'évent ne sont pas indispensables, les carapaces étant perméables. Après l'assemblage le moule est alors prêt pour la coulée.
8. Les pièces moulées sont décochées facilement en brisant les carapaces et le sable de moulage est régénéré ensuite (réutiliser). Les moules à joints verticaux sont placés dans un châssis et calés avec du sable ou de la grenaille de fonte (figure.126).



Fig.126

Lors de la coulée, la résine brûle en contact avec le métal en fusion en provoquant une excellente porosité. Ce procédé s'applique à tous les métaux et permet d'obtenir des pièces brutes avec des tolérances dimensionnelles et de formes beaucoup plus faibles qu'avec le moulage en sable traditionnel. Les frais d'usinage sont alors diminués. Le coût de fabrication élevé de la plaque modèle et le prix non négligeable de la résine font que ce procédé n'est utilisé que pour mouler des pièces petites ou moyennes an grande série.

3.7. Moulage à la cire perdue

Les différents procédés de moulage étudiés précédemment partent tous du principe suivant : le moule est en deux ou plusieurs parties afin de pouvoir en sortir le modèle ou donner l'empreinte voulue à chacune des parties. L'expérience montre qu'un tel moule, même si les différentes parties sont assemblées avec beaucoup de soins, ne permet pas d'atteindre une grande précision. De l'a l'idée de faire un moule en une seule pièce pour obtenir un moulage très précis. Le moulage à la cire perdue est un moulage de précision dont le but est de supprimer tout ou en partie l'usinage s'il y a lieu.

La précision maximum pratiquement obtenue est de l'ordre de $\pm 0.07\text{mm}$ est couramment de 0.3% en valeur relative. Ce mode de moulage est connu depuis la plus haute antiquité.

Les chinois et les grecs l'utilisent pour la fonderie d'objet d'art, il s'est conservé à peu près intégralement pour la fonderie artistique et s'est perfectionné de nos jours pour la coulée de bijouterie et la fabrication de prothèses dentaires en or ou en acier inoxydable exigeant une grande précision. Il s'est enfin étendu à la production de petites pièces mécaniques à partir de tous les alliages.

Principe du procédé

Le moule est construit autour d'un modèle en cire, lequel ensuite est éliminé par fusion pour libérer l'empreinte formée. L'obligation de détruire le modèle enfermé, impose de fabriquer, non seulement un moule par pièce, mais un modèle par moule. Il faut donc fabriquer en série des modèles fusibles.

La gamme de fabrication d'une pièce par ce procédé est la suivante :

1. Créer un modèle inerte généralement en bronze ou en laiton usiné avec une grande précision et parfaitement polis. Ses dimensions sont déterminées en tenant compte de retraits de la cire, du métal coulé et de la dilatation du revêtement réfractaire du moule.

2. Confectionner une coquille à l'aide du modèle inerte ou confectionner une coquille démontable reproduisant rigoureusement le modèle inerte

3. Injecter la cire sous pression dans la coquille pour obtenir successivement autant de modèles fusibles qu'on le désire. Aujourd'hui on remplace de plus en plus la cire par une résine thermoplastique telle que la polystyrène qui commence à fondre vers 150 -200°C et brûle à 450°C et n'est pas récupéré. Les grappes de modèle sont obtenues directement par injection de polystyrène dans des moules métalliques portant les empreintes.

4. Trempe et enveloppement du modèle s'effectue par projection d'une très fine couche (quelque dixième de mm) d'un enduit réfractaire très fin (silice et liant) ensuite séchage à l'air.

5. Fusion du modèle perdu élimination du modèle par chauffage à une température de 200°C.

6. Confection du moule et coulée du métal

Applications

Tous les métaux ferreux et non ferreux peuvent être moulé par ce procédé. On peut classer les applications d'après la nature des alliages :

- Alliages réfractaires ou inoxydables.
- Alliages impossible ou difficile à forger et à usiner.
- Alliages faciles à usiner mais dont l'usinage ultérieur serait trop complexe.

Les pièces fabriquées ont un poids variant de quelques grammes à quelques kilogrammes.

Des épaisseurs de l'ordre du demi-millimètre peuvent être obtenues.

Ce procédé permet d'obtenir le moulage de pièces de formes très compliquées irréalisables par les autres procédés de moulage.

Il permet aussi la fabrication d'outils en acier rapide ou en alliages spéciaux à coupe ultra rapide à leur forme définitive et utilisable sans autre usinage que l'affûtage.

3.8 Moulage en moule métallique

On a vu que les procédés de moulage déjà étudiés exigent la destruction du moule pour récupérer la pièce moulée. Certes le moulage en sable est le plus répandu, mais il présente beaucoup d'inconvénients tels que :

- Il exige une importante quantité de sable et équipements pour la préparation du sable de moulage.
- Les pièces obtenues ne sont pas précises et présentent des surépaisseurs, ce qui exige des opérations d'usinage coûteuses. Le souci d'obtenir avec un moule permanent une série de pièces dont la forme et les dimensions soient identiques a conduit à la réalisation de moules métalliques permettant deux méthodes de moulage.

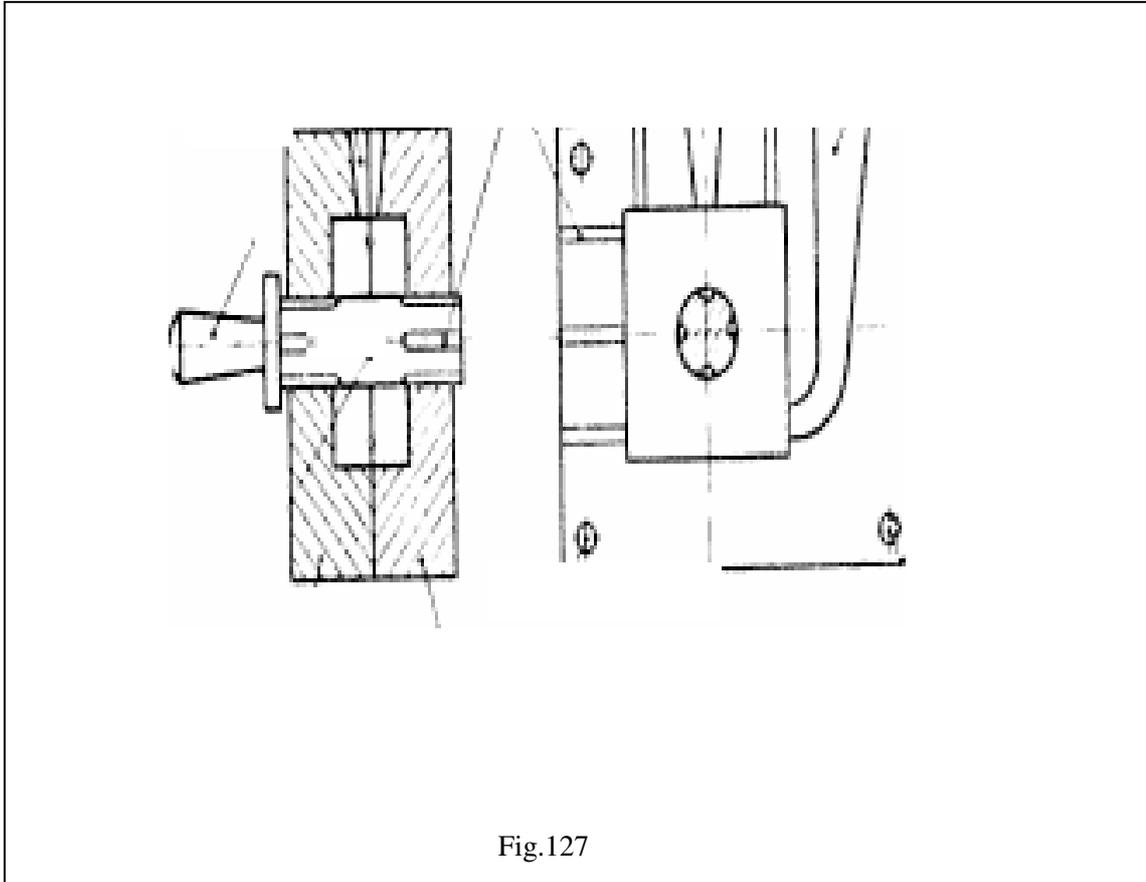
- Moulage à la pression atmosphérique ou moulage en coquille.
- Moulage sous pression.

3.8.1 Moulage en coquille

Le moulage en coquille est un procédé qui permet de couler par gravité le métal en fusion directement dans un moule métallique en fonte ou en acier appelé coquille.

Ce type de moulage est destiné pour la réalisation de pièces compliquées en métaux et alliages ferreux (fonte grise et acier) et alliages non ferreux à point de fusion relativement bas, bronzes (10 -13%Zinc), Al-Si possédant de bonnes propriétés de fonderie, Al-Si-Cu et Al-Cu(4-12%Cu).

Le moule est constitué de deux ou plusieurs parties appelées chapes, formant l'empreinte, de trou de coulée et les événements (figure.127), les chapes sont solidement assemblées pendant la coulée du métal afin d'éviter leur séparation



Le métal liquide remplit les cavités du moule sous l'effet de son propre poids (par gravité). Les masselottes, le trou de coulée doivent être situées dans le plan de joint avec des formes permettant le démoulage. Les joints ont généralement des surfaces finement striées ce qui permet l'évacuation des gaz lors de la coulée du métal. Dans certains cas les événements sont réalisés dans les noyaux. Les coquilles résistent de quelques centaines de coulées et pour élever la ténacité de leurs surfaces intérieures qui entrent en contact avec le métal en fusion sont protégées par un film d'enduit appelé poteyage. La nature de ce dernier permet ainsi d'agir sur l'intensité des échanges thermiques entre pièce et moule. L'enduit est porté sur la surface par pulvérisateur ou un pinceau. Avant chaque moulage les coquilles sont chauffées jusqu'à une température de 200 à 350°C (tout dépend de la température de coulée du métal), afin d'éviter le refroidissement trop rapide du métal, dans certains cas le chauffage doit être poursuivi pendant la coulée.

C'est lorsque le métal est suffisamment solidifié, qu'on procède au démoulage de la pièce
Donc les opérations à effectuer pour chaque coulée sont :

- Poteyage du moule.
- Fermeture du moule et mise en place de la broche.
- Coulée du métal.
- Quand le métal est solidifié, extraction de la broche et ouverture du moule.
- Démoulage de la pièce.

Les avantages du moulage en coquille sont :

- Précision dimensionnelle.
- Bon état de surface.
- Réduction des surépaisseurs d'usinage.
- Rendement assez élevé.
- Réduction du rebut.
- Texture plus fine et caractéristiques mécaniques élevées.

Le seul inconvénient réside dans le prix de revient des coquilles qui est très cher.

3.8.2 Moulage sous pression

Dans ce procédé le métal liquide est injecté dans le moule de la machine à mouler sous pression (30-100MPa). Ce procédé permet d'obtenir des pièces ayant une configuration très compliquée avec des dimensions très précises, ce qui permet de supprimer partiellement ou totalement l'opération d'usinage. A cause des coûts très élevés des moules, le moulage sous pression est rentable seulement pour des productions en série

Donc les machines à mouler sous pression permettent de réaliser de très grandes séries et avec des cadences de production extrêmement rapides (1000 pièces de faible volume/heure) et sont destinés surtout pour les alliages à base de Plomb, Zinc, Aluminium, Magnésium, Cuivre etc..

Les machines quelque soit le type comprennent toujours un dispositif de fermeture et d'ouverture du moule avec serrage énergique au moment de l'injection du métal sous pression. Le moule comprend deux blocs (chape), l'un fixé sur le bâti de la machine et sur lequel l'empreinte doit être minimum et l'autre est monté sur le chariot mobile de la machine à mouler et comportant la majeure partie de l'empreinte, ainsi que les éjecteurs qui éjectent la pièce moulée (figure.128).

La chape B est solidaire de bâti de la machine, l'autre chape A est montée sur un chariot qui assure la fermeture et l'ouverture du moule. Lorsque le moule est fermé, le piston P_2 est au niveau inférieur du trou de coulée et le piston P_1 est en position haute. Le métal versé dans le cylindre et ensuite pressé par le piston P_1 emplit le moule jusque dans ses moindres détails. Après refroidissement, le piston P_2 monte et sectionne le talon de coulée, le chariot recule entraînant avec lui la pièce hors de la chape B et le porte broches la détache.

Le moulage sous pression peut se faire sans dépouille et il assure une précision d'un dixième de mm évitant tout usinage pour certaines pièces d'automobile, d'appareils ménager ou électriques, d'horlogerie, de jouets.

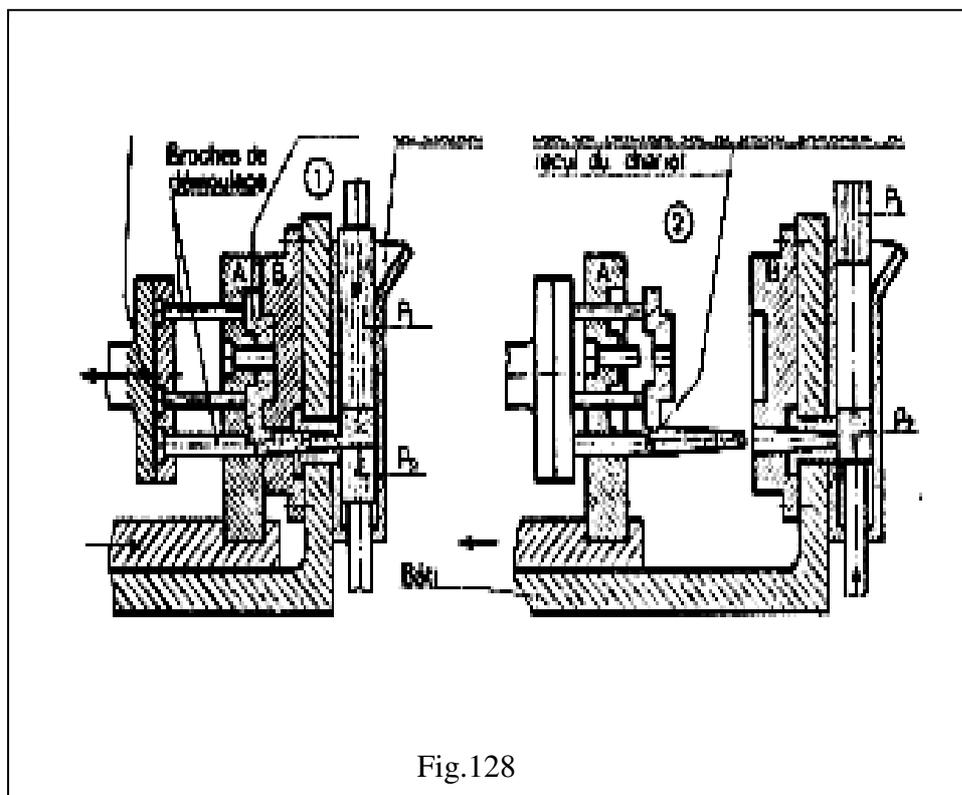


Fig.128

Pour résister aux fortes pressions de moulage, les moules sont façonnées dans des aciers spéciaux, pour maintenir la température du moule constante, ces derniers sont refroidit ou chauffés. Il est possible d'insérer dans le moule avant chaque coulée des éléments métalliques afin :

- D'assurer une plus grande résistance, dureté ou autres propriétés (axe en acier, bague en bronze etc.).
- De réaliser des conduites qui ne peuvent pas être noyautées (tube).
- D'assurer un assemblage qui serait plus difficile et coûteux par d'autres moyens.

Le poteyage de l'empreinte du moule est nécessaire afin d'éviter le collage des pièces et faciliter le démoulage. L'application du produit de poteyage est effectuée sur les parties de l'empreinte là où il y a un risque d'étamage (broche, points chauds etc..) on évitera ainsi le dépôt de poteyage qui serait dû à une application massive et ponctuelle. La composition du produit de poteyage est variable peut être d'un mélange de plomb, d'eau, silicate de soude etc.

Principe de fonctionnement

La chape solidaire du bâti de la machine est la chape fixée sur le chariot mobile assurant la fermeture et l'ouverture du moule forment principalement le moule de coulée.

Après la mise en place du noyau s'il y a lieu et lorsque le moule est fermé, le métal liquide est versé manuellement à l'aide d'une louche ou automatiquement dans l'orifice de coulée. Ensuite commence le mouvement d'injection qui se compose de 3 phases réglables et dépendantes l'une de l'autre.

1^{ère} Phase : Approche lente du piston de conduite du métal vers l'empreinte du moule.

2^{ème} Phase : Mouvement à grande vitesse du deuxième piston pour injection, ou remplissage du moule.

3^{ème} Phase : Pression de maintien (après remplissage du moule, elle agit sur le métal encore liquide en donnant une densité plus élevée à la pièce coulée.

- Après refroidissement le piston revient dans sa position initiale et suivi par l'ouverture du moule, qui s'effectue par déplacement du chariot avec la chape mobile, ce dernier entraînera avec la pièce refroidit hors du moule fixe et le détachement de la pièce s'effectuera par éjection. Tout le cycle de l'opération s'effectue automatiquement. Les paramètres essentiels pouvant exercer une influence sur la qualité des pièces coulées sous pression sont : Température de coulée du métal liquide.

- Température du moule.
- Volume du dosage.
- Pression d'injection.
- Durée du cycle d'injection.
- Réglage de la machine.

3.9. Moulage par centrifugation

La densité d'un métal coulé dépend essentiellement de la pression P avec laquelle le métal liquide se trouve durant le processus de refroidissement.

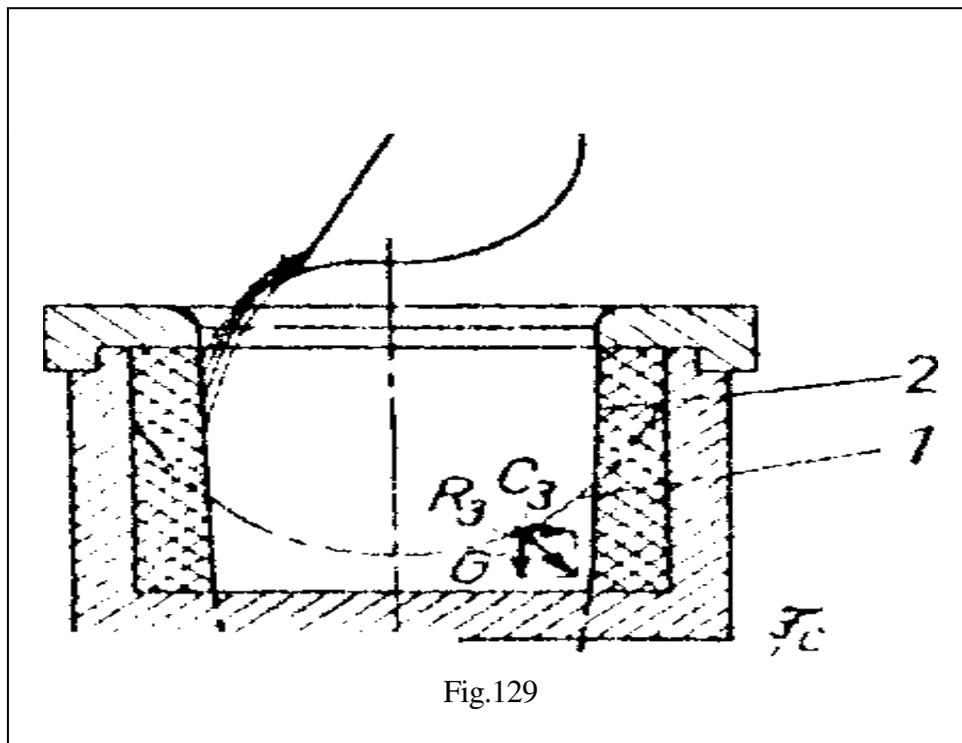
Pour la coulée normale (par gravitation), la pression P est déterminée à partir de la hauteur de coulée du métal liquide dans le moule et de sa densité.

Une pression importante peut être obtenue grâce à une rotation rapide du métal liquide dans le moule. Suite à la rotation du métal liquide coulé, les particules sont soumises à une force centrifuge :

$$F_c = mr.w^2 [N]$$

La force centrifuge peut être augmentée, par augmentation du nombre de tours (vitesse angulaire) et ce qui conduit à l'augmentation de l'action de la force de pesanteur. Cette augmentation répartit toute la masse du métal liquide uniformément sur toute la longueur du moule cylindrique.

La figure 129 représente comment les particules du métal liquide sont réparties suivant les différentes vitesses.



Où

1. Pour de petites vitesses.
2. Pour des vitesses élevées.

Fc. Force centrifuge.

G Poids.

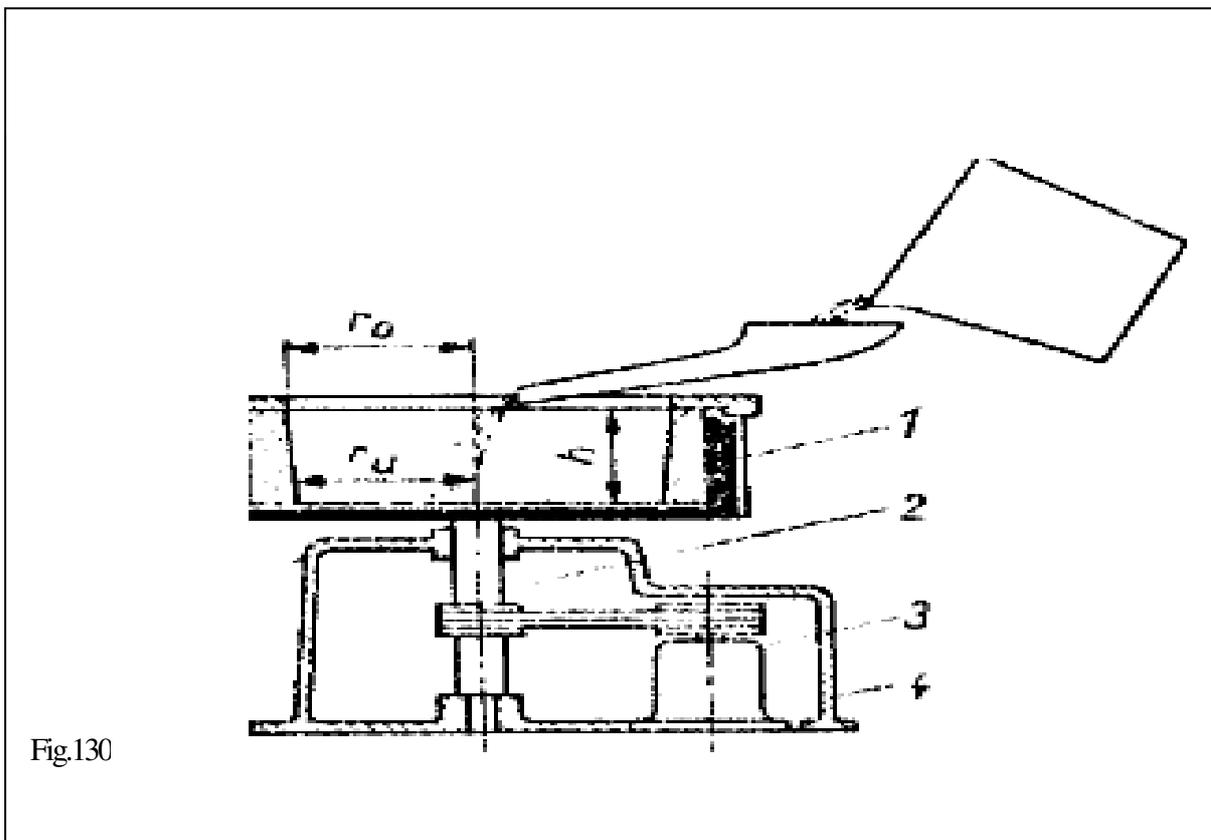
R. Force résultante.

La coulée par centrifugation s'est beaucoup développée en raison des avantages qu'elle présente.

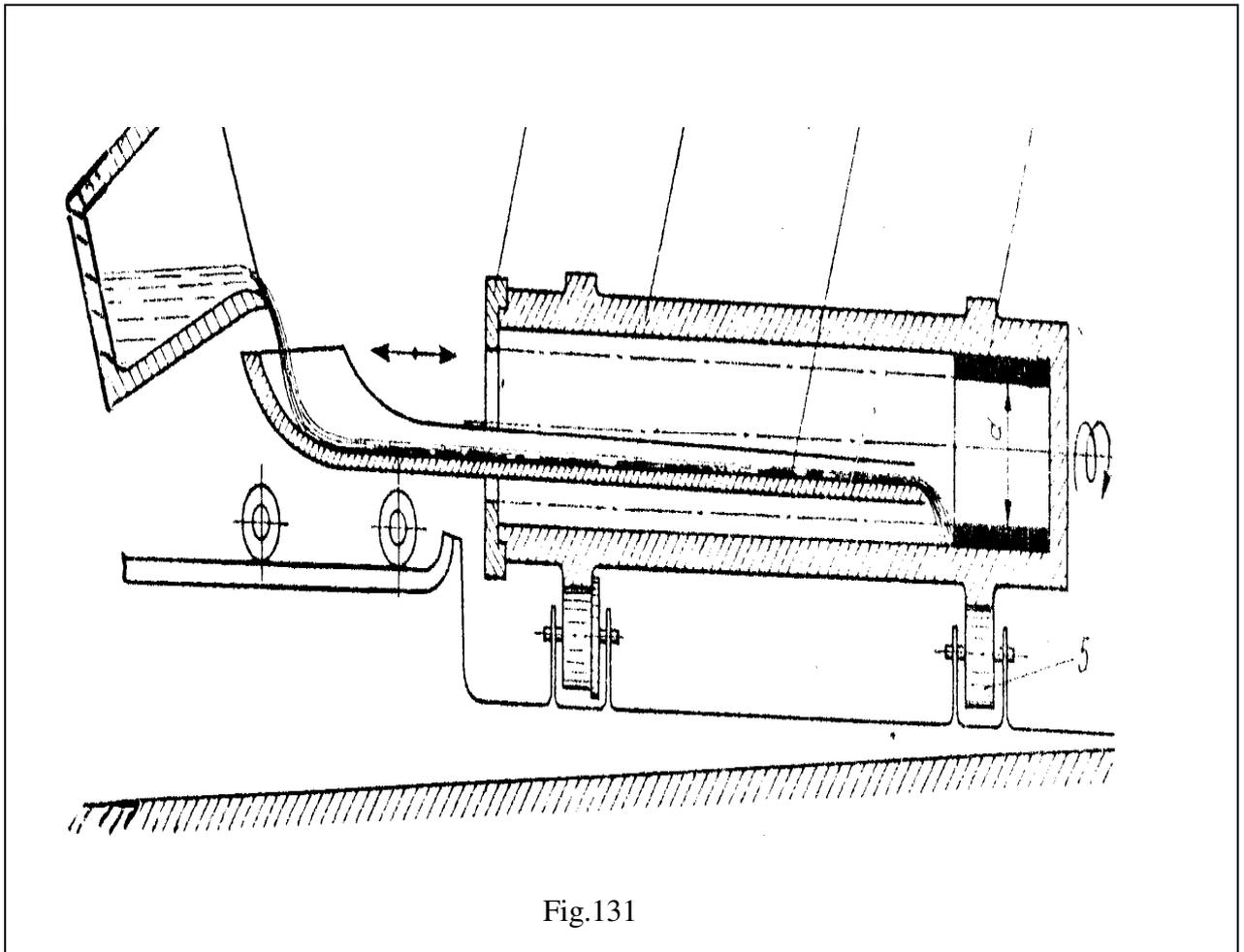
Ce procédé est utilisé surtout pour les pièces de révolution tels que tubes, couronnes etc...

En général le moule est métallique, mais il peut être garni intérieurement d'un revêtement réfractaire. Le métal liquide est coulé à partir d'une poche à travers une gouttière, le volume du métal coulé est déterminé à l'avance.

Le remplissage du moule se fait soit par la rotation du moule, soit par rotation de la gouttière. Le moulage par centrifugation peut être vertical figure 130 ou horizontal figure.131. Le moulage horizontal est utilisé lorsque la longueur du cylindre à mouler est très supérieure à son diamètre.



1. Coquille
2. Arbre de transmission
3. Moteur
4. Carcasse
5. Couronne



1. Couronne de déversement
2. Coquille
3. Entonnoir de coulée
4. Tube coulé
5. Galet

Les avantages que présente ce procédé sont :

- Aucune perte de métal.
- Propriétés mécaniques élevées du produit coulé.
- Structure à grains fins.
- Possibilité d'obtenir des pièces bimétalliques.
- Rendement élevé.

L'inconvénient réside dans le coût élevé des équipements et installations.

3.10 Défauts de moulage (Fonderie)

La diminution ou l'élimination des défauts des pièces moulées est une question économique importante. Une solution rapide peut aider à augmenter la qualité des pièces moulées et diminuer le pourcentage de rébus. Les défauts de fonderie sont classés selon leurs aspects et leurs formes d'apparition. Chaque défaut peut entraîner une diminution de la qualité, c'est l'étendu du défaut et la destination d'utilisation de la pièce qui décident, si cette dernière est considérée comme rébus ou non. Beaucoup de défauts peuvent être éliminés par un traitement ultérieur.

Dans cette partie nous allons traiter les types de défauts rencontrés le plus souvent.

3.10.1 Défauts affectant la surface

Ce sont des défauts non souhaités tels que saillies, bavures, épaissement qui sont visibles à l'œil nu et se différencie suivant leur forme et leur cause de formation. Ils n'affectent généralement pas la qualité de la pièce, mais exigent des opérations supplémentaires d'usinage. Ce sont le plus souvent les bavures, épaissement, saillie etc..leur formation s'effectue le plus souvent dans le plan de joint du moule, noyau (figure. 132).

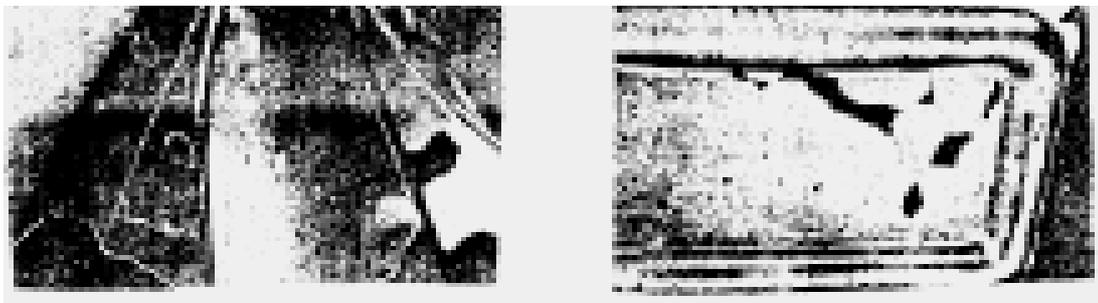
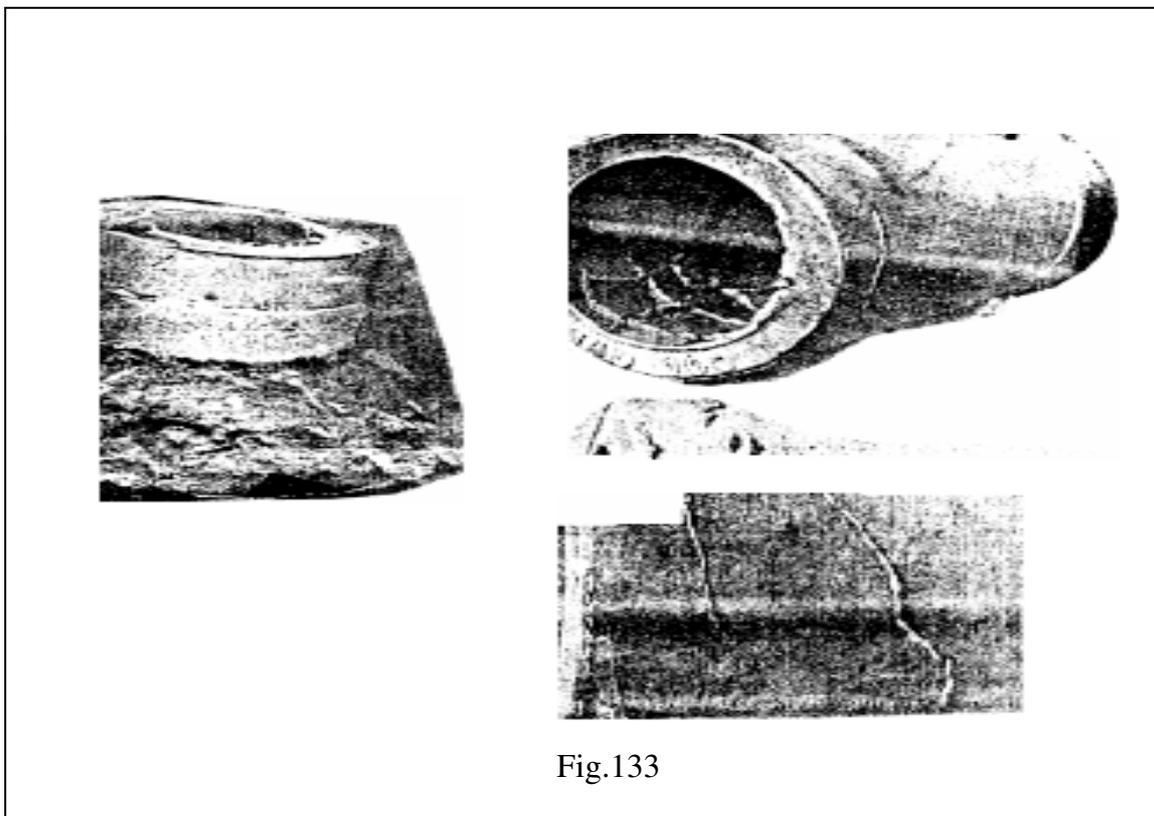
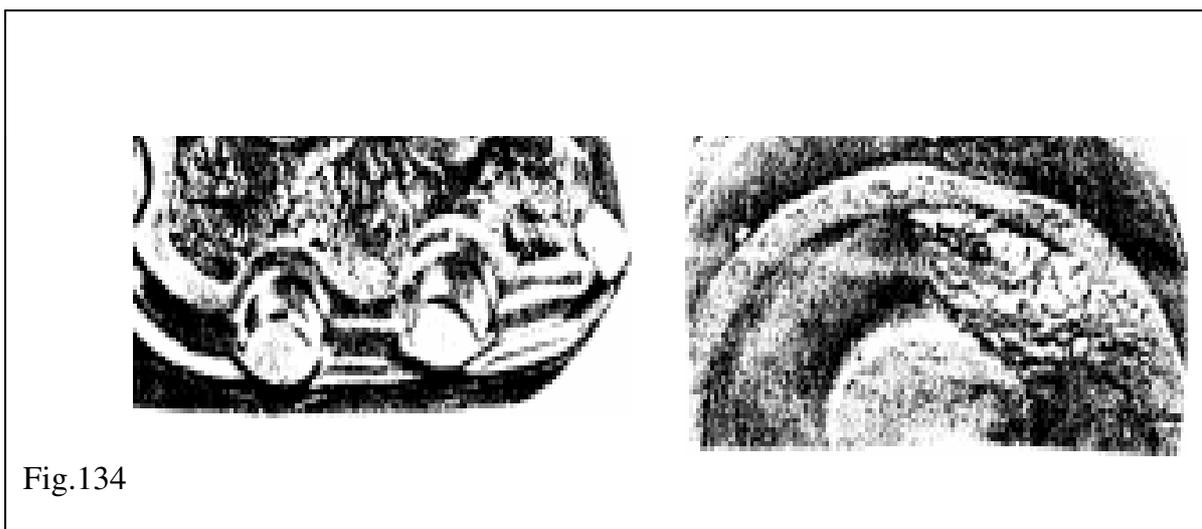


Fig.132

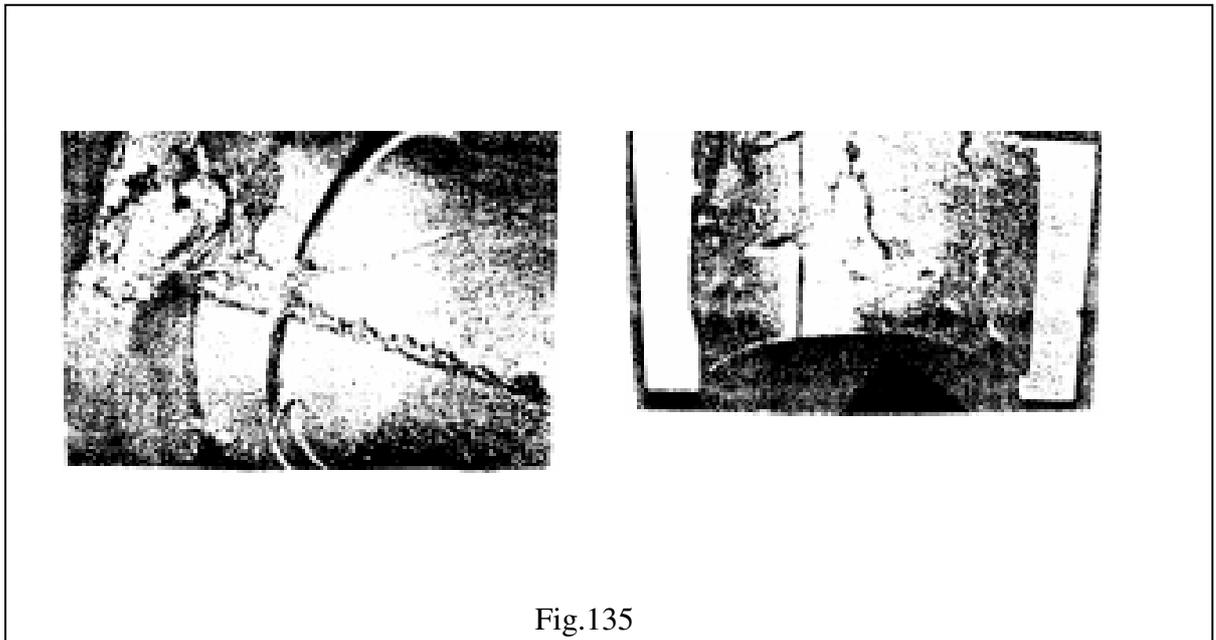
Et aussi à cause du décollement (détachement) dans le moule ou fissuration du sable de moulage ou sable de noyau figure 133



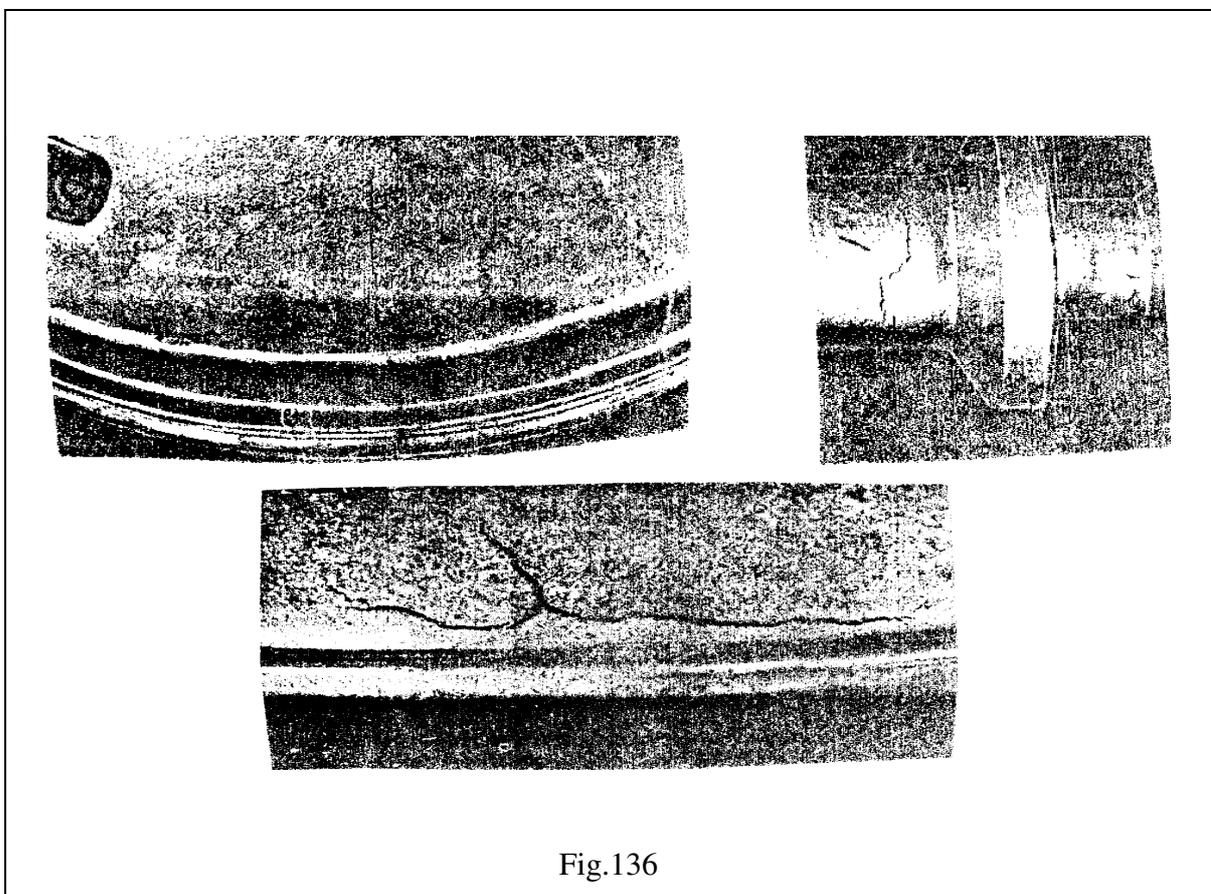
Ou encore à des arrachements de sable figure 134



Écrasement du moule et du noyau figure 135.



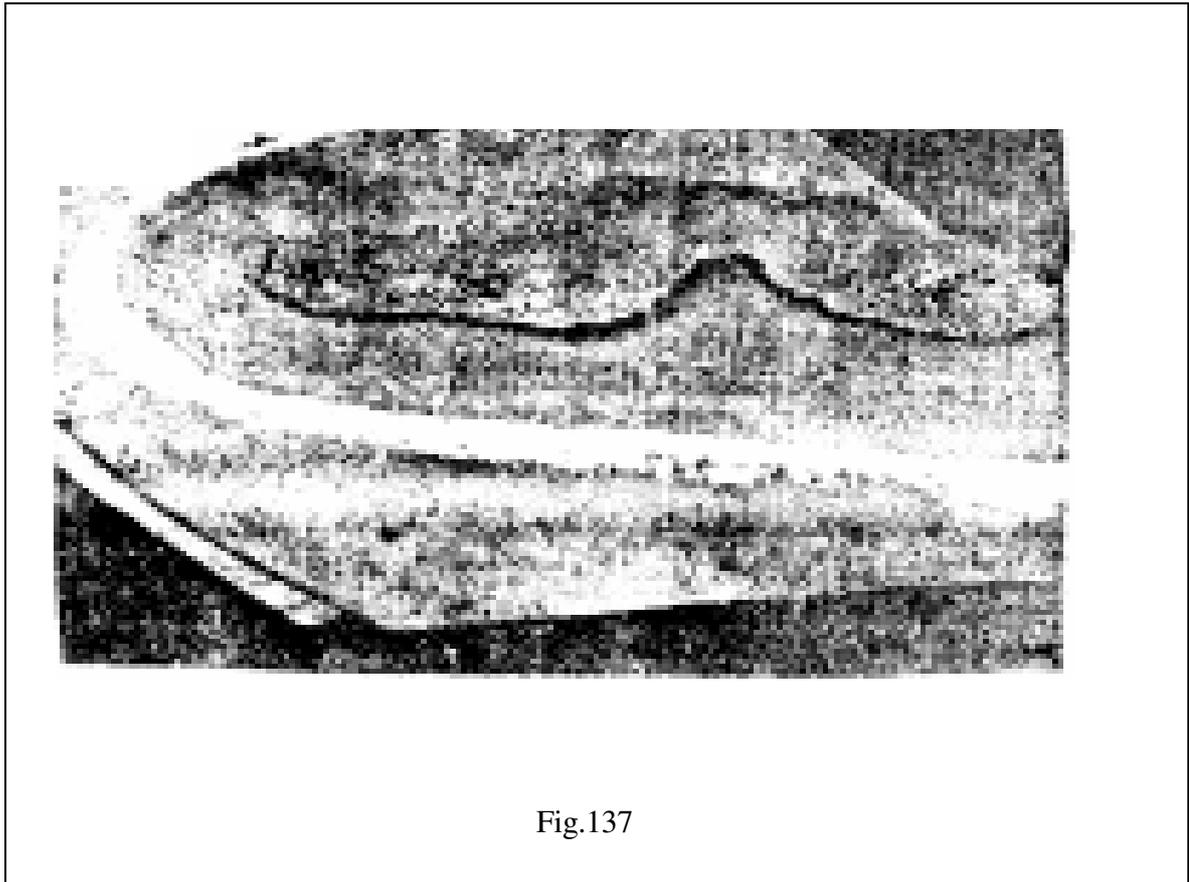
Les criques, fêlures et ruptures sont dues aux tensions internes provenant des retraits de refroidissement et apparaissent souvent après une longue période d'utilisation et à la suite de chocs figure 136 .



D'autres types de défauts pouvant exister sur les pièces moulées :

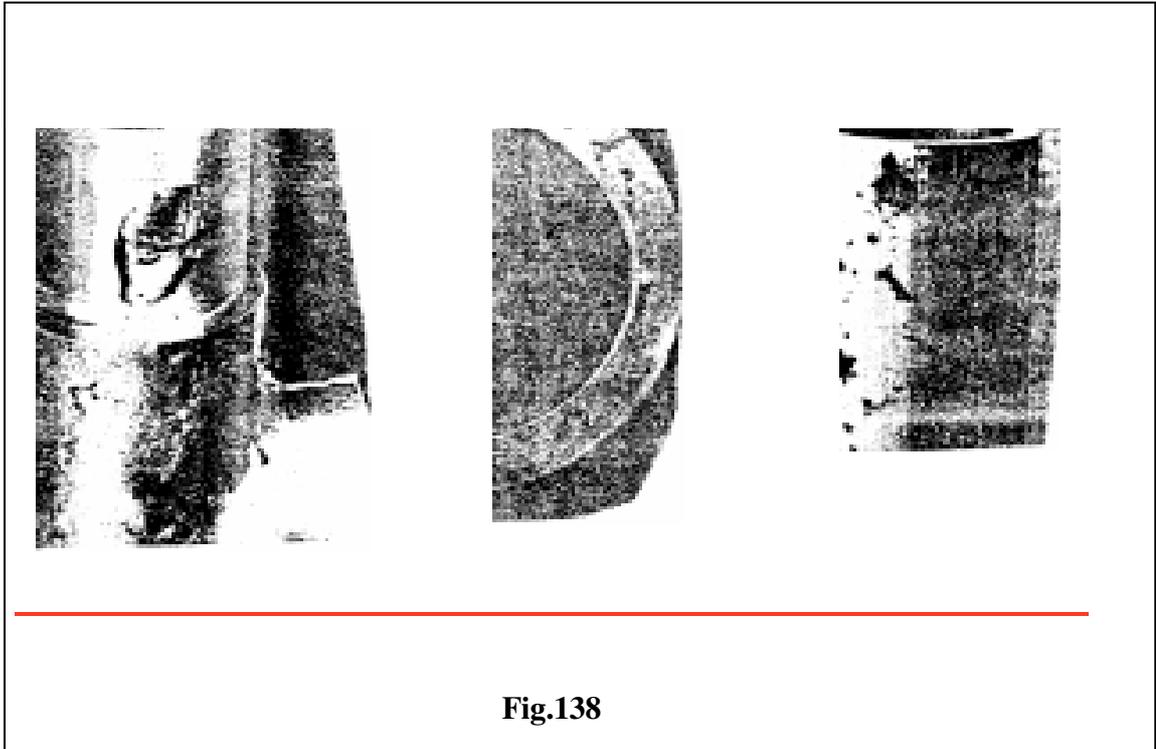
- Rugosité superficielle.
- Différence de forme et de dimension.
- Pièce moulée incomplète.

Un autre type de défaut est celui des brûlures du sable apparaissant lors de la coulée à haute température. Ce type de défaut n'est pas rencontré dans les alliages d'aluminium (figure.137).



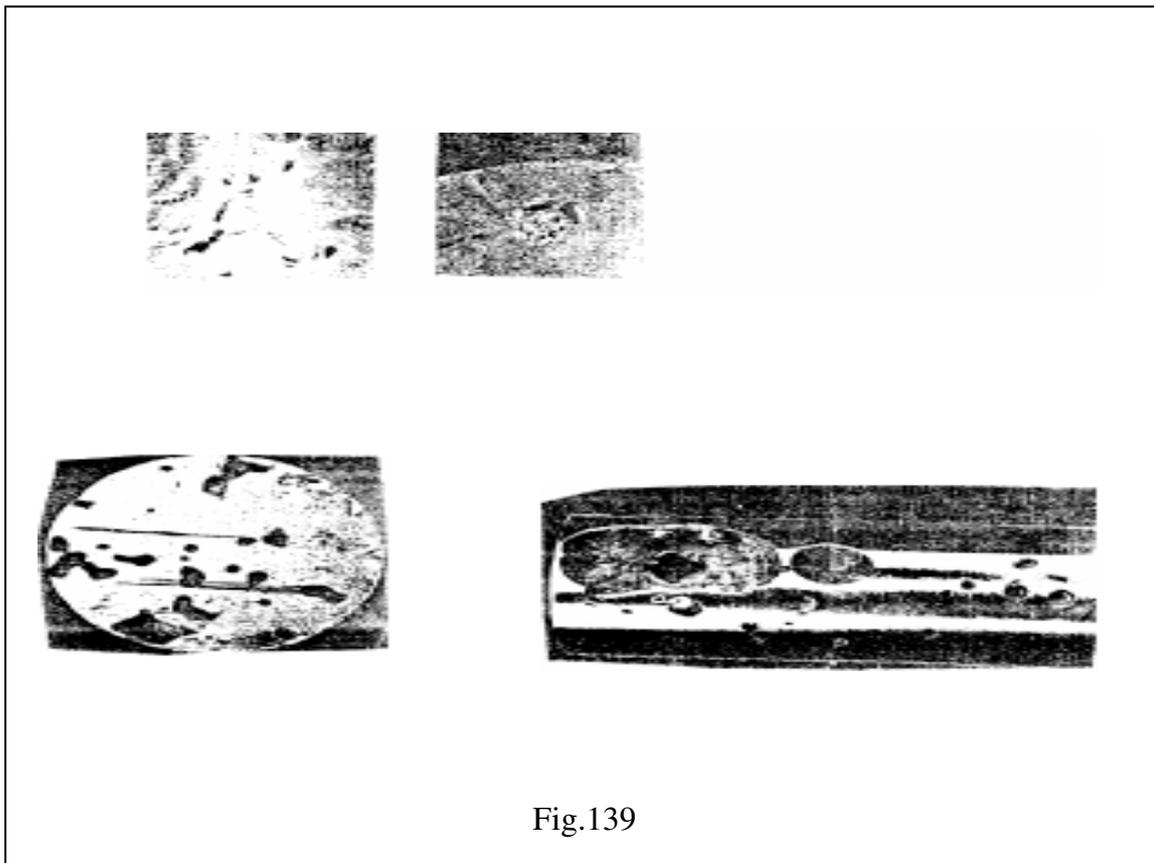
3.10.2 Défauts affectant la masse (volume)

Ils ne sont pas tous perceptibles à l'œil nu, mais leur présence influe sur les propriétés mécaniques des pièces. Parmi ces défauts on distingue : Les inclusions d'air (figure 138).



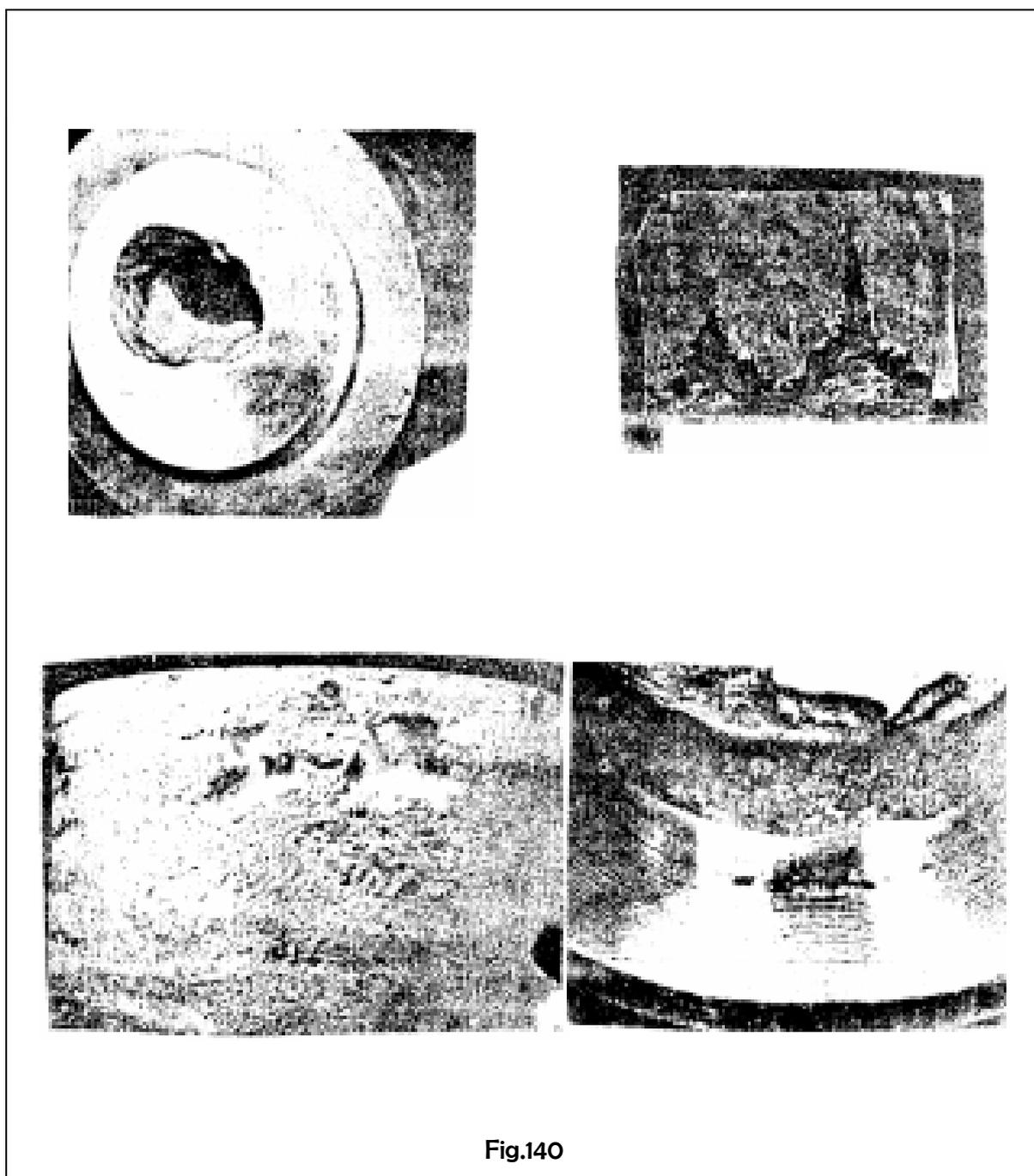
Soufflures (figure 139).

Les gaz dissous dans le métal liquide provoquant des creux et le plus souvent à cause d'une serre du sable de moulage localement trop prononcée.



Retassures

Presque tous les métaux et alliages présentent à de basses températures une grande densité qu'à hautes températures, ce qui conduit à une contraction du volume (défaut) lors du refroidissement, c'est à dire les parois minces se refroidissent en premier et les masses adjacentes se creusent. Ce retrait du métal est appelé retassure (figure 140).



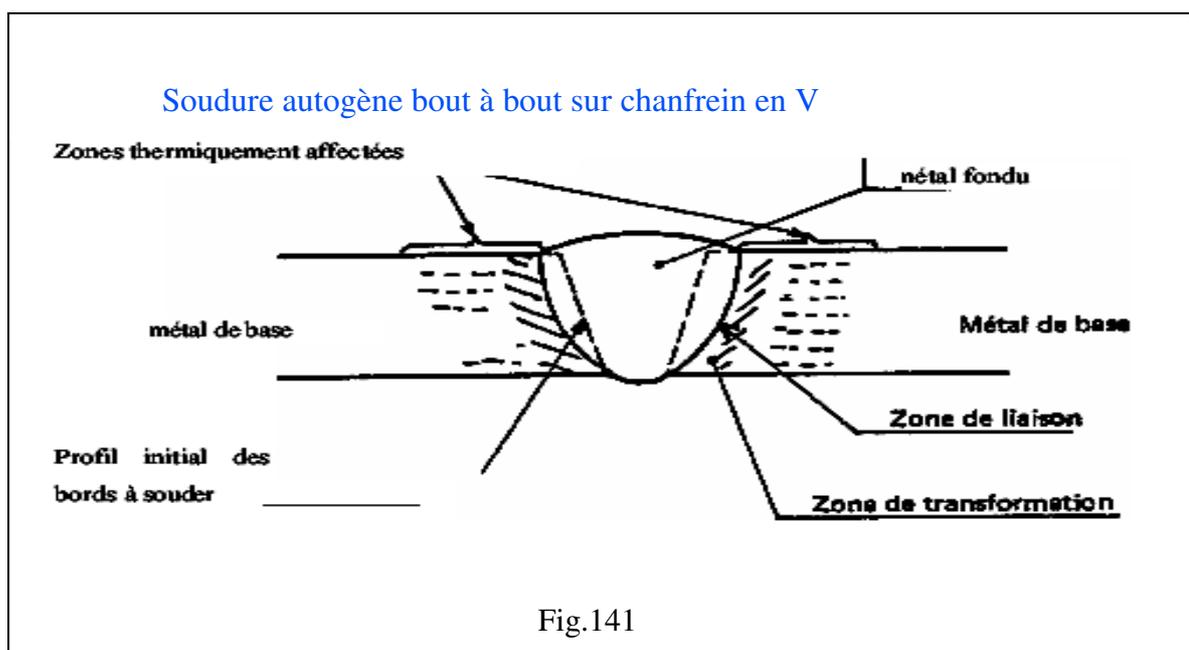
4. LE SOUDAGE

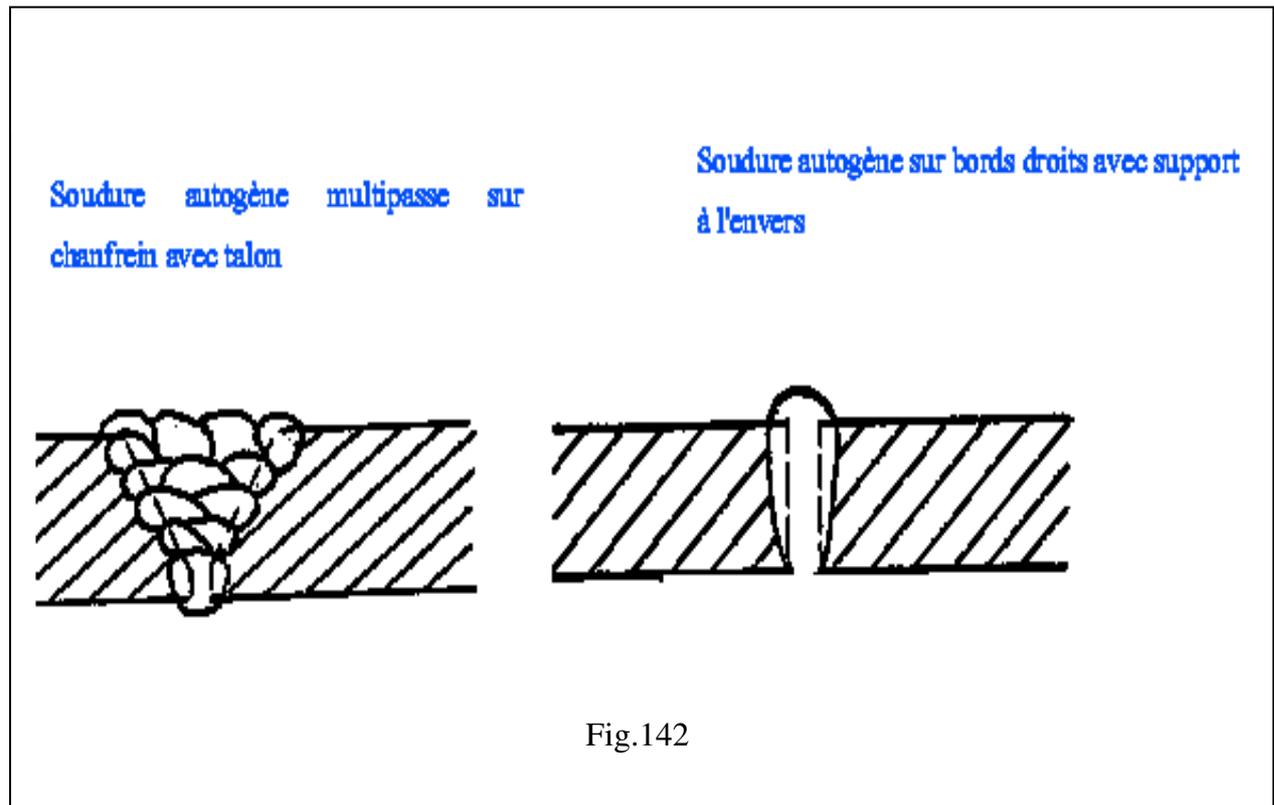
4.1 Généralités

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie et du bâtiment, car il permet d'adapter au mieux les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service. Le soudage est une opération qui consiste à assurer la liaison permanente de deux ou plusieurs parties constitutives de nature identique ou différente, soit par chauffage, soit par pression, soit par l'action simultanée des deux, de la chaleur et de la pression. Le soudage peut être effectué avec ou sans métal d'apport. Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques, le soudage se présente sous deux aspects :

a) Le soudage automatique

Lorsque le métal d'apport et le métal de base sont de nature identique. Dans ce procédé le métal des pièces à assembler participe à la constitution du joint au même titre que le métal d'apport. Donc c'est une opération de " fusion localisée " de deux pièces de même nature. Le métal de base se dilue dans le métal d'apport. La température de soudage est donc nécessairement supérieure à la température de fusion des pièces à assembler. Les figures 141 et 142 représentent des types de soudures autogènes.





b) Le soudage hétérogène

Lorsque le métal de base et le métal d'apport sont de nature différente. Dans ce procédé, les pièces à assembler ne sont pas portées à la température de fusion et ne participent pas à la constitution du joint. Ce rôle est uniquement rempli par le métal d'apport, dont la température de fusion est plus basse et qui assure, en se solidifiant, une liaison métallique entre les surfaces à assembler. Dans ce procédé on distingue :

- **Le hrasage fort** (température de fusion du métal > 450°C, avec utilisation du décapant Borax).
- **Le hrasage tendre** (température de fusion du métal < 450°C, avec utilisation du décapant Borax).
- **Le soudo-brasage** réalisé généralement au chalumeau. La température à obtenir varie suivant les métaux à souder Aciers et fontes 600°C à 900°C Cuivre 850 à 900°C Aluminium 600°C. Les figure 143 montrent deux types de soudures hétérogènes

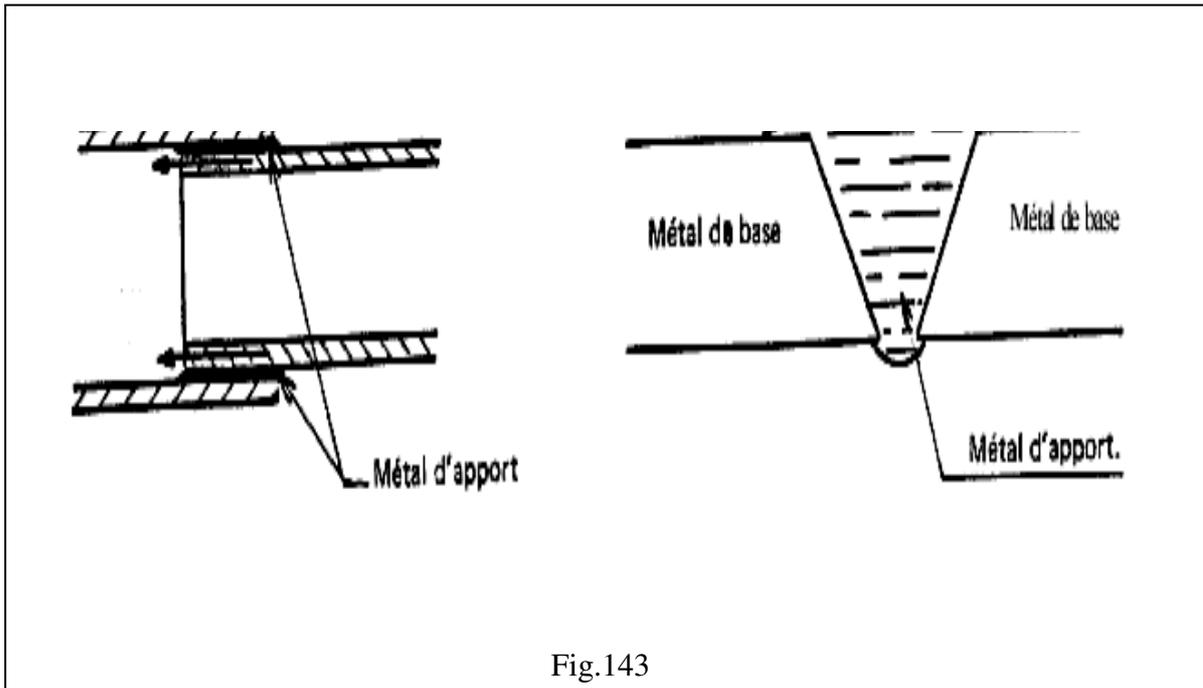


Fig.143

Le soudo-brasage et le brasage s'appliquent lorsque :

- Les métaux de base ne sont pas soudables par ex : les aciers à outils.
- Les joints sont difficiles d'exécution (faibles dimensions des pièces à souder).
- Les métaux de base sont différents.
- Il n'est pas impératif de conserver les propriétés mécaniques des métaux de base.

Les définitions générales s'appliquent à nombre de matériaux. On soude les métaux, mais on soude aussi le verre, les matières plastiques etc...

Par définition même le soudage s'oppose à d'autres opérations d'assemblage qui n'assurent pas la continuité de la matière entre parties à assembler, qu'il y ait discontinuité géométrique comme dans le rivetage, le sertissage, le boulonnage etc..., ou qu'il y ait discontinuité de nature chimique comme dans le collage.

Les avantages techniques et économiques du soudage sont :

- a- Les assemblages soudés présentent une résistance élevée par rapport à d'autre type d'assemblage.
- b- Le soudage est très souvent employé en combinaison avec le moulage, forgeage, estampage etc..., ce qui permet d'obtenir des pièces d'une forme très compliquées et dont les dimensions sont très grandes.

- c- Haute productivité, bas prix de revient avec possibilité d'obtention des assemblages étanches.
- d- Diminution des dépenses initiales des équipements des ateliers de soudage.

4.2 Classification générale des procédés de soudage

Il existe plusieurs procédés de soudage caractérisés par le type de source d'énergie pour réchauffement et par l'état du métal à l'endroit du soudage. Selon le type de la source d'énergie on distingue :

- Énergie thermo-chimique.
- Énergie thermo-électrique.
- Énergie mécanique.
- Énergie de rotation

Les sources d'énergie doivent être capables d'apporter en un temps assez court une grande quantité de chaleur en un point bien localisé.

De gros progrès technologiques sont venus apporter une solution à ce problème au début du siècle, "tout d'abord par l'emploi de la flamme oxyacétylénique puis de l'arc électrique et selon l'état du métal pendant le soudage on distingue :

- Le soudage par fusion qui consiste à porter à fusion les bords des pièces à souder à l'aide d'une source d'énergie tels que arc électrique, flamme de gaz, réaction chimique, énergie de rayons laser, jet de plasma etc.

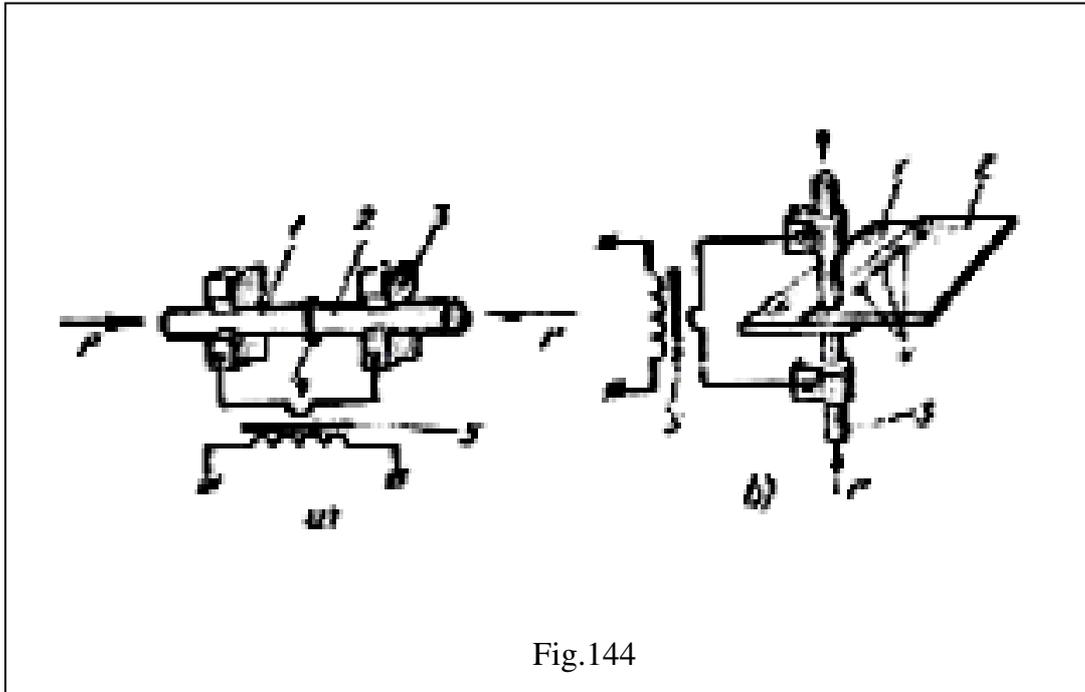
Sous l'action de la chaleur les bords du métal sont fondus et établissent une liaison entre eux ou encore avec un métal d'apport, ainsi formant le bain de fusion, lequel après solidification constitue la soudure.

Classification des procédés de soudage en fonction des sources d'énergie

ENERGIE ELECTRIQUE	ENERGIE CHIMIQUE	ENERGIE MECANIQUE	ENERGIE FOCALISEE
<ul style="list-style-type: none"> - A l'arc sous production gazeuse... <ul style="list-style-type: none"> - avec électrodes fusibles : MIG - avec électrodes réfractaires : TIG - A l'arc sous flux solide avec électrodes fusibles - A l'arc avec électrodes enrobées. - Au plasma d'arc. - A l'hydrogène atomique. 	<ul style="list-style-type: none"> - à la flamme - soudage spécifique par la nature de la flamme. Ex : Oxyacétyléniques. - par réaction exothermique Ex : Aluminiumthermie. 	<ul style="list-style-type: none"> - à la forge - par ultrasons - par friction - par pression 	<ul style="list-style-type: none"> - rayonn laser - par bombardement électronique sous vide.
<ul style="list-style-type: none"> - Par résistance..... <ul style="list-style-type: none"> - par recouvrement : - sur brossage - à la molette - par point - en bout ou en T : - par étincelage - par résistance pure 	<ul style="list-style-type: none"> - Lamps à souder pour brossage tendres 		
<ul style="list-style-type: none"> - Par induction - Fer à souder ou plaque chauffante pour brossages tendres 			

- Le soudage par pression

Le soudage par pression fig.144 regroupe tous les procédés de soudages dans lesquels on obtient en général sans métal d'apport, par application d'une pression suffisante pour obtenir une déformation plastique des zones à souder, un chauffage localisé permet la liaison atomique de la zone de soudage.



Actuellement il existe plusieurs dizaines de procédés de soudage et parmi lesquels on peut citer

1.Soudage oxvacévlénique

La source d'énergie est la flamme oxyacétylénique. Il est le seul procédé utilisé pour l'exécution des joints soudo-brasés ou brasés. Ce procédé présente une grande souplesse et recommandé pour l'exécution de travaux délicats sur pièces de nuances diverses et de petites dimensions.

2. Soudage à l'arc électrique

La source d'énergie est l'arc électrique qui jaillit entre le métal à souder et le métal d'apport qui est une électrode. Dans ce procédé on peut citer

a- Soudage en atmosphère inerte (T.I.G)

L'électrode est réfractaire (non fusible) et le bain de fusion est protégé par un gaz inerte, argon ou autre. Ce procédé se substitue de plus en plus au chalumeau pour le soudage des aciers alliés, de l'aluminium, du cuivre et de ses alliages, des alliages de nickel.

b- Soudage avec électrode enrobée

L'enrobage de l'électrode dépose sur le métal en fusion un laitier protecteur. Ce procédé a fait de très gros progrès depuis une trentaine d'années, grâce surtout aux nouvelles techniques de fabrication des électrodes. La rapidité d'exécution des soudures est importante et liée au fait que l'apport de chaleur est très localisé.

c- Soudage avec fil électrode sous protection gazeuse (M.I.G, M.A.G)

Ici le métal d'apport est constitué par un fil qui arrive en continu au niveau de l'arc. Le bain de fusion est protégé par un gaz inerte. On peut souder avec ce procédé pratiquement tous les métaux à une grande vitesse de soudage.

d- Soudage avec fil électrode sous flux en poudre

Même procédé que le procédé MIG, seulement ici la protection du bain se fait par un flux en poudre.

3. Soudage par résistance électrique

Le chauffage nécessaire à l'endroit du soudage est assuré par effet de Joule :

$$Q = I^2 R.t.$$

L'intensité de soudage et le temps de passage jouent donc un grand rôle dans ce procédé. Il est utilisé essentiellement pour assembler des pièces par recouvrement.

Dans ce procédé on distingue :

a- Soudage par points

Les appareils de soudage sont constitués en principe de deux bras portant chacune une électrode, l'un de ces bras est mobile et vient pincer les pièces à souder.

b- Soudage à la molette

Utilise le même principe que le soudage par points, les électrodes se présentant sous forme de disques rotatifs.

c- Soudage en bout par étincelage

Ce procédé de soudage par résistance est essentiellement utilisé pour le reboutage des tubes. Les bords à souder sont rapprochés sous tension et des arcs s'amorcent successivement, provoquant la fusion des bords. Le soudage a eu lieu alors par forgeage, les deux pièces à souder étant comprimées l'une contre l'autre.

d- Soudage par induction

La source d'énergie est ici le courant électrique induit dans les pièces à souder par l'application d'un champ magnétique intense et de haute fréquence.

e- Soudage par friction

Le principe est le suivant :

Une pièce est fixe, l'autre animée d'un mouvement de rotation et est appliquée contre la première.

L'énergie thermique dégagée par le frottement permet d'atteindre la température de forgeage.

f- Aluminothermie

On utilise ici la chaleur dégagée par la réaction suivante :



Il faut amorcer la réaction soit avec de la poudre, soit avec une résistance électrique. Ce procédé est surtout utilisé pour le soudage des rails de chemin de fer.

g- Soudage par ultrasons

Ce procédé utilise l'énergie de vibration produite par un appareil électro-acoustique. Il est utilisé surtout dans l'industrie nucléaire et en électrotechnique pour les soudages des feuilles d'aluminium, de molybdène, de platine etc...

Il est très employé pour assembler les matières plastiques.

2.3. Le soudage oxyacétylénique

C'est vers la fin du siècle dernier et à la suite des travaux du français Georges Claude et de l'allemand Von Linde que naquit l'idée d'utiliser la flamme pour chauffer localement des pièces jusqu'à leur point de fusion dont le principal but est de les assembler.

On peut obtenir cette flamme par la combustion d'un gaz combustible dans l'air. L'air étant composé de 4/5 d'azote qui ne participe pas à la combustion, on a donc cherché à utiliser un autre gaz comme carburant l'oxygène.

Donc la haute température (3000°C) de la flamme oxyacétylénique est obtenue par la combustion d'un mélange d'acétylène et d'oxygène dans une proportion bien définie.

Le soudage oxyacétylénique est caractérisé par des vitesses d'échauffement et de refroidissement du métal plus faibles en comparaison avec le soudage à l'arc électrique ce qui conduit à la formation d'une structure à gros grains dans le métal adjacent au cordon de soudure, diminue la résistance du joint soudé et provoque des déformations importantes de la pièce soudée. Si l'épaisseur des tôles dépasse 2mm, le soudage oxyacétylénique devient moins rentable que celui de l'arc électrique.

L'oxygène (O₂)

L'oxygène est un gaz incolore, inodore et sans saveur. Il est obtenu par l'électrolyse de l'eau ou par liquéfaction de l'air qui en contient 1/5 de son volume. Il est d'une pureté très élevée 99%, car un oxygène moins pur entraîne une augmentation de la consommation de l'acétylène.

L'acétylène C₂H₂

L'acétylène (C₂H₂) est un hydrocarbure gazeux, incolore avec un pouvoir calorifique de 14000calorie/m³ et dont l'odeur est désagréable (odeur d'œil). Il est dangereux au point de vue de déflagration il explose en présence d'une décharge électrique ou du feu.

Un mélange d'oxygène et d'acétylène peut exploser à la pression atmosphérique s'il ne contient que très peu d'acétylène.

industriellement l'acétylène utilisé pour le soudage et l'oxycoupage est fabriqué à partir du carbure de calcium (CaC₂), lequel est obtenu à partir d'un mélange de carbone (Coke) et de chaux vive à très haute température, la réaction chimique qui s'y produit est la suivante :



Ensuite l'acétylène est obtenu dans des générateurs par la décomposition chimique du carbure de calcium avec l'eau selon la réaction suivante :



4.2.3.1 Matériel de soudage oxyacétylénique

a- Stockage de O₂ et C₂H₂

L'oxygène et l'acétylène sont livrés le plus couramment dans des bouteilles d'acier, qui se distinguent de leur capacité. Les plus répandus sont les bouteilles de 40 dm de capacité. Elles se distinguent par leur particularité de construction et par leurs couleurs et doivent porter le timbre du service de contrôle des mines.

La couleur conventionnelle de l'ogive de la bouteille d'oxygène est blanche et celle de CH₂ est jaune. L'oxygène est comprimé à une pression de 150 bars, ce qui donne à la pression atmosphérique 7000 litres de gaz pour une bouteille dont le volume est de 46litres. Pour les bouteilles de C₂H₂ on tasse une matière poreuse imbibée d'acétone dans laquelle est emmagasinée du C₂H₂ sous pression de 15 bars. L'acétone peut dissoudre environ 24 fois son propre volume d'acétylène. Pour les bouteilles d'oxygène un calcul très simple permet de savoir à tout moment le volume d'oxygène contenu dans la bouteille rapporté à la pression atmosphérique. Ce calcul est valable pour une P_o = 1 bar et T = 15°C, dans le cas contraire il existe des coefficients de correction.

Par ex .pression restante dans la bouteille : 100 bars

Contenance lue sur l'ogive .46 litres

A température constante :

$$P_oV_o = PV \rightarrow V_o = PV/P_o = 100 \times 46 / 1 = 4600 \text{ litres}$$

Les bouteilles d'acétylène doivent toujours être utilisées dans la position verticale pour éviter que l'acétone ne sorte de la bouteille.

Les précautions à prendre concernant les bouteilles d'oxygène et d'acétylène sont :

- Eviter les chocs.
- Eviter toute élévation anormale de température.
- Ne jamais introduire d'autres gaz dans les bouteilles vides.
- Les robinets doivent être parfaitement étanches.
- En cas d'inflammation des gaz :
 - Fermer rapidement le robinet si réchauffement est faible.
 - Si la bouteille est chaude, se mettre à l'abri et l'arroser de loin.
 - **[h- Organes de réglages et de sécurité](#)**

Les régulateurs ou détendeurs figures 145 et 146 destinés respectivement pour l'oxygène et l'acétylène ont le rôle d'abaisser la pression des gaz (O_2 , C_2H_2) stockés dans les bouteilles (haute pression) à une pression de travail utilisable avec les chalumeaux coupeurs ou soudeurs.

Ils sont placés entre les bouteilles de gaz et le chalumeau et permettent donc de maintenir stable et constante la pression détendue quelque soit la diminution de pression dans la bouteille.

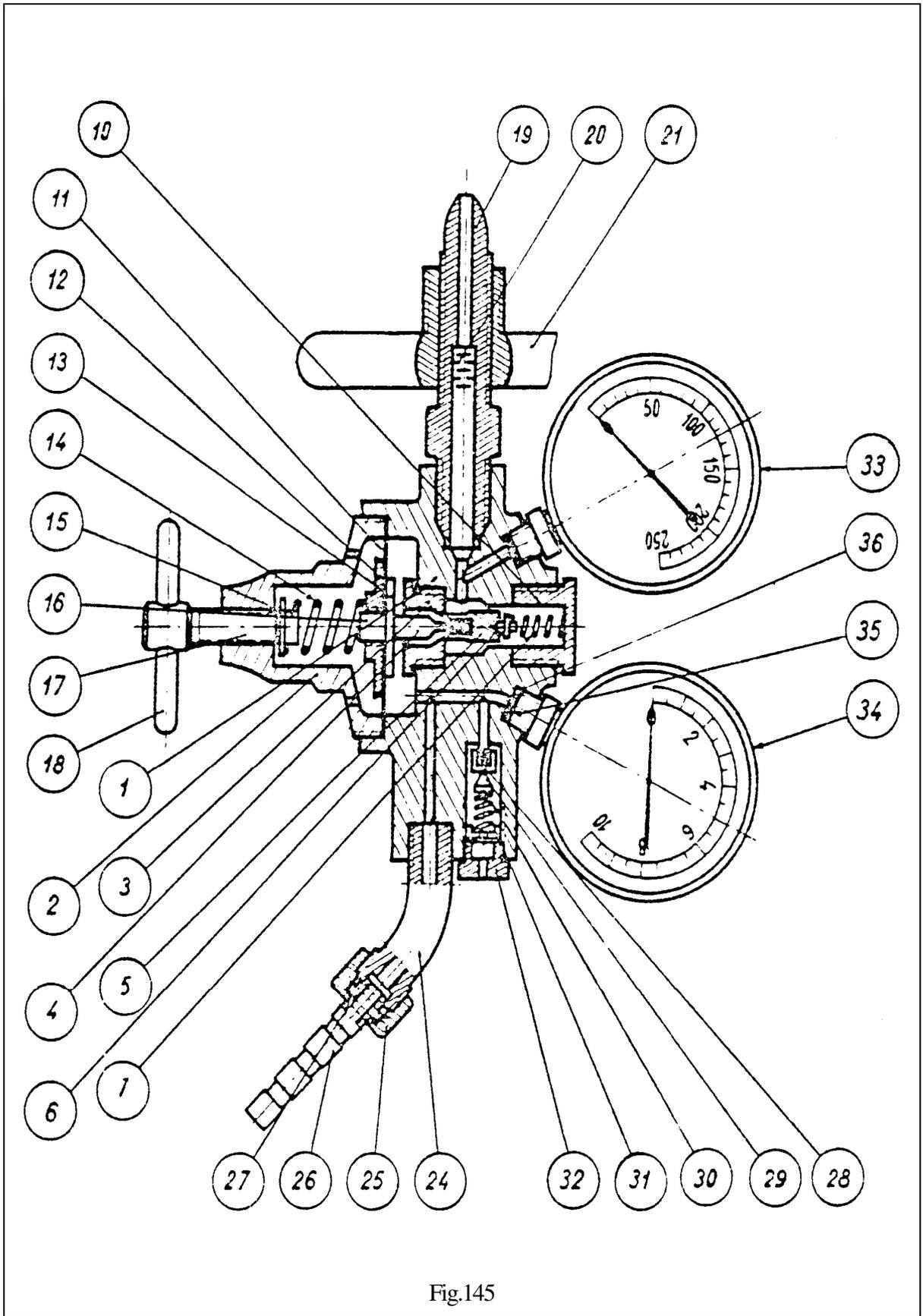


Fig.145

1.	— Corps	— Ressort de 14. détente	25— Ecrou raccord
2.	— Couvercle	15.— Centre de ressort de détente	26.— Douille porte tuyau
3.	— Siège de détente	16.— Vis de centrage	27.— Rondelle joint
4.	— Poussoir de clapet	17.— Vis de détente	26.— Clapet de soupape de sûreté
5	— Clapet de détente	18— Barrette de vis	29.— Centre de ressort de soupape
6	— Centre de ressort de clapet	19— Raccord d'entrée	30— Ressort de soupape de sûreté
7.	— Ressort de fermeture	20— Filtre haute pression	31.— Buté de réglage de soupape
8	Levier d'attaque	21.— Ecrou de raccord d'entrée	32.— Vis (ou ecrou) de blocage
9.	— Levier porte-clapet	(gaz comprimé)	33.— Manomètre haute pression
1i).	— Bouchon de démontage	22.— Etrier de montage (AD) (1)	34.— Manomètre basse pression
11.	— Membrane	2 4 — Vis d'étrier	35— Filtres des manomètres
12	— Plateau de membrane	2 5 — Mamelon de sortie	36.— Joints des manomètres.
13.	— Contre plateau de membrane		

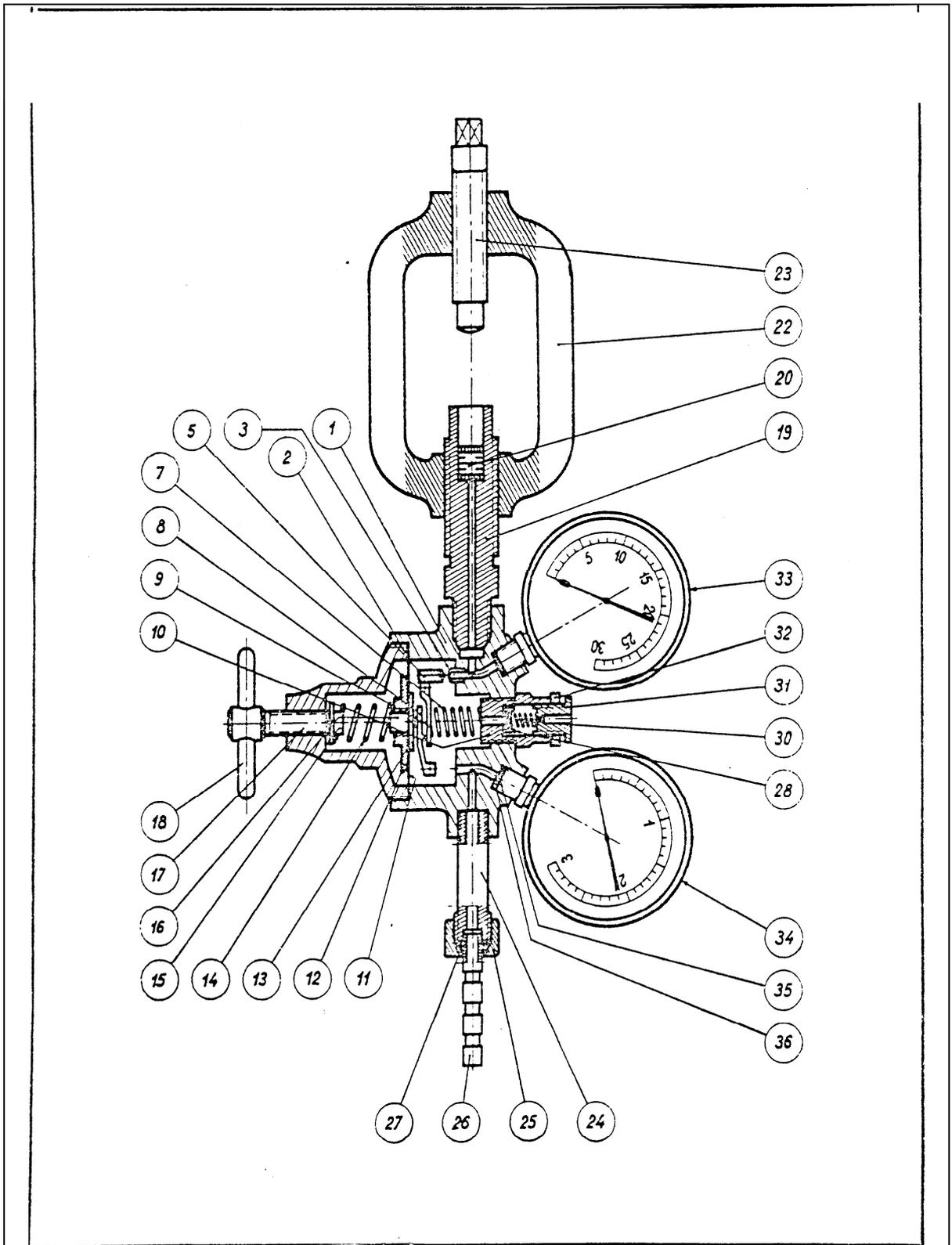


Fig.146

Chaque régulateur possède deux manomètres indiquant à tout moment la pression dans le cylindre (haute pression ou pression à détendre) et la pression nécessaire au soudage (basse pression) ou pression détendue.

Le réglage de la pression du gaz est assuré par le vis réglage (différente pour souder ou oxycouper). L'ensemble manomètre et détendeur s'appelle manodétendeur. Ces deux manomètres se différencient par leur dispositif de fixation voir figures 56 et 57, afin d'éviter toutes permutations, l'écrou qui connecte le régulateur d'oxygène au cylindre se vise à droite et celui d'acétylène à gauche.

Le fonctionnement de tous les détendeurs est basé sur le même principe.

Le détendeur possède deux chambres figure.147, à haute pression communiquant directement avec la bouteille de gaz et la pression qu'y règne est égale à celle dans la bouteille et une chambre à basse pression communiquant avec le chalumeau.

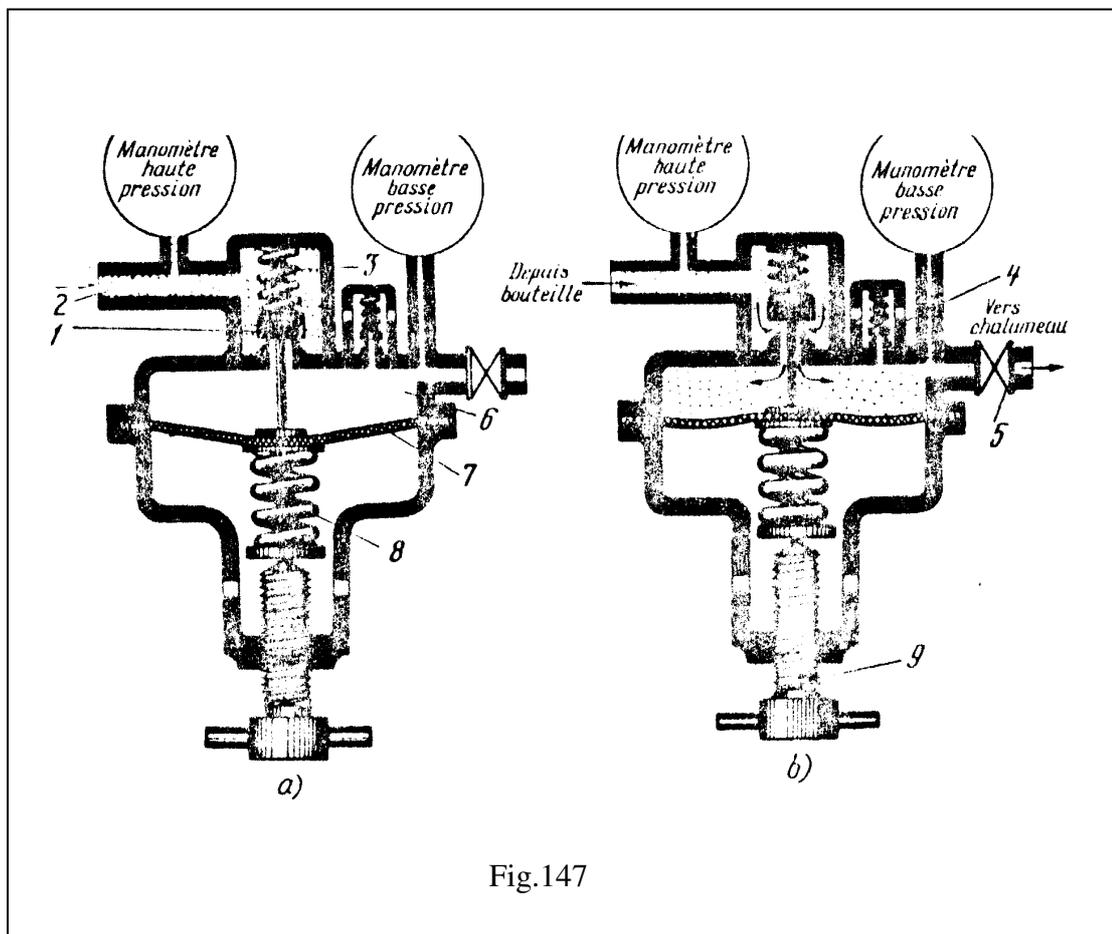


Fig.147

Si on desserre la vis de réglage, l'obturateur est plaqué sur son siège. En ouvrant la bouteille la chambre HP se met sous pression de la bouteille. On agit ensuite sur la vis de réglage, l'obturateur se soulève, le gaz passe dans la chambre BP et la pression ainsi obtenue agit sur la membrane,

celle-ci referme l'obturateur en agissant plusieurs fois sur la vis de réglage, on obtient ainsi la pression désirée.

Si le chalumeau débite

- La pression dans B.P diminue.
- La membrane poussée par le ressort ouvre l'obturateur
- Le gaz arrive à nouveau dans la chambre BP

Après une série d'oscillations rapides de l'obturateur il se stabilise à une position telle que la chute dans l'obturateur, plus la pression dans la chambre B.P et la tension des ressorts, égale à la pression de la bouteille. Lorsque la pression de la bouteille baisse, l'obturateur poussé par le ressort, s'ouvre un peu plus, l'équilibre précédent ne demeure.

Certaines précautions qu'il faut prendre vis à vis des manodétendeurs :

- N'ouvrir la bouteille qu'après être assuré que la vis de réglage est desserrée. Par suite son inertie, l'obturateur ne peut pas se fermer immédiatement quand on ouvre la bouteille HP et la pression BP peut alors dépasser les possibilités du mano et détériorer la membrane du détendeur.
- Avant de monter le détendeur sur la bouteille il y a lieu de purger la valve de cette dernière en l'ouvrant brusquement pour 2 ou 3 secondes.
- Ne jamais graisser ou huiler un régulateur.

c- Tuyaux souples (bovoux)

Ils sont fabriqués en caoutchouc fortement entoilé et sont généralement de couleur rouée pour l'acétylène et bleue ou verte pour l'oxygène.

Ils sont destinés à assurer l'amenée de gaz au chalumeau. Ne jamais repérer un boyau avec du ruban adhésif seulement, mais insérer une douille de cuivre.

Les tronçons de tuyaux raccordés ne doivent pas mesurer moins de 3m de longueur.

d-Chalumeaux soudeurs

Les plus répandus sont les chalumeaux oxyacétyléniques à injecteurs figure.59. En fonction de la pression d'admission des gaz à l'entrée du chalumeau on distingue :

1.Chalumeau basse pression

Ils sont conçus pour l'utilisation du C_2H_2 basse pression (0.010 -0.030 bars). L'oxygène doit avoir une pression de 0.100 bars afin que la vitesse de sortie des gaz soit compatible avec la stabilité de la flamme.

C'est l'oxygène qui entraîne le C_2H_2 vers l'extérieur du chalumeau d'éviter toute inflammation à l'intérieur du chalumeau.

2.Chalumeau haute pression

Dans ce cas les deux gaz entrent avec des pressions supérieures à 0.150 bars. Un chalumeau basse pression peut être utilisé avec l'acétylène à haute pression, l'inverse n'est pas possible.

La fig.148 présente la description d'un chalumeau soudeur. Le lot complet au chalumeau comprend plusieurs lances de différents calibres (numérotés). A chaque numéro de lance correspondent les dimensions bien déterminées des canaux d'injecteurs et des buses, cela permet de faire varier le débit d'oxygène et d'acétylène lors du soudage.

Le "déroulement du fonctionnement du dispositif à injecteur provoque des retours de flamme et diminue la réserve d'acétylène contenue dans le mélange combustible,

Ces incidents peuvent avoir pour cause l'obstruction partielle du canal d'oxygène, une augmentation trop prononcée de son diamètre par suite de l'usure des canaux d'acétylène, le déplacement de l'injecteur par rapport au mélangeur et certains endommagements extérieurs de l'injecteur.

DESCRIPTION D'UN CHALUMEAU SOUDEUR

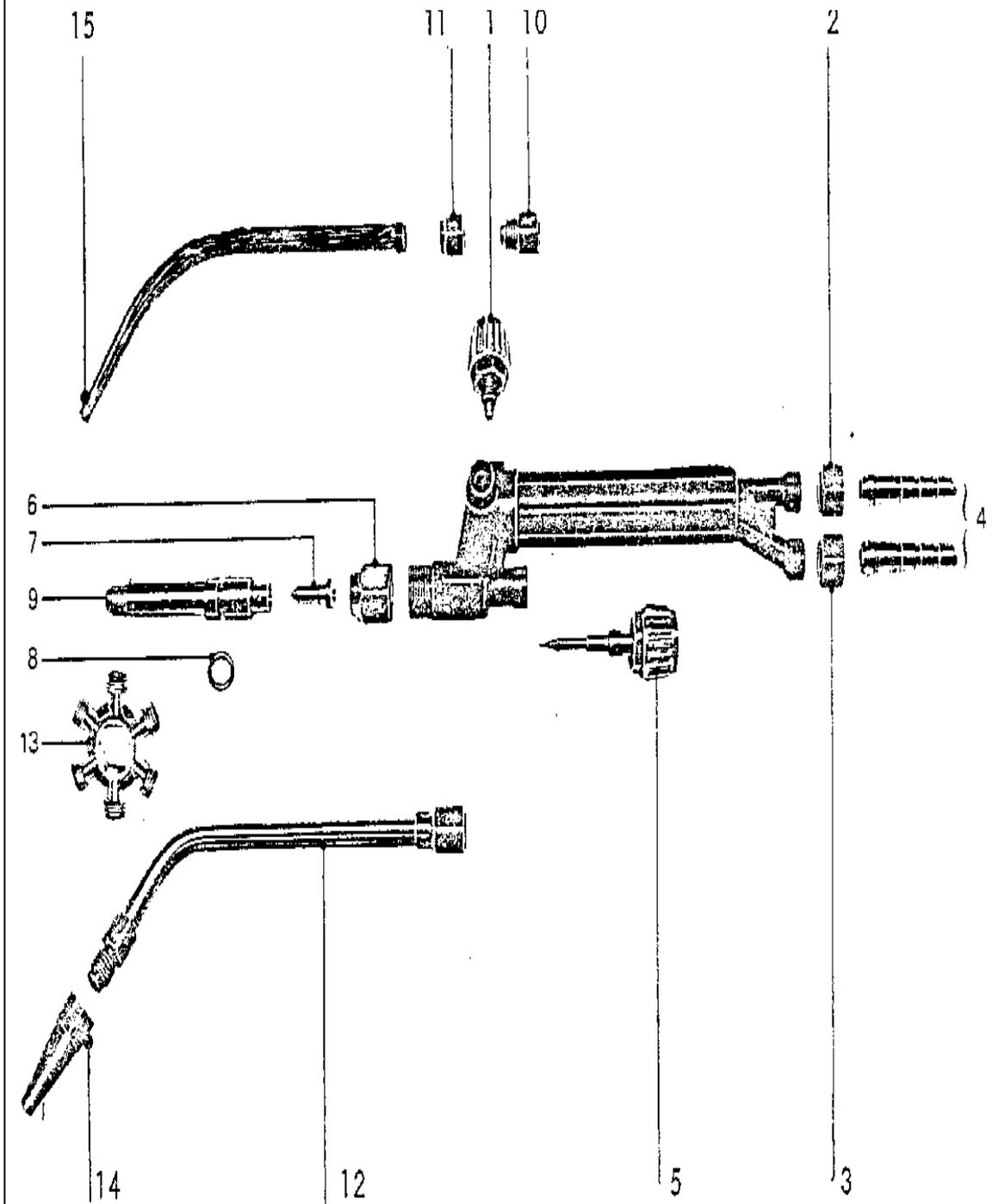


Fig.148

		<u>Débits des buses et lances :</u>	
1	Robinet C H2	2	
2	- Erou olive gaz		
3	- Erou olive O ₂	N° 0.0	de 10 6 40 l/h.
4	- Olive		
5	- Robinet O ₀	N° 0	de 50 6 280 l/h.
6	- Erou de blocage du mélangeur	N° 1	de 250 6 1000 l/h.
7	- Injecteur		
8	- Joint du mélangeur	N° 2	de 1.250 a 5.000 l/h
9	- Mélangeur		
10	- Raccord intermédiaire		
		Les débits sont exprimes en litres	
11	- Erou de buse retraits	heure d'acétylène.	
12	- Tube de mélange pour buse		
13	- Etoile porte buses		
14	- Buse		
15	- Lance buse retraits		

e- Chalumeau oxycoupeurs

Les chalumeaux oxycoupeurs produisent la flamme de chauffe et assurent l'amenée d'un jet d'oxygène dans la zone de coupe figure.149

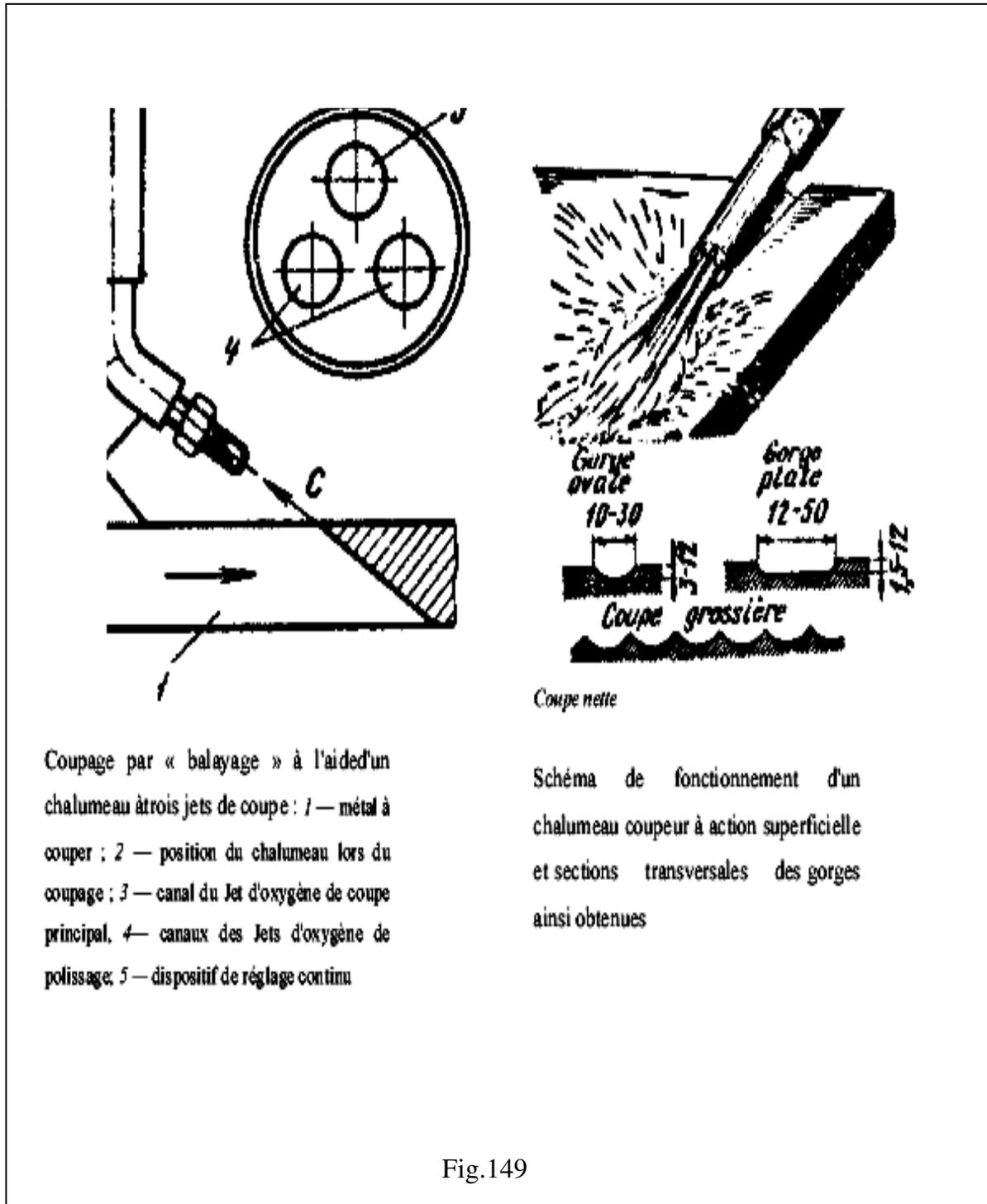
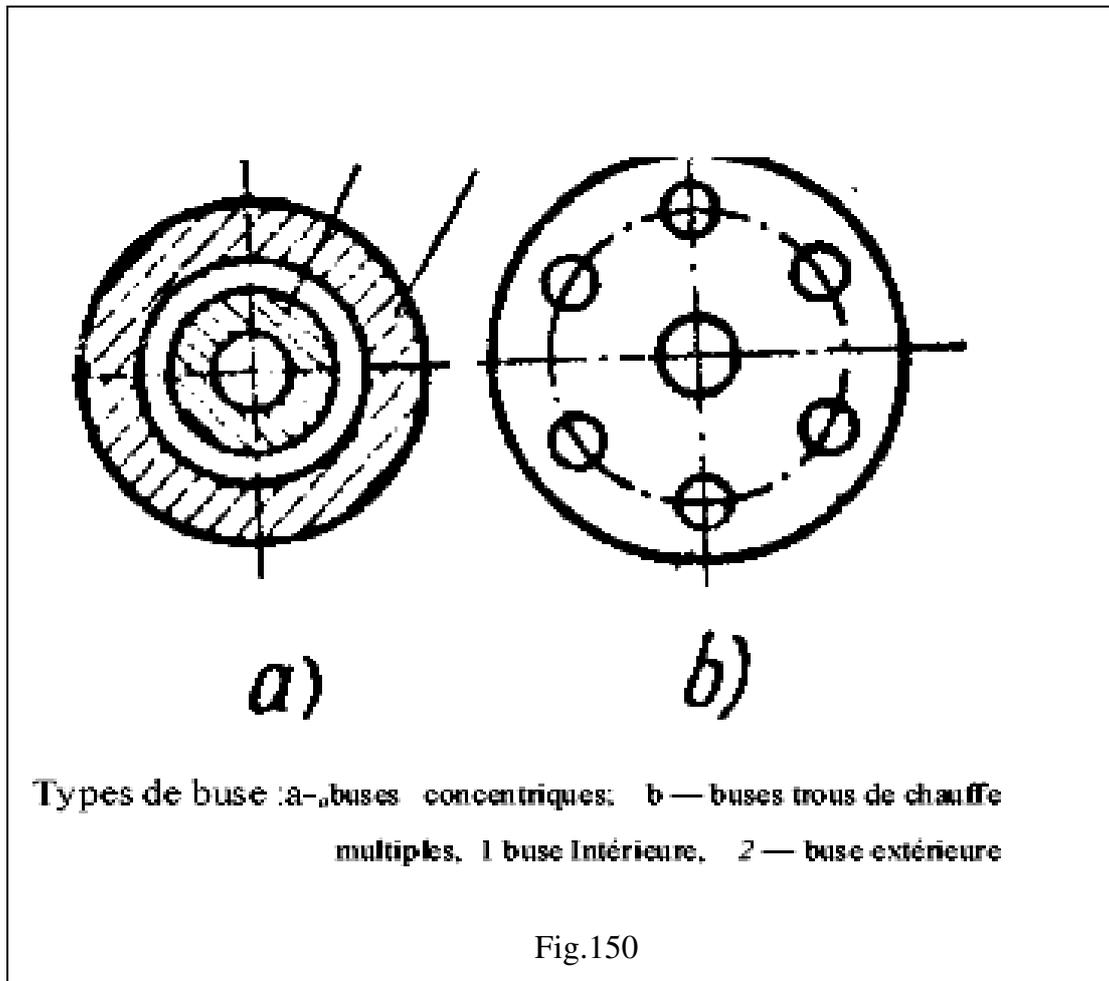


Fig.149

Les chalumeaux coupeurs comportent deux parties principales, un tube manche et une lance, leur différence réside dans le canal d'oxygène de coupe muni d'un robinet.

La tête est munie de buses interchangeables choisies en fonction de l'épaisseur de l'acier à couper. Les buses peuvent être concentriques produisant une flamme de chauffe annulaire figure.150 a ou bien à flamme multiples figure.150 b.



Ces derniers sont souvent obstrués par les gouttes de laitier lors du coupage, ce qui perturbe le travail, provoque des claquements secs et des retours de flamme. On utilise le plus souvent les buses concentriques.

f- La flamme oxyacétylénique

La flamme oxyacétylénique est remarquable elle fournit la température la plus élevée par unité de surface, facilement réglable, la plus réductrice.

La structure de la flamme oxyacétylénique est représentée sur la figure.151 avec les répartitions de la température suivant l'axe de la flamme et elle est caractérisée par :

- Ses propriétés chimiques
- Sa température
- Sa puissance spécifique

Dans sa structure on peut distinguer trois zones :

- Le dard
- La zone réductrice (ou intermédiaire).
- Le panache

1. Le dard

Il est composé par un mélange mécanique d'oxygène et produits provenant de la dissolution de l'acétylène, c'est la surface où se fait la combustion primaire de C_2H_2 et de O_2 suivant la réaction suivante :



Le dard est blanc, très lumineux et la température la plus élevée $3150^\circ C$ se trouve à son extrémité. La combustion du carbone et de l'hydrogène dans le dard n'est pas complète, c'est dans le panache que s'effectue leur combustion complète grâce à la participation de l'oxygène de l'air.

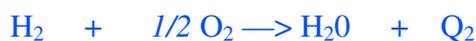
La combustion complète d'un volume de C_2H_2 nécessite 2,5 volumes de O_2 .

2. La zone intermédiaire ou réductrice

Comme son nom l'indique, elle se situe entre le dard et le panache. C'est à l'extrémité de cette zone qu'il faut maintenir la métal d'apport pour le protéger contre les agents corrosifs de l'atmosphère ambiante.

3. Le panache

C'est dans cette zone que s'effectue la combustion secondaire de C_2H_2 et O_2 avec la participation de l'oxygène de l'air ambiant.

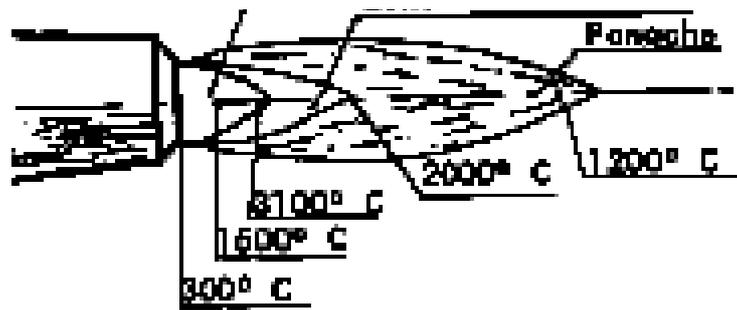


En somme donne :



Dans le panache, l'hydrogène et l'oxyde de carbone brûlent en donnant respectivement de la vapeur d'eau et du gaz carbonique le CO_2 , qui favorise l'attaque du fer. La vapeur d'eau cède son oxygène au métal chaud selon la réaction :





flamme acide



flamme carburante



flamme oxydante

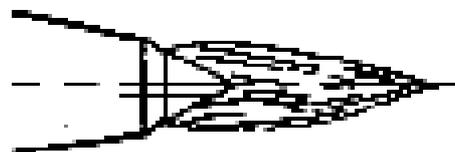


Fig.151

Réglage de la flamme oxyacétylénique

En fonction du rapport entre le volume d'oxygène et d'acétylène consommé O_2/C_2H_2 , la flamme peut être :

- Neutre
- Carburante Ou
- oxydante

Neutre (normale)

Si $O_2/C_2H_2 = 1$

C'est la flamme dont on se sert pour souder ou chauffer. Elle se traduit par un dard blanc brillant séparé du panache par la zone intermédiaire, il est presque le seul visible à travers les lunettes à souder ? Lorsqu'on soude avec une flamme neutre le métal en fusion est clair et transparent.

Flamme carburante

Si $O_2/C_2H_2 > 1$

Une telle flamme est obtenue, si à la flamme neutre on augmente de débit d'acétylène, une auréole se superpose au dard normal qui s'allonge avec l'excès de C_2H_2 . Sa forme est souvent irrégulière et instable. Cette flamme contient une teneur élevée en carbone. On l'utilise souvent pour des rechargements durs de pièces d'usures ou pour des traitements de surface (cémentation). Lors de la soudure avec une telle flamme, le métal en fusion est trouble et recouvert d'une écume blanche.

Flamme oxydante

Si $O_2/C_2H_2 < 1$

On peut obtenir une flamme oxydante, si à la flamme neutre, on augmente le débit d'oxygène, le dard se raccourcit ainsi que le panache, la flamme siffle, elle est oxydante et brûle le métal (oxydation de l'acier avec risque de soufflures). Cette flamme n'est jamais employée. Pour souder la pression doit être de :

0.250 à 0.500 bars pour le C_2H_2

1 à 3 bars pour l' O_2 .

Dans la pratique et au cours du soudage on peut s'attendre à un dérèglement du chalumeau ou la flamme se modifie. Si le phénomène se prolonge la flamme peut s'éteindre avec un claquement caractéristique, ces incidents de fonctionnements sont dus soit :

A un écrasement provoqué par des projections d'oxydes surtout lorsque l'on tient le chalumeau trop près du bain de fusion. Un éloignement léger du chalumeau du bain de fusion ou son nettoyage peut remédier à cette situation.

A un claquement qui est dû à une fuite interne à la buse ou la pression d'oxygène est insuffisante (buse trop puissante dont on essaie de réduire le débit à l'aide de robinet). Les claquements répétés peuvent être évités en mettant le bec du chalumeau dans l'eau en laissant seul le robinet d'oxygène ouvert. Dans le cas des claquements suivis d'un sifflement avec projection de poussières noires, on doit fermer immédiatement la bouteille.

La flamme décolle

Elle est due à la vitesse de sortie des gaz qui est trop grande, dans ce cas on doit réduire les pressions.

4.4. Technique de soudage

Dans la technique de soudage on trouve différentes méthodes qui s'appliquent suivant les épaisseurs des joints et leur préparation telle que bord à bord, bords relevés, sur chanfrein en V, sur chanfrein en X etc....

Les tableaux suivants montrent les méthodes.

4.5 Position de soudage

Les principales positions de soudage sont les suivantes :

- **1) à plat**
- **2) au plafond**
- **3) en corniche**
- **4) verticale (montante, descendante)**

Dans la position à plat, il est assez aisé d'obtenir une bonne pénétration, convexe et régulière, le bain étant soutenu naturellement par les bords des pièces à souder. En plafond au contraire, du fait de la pesanteur du bain de fusion, il sera difficile de réaliser une bonne pénétration ; cette dernière se présentera souvent sous forme concave ou simplement plate. En soudage à l'arc, l'intensité de soudage est plus faible pour la position plafond que pour la position à plat (environ 10 à 15% de moins).

En position descendante, l'intensité est 15 à 20% supérieure à celle nécessaire pour le soudage à plat.

En position montante, l'intensité est 15 à 20% inférieure à celle nécessaire pour le soudage à plat.

Le tableau ci-après, montre les positions principales de soudage. Le tableau est extrait de code ASME et indique comment on ramène une position quelconque de soudage l'une des quatre positions type.

4.6 Préparation des bords à souder

Dans la pratique le mode d'assemblage des bords à souder (écartement, forme des bords, positions respectives des bords) joue un rôle très important sur la facilité d'exécution d'un joint et sur sa qualité.

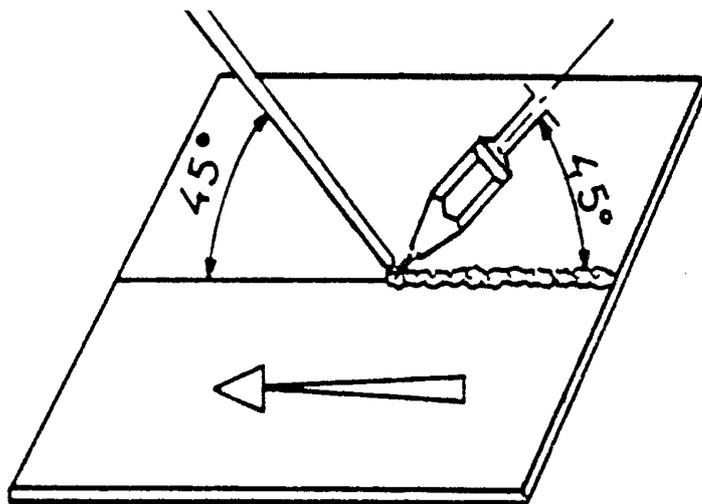
Un soudeur doit toujours avoir présent à l'esprit qu'une mauvaise préparation des bords donne une mauvaise soudure.

La préparation des bords varie en fonction de l'épaisseur des pièces à assembler, de la méthode de soudage et de la position de soudage.

Les coupes et chanfreins peuvent être obtenus par :

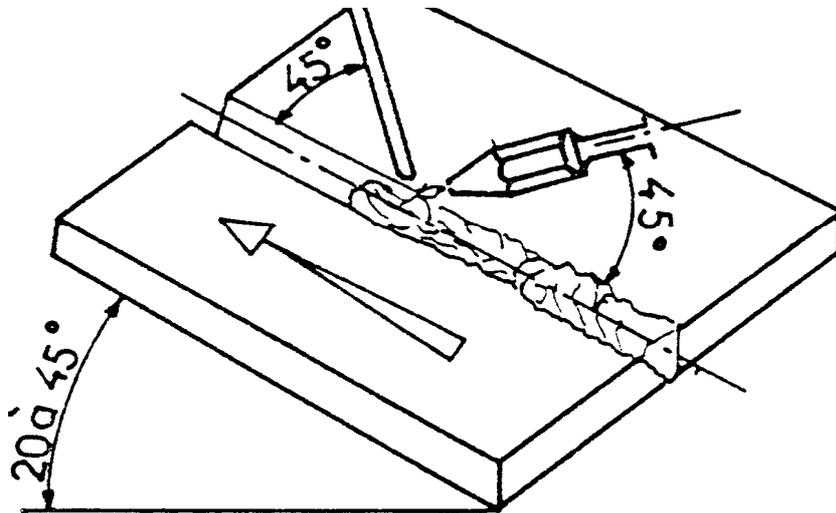
- Oxicoupage
- Limage
- Cisailage
- Usinage, rabotage, meulage

Les tableaux suivants nous donnent un aperçu sur les différentes préparations des bords à souder.



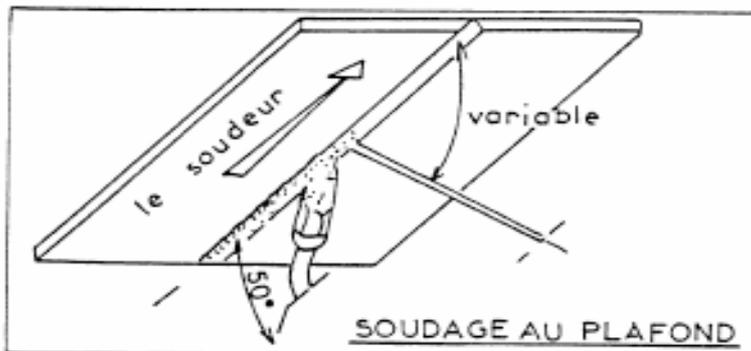
SOUDAGE A GAUCHE

Préparation des bords	Épaisseur à souder	Risque à employer	Diamètre du métal d'apport	Écartement des points
	0,5	50		
	1	100	1	30 e
	1,5	140	1	30 e
 $E \geq \frac{1}{2} e$	2	200	2	30 e
	3	300	3	30 e



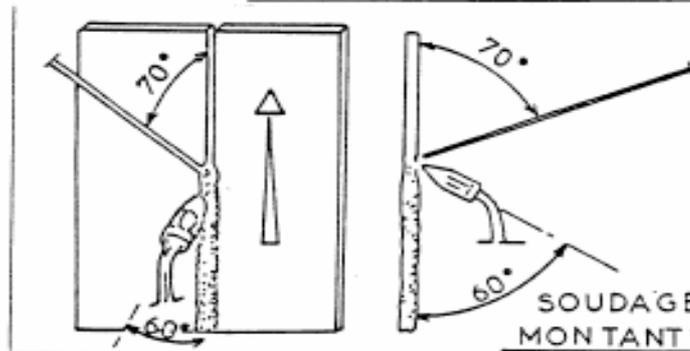
**SOUDAGE A GAUCHE
DEMI-MONTANT**

	4	400	$\frac{1}{3}$ ou $\frac{3}{3}$	20 e
	5	500	$\frac{3}{4}$ ou $\frac{4}{4}$	20 e
	6	600	4	20 e
	8	800	5	20 e
	10	1000	6	20 e



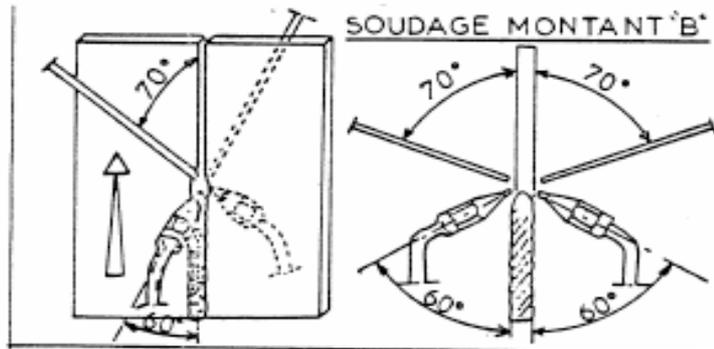
SOUDEGE AU PLAFOND

Préparation des bords	Épaisseur à souder	Buse à employer	Diamètre baguette	Remarque
 $e < 5 \text{ mm}$	5	350	3	En deux passes.
	6	400	3	
	7	500	3	
 $e > 5 \text{ mm}$	8	600	4	
	10	800	4	



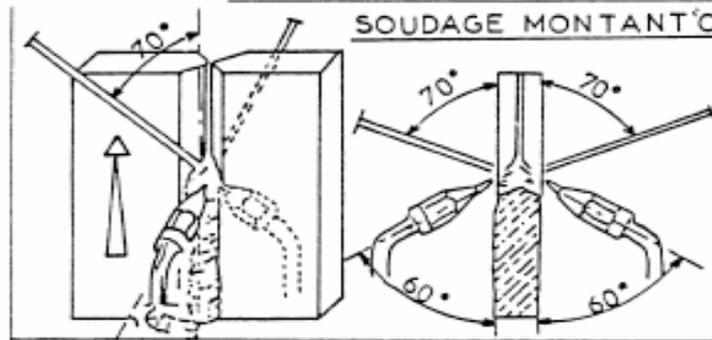
SOUDEGE MONTANT 'A'

 $2 < e < 6 \text{ mm}$	2	100	2	Une passe. Un léger degré. milt est, bords est conseille.
	3	140	2	
	4	250	2	
 $7 < e < 10 \text{ mm}$	5	300	3	
	6	400	3	
	7	400	3	
	8	500	4	
	10	600	4	



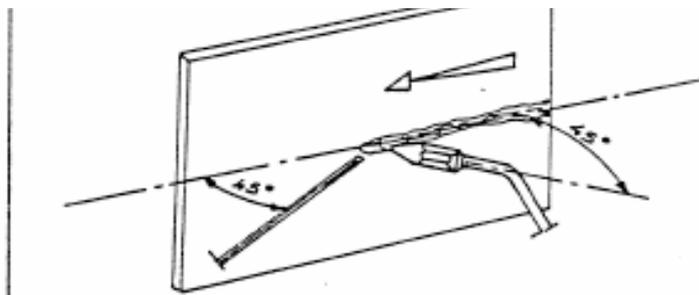
	3	70	2	<i>Une seule passe. Les deux soudeurs doivent conjuguer leur vitesse d'avance de façon à ne pas permettre au métal</i>
	4	100	2	
	5	140	2	
	6	140	3	
	7	200	3	
	8	250	3	
10	300	3		

3 $e < 10$ mm



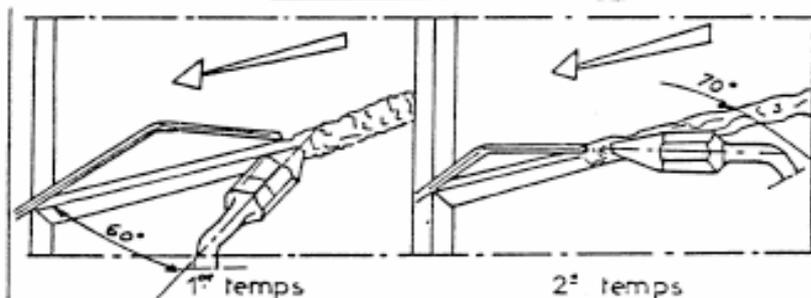
	12	400	3	<i>Une passe</i>
	14	400	4	
	16	500	4	
	18	500	4	
	20	630	4	

12 $e < 20$ mm



SOUDAGE EN CORNICHE

	5	350	3
	6	400	3
	7	500	3
	8	600	4
	10	800	4
	12	1000	4



1^{er} temps

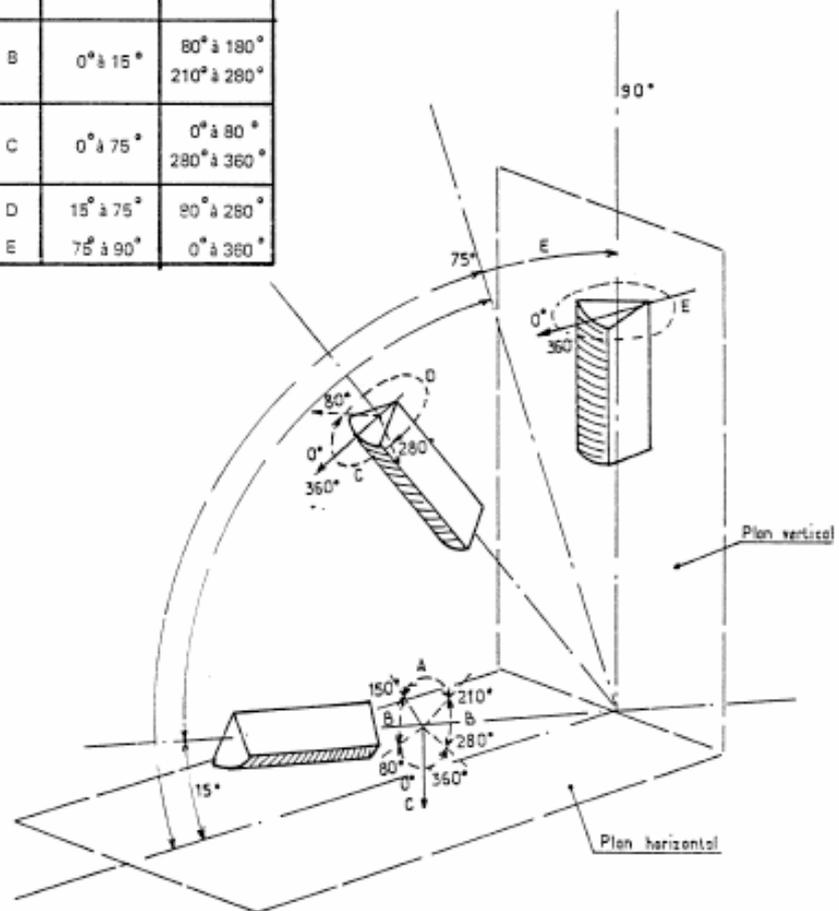
2^e temps

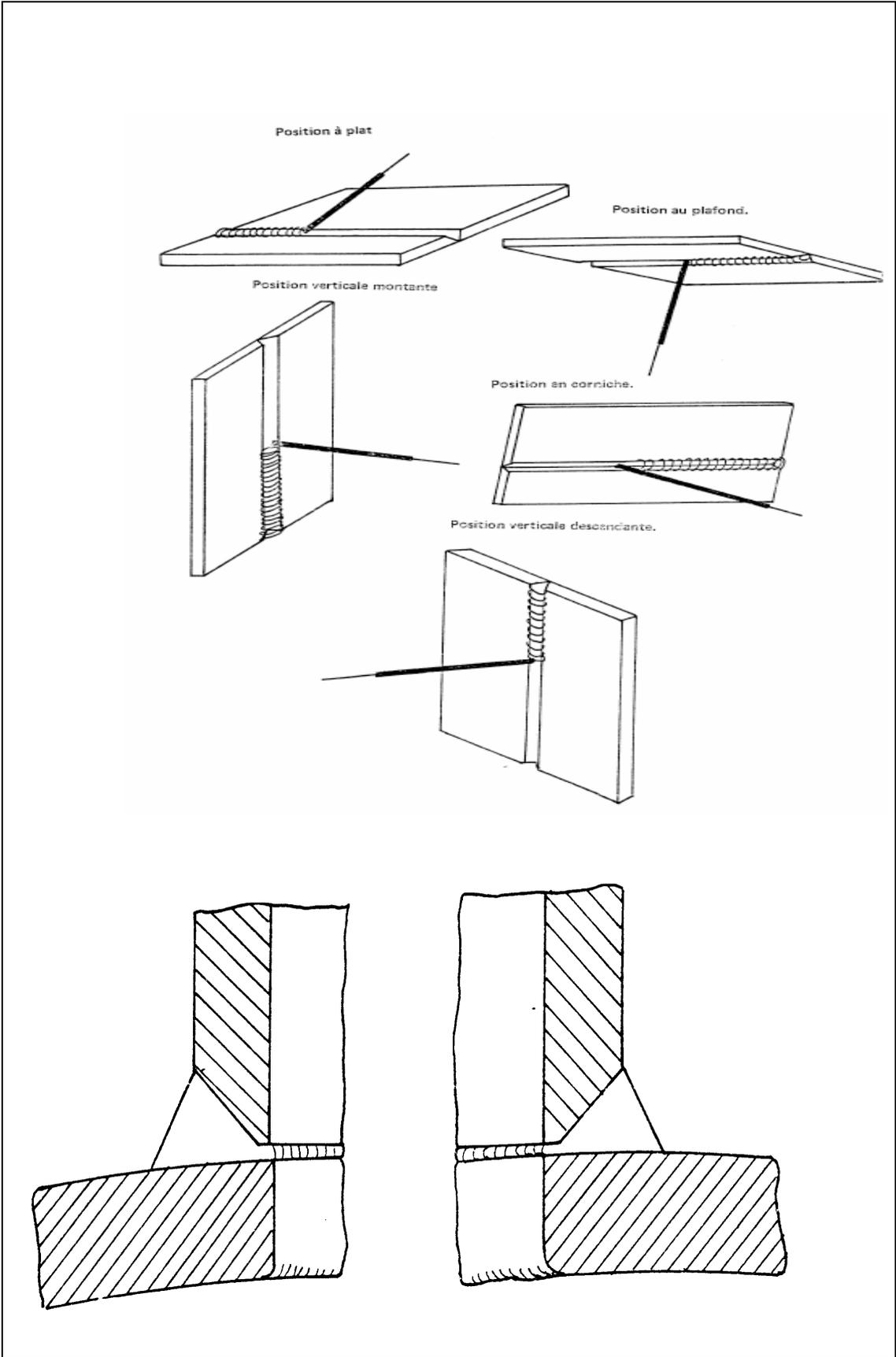
SOUDAGE EN CORNICHE (par bords successifs).

Préparation des bords	épaisseur à souder.	Base à employer	Diamètre Baguelette
	1	100	2
	1,5	140	2
	2	200	2
	2,5	250	3
	3	300	3

PREPARATION DES BORDS A SOUDER

POSITION	REF	INCLINAISON DE L'AXE	ROTATION DE L'AXE
A plat	A	0° à 15°	150° à 210°
Corniche	B	0° à 15°	80° à 180° 210° à 280°
Plafond	C	0° à 75°	0° à 80° 280° à 360°
Verticale	D	15° à 75°	80° à 280°
	E	75° à 90°	0° à 360°





PREPARATION DES BORDS A SOUDER

Figure 6



bord à bord sans chanfrein, sans écartement

$e < 2 \text{ mm}$

Figure 7



bord à bord sans chanfrein avec écartement pour constructions courantes.

Possibilités de souder sans reprise envers pour des épaisseurs inférieures à 4 mm

$e < 3 \text{ mm}$

Figure 8



- α 60° à 70° pour arc électrique

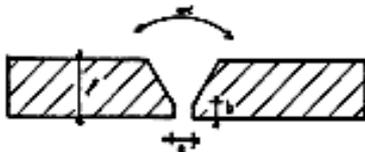
- α 70° à 90° pour chalumeau

- bord à bord avec chanfrein avec écartement : a

- pour joints courants.

$5 \leq e < 16 \text{ mm}$

Figure 9



- ditto figure 8

- bord à bord avec chanfrein et talon

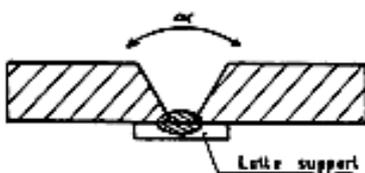
- écartement a : jusqu'à 4 mm (fonction des électrodes utilisées en première passe)

- talon b : 1 à 3 mm

- soudure s de très grande sécurité sans reprise envers (cas de tubes en toutes position).

e : jusqu'à 20 mm

Figure 10



- bord à bord avec chanfrein sur lette support

- soudures de très grande sécurité.

Lette support

PREPARATIONS SPECIALES



La tôle la plus épaisse doit être amincie afin que la chaleur soit répartie uniformément. La réglementation en vigueur préconise cette préparation pour les assemblages bout à bout d'épaisseurs inégales.



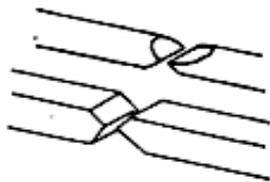
Pour de faibles différences d'épaisseur, si les efforts en service ne sont pas importants et si les règlements ne s'opposent pas, on peut réparer tir de chaque côté la différence d'épaisseur.



Dans le cas où les épaisseurs sont très différentes :

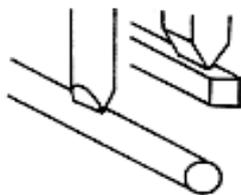
exemple : de 3 à 15 mm

Avantage : déformation minimale



Les préparations en pointes de crayons ou en pyramides sont toujours à éviter.

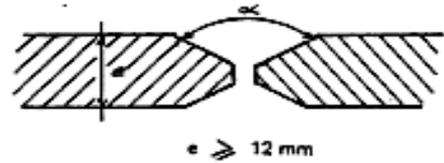
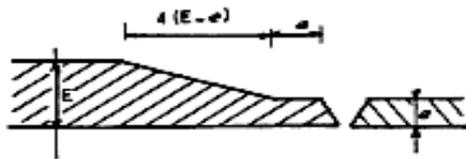
Alterner les passes afin de réduire les déformations.



Méthode de soudures d'angles de fers carrés ou ronds

- grande sécurité en évitant les risques de collages.

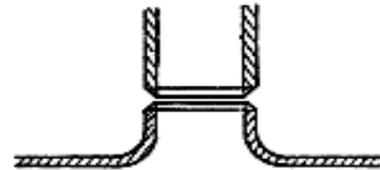
PREPARATION DES BORDS A SOUDER



: chanfrein en tulipe



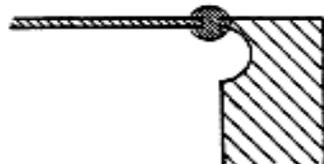
$e \geq 12 \text{ mm}$



tôles minces ; bords relevés.



$e \neq 1 \text{ mm} - h \neq 2 e$



épaisseurs très inégales.

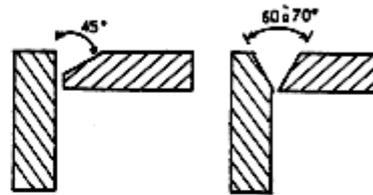


épaisseurs très inégales

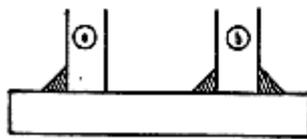
PREPARATION DES BORDS A SOUDER



Chanfrein naturel en angle extérieur

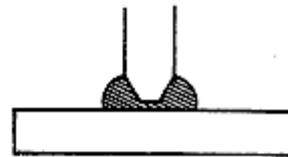


Chanfreins spéciaux en angle extérieur



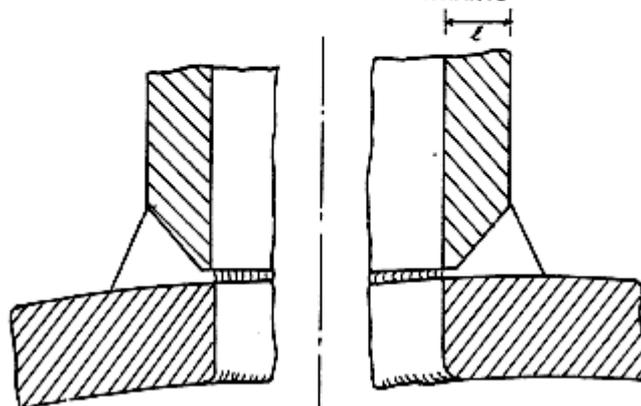
Chanfreins naturels en angle intérieur

a : simple
b : double



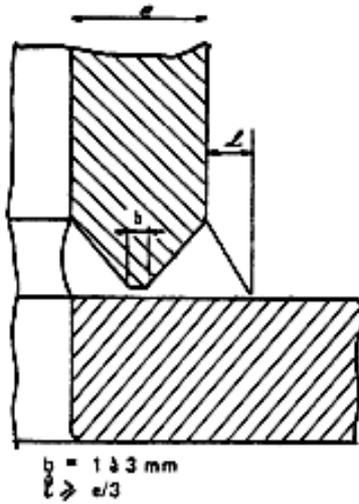
Préparation spéciale en angle intérieur

PIQUAGES NON PENETRANTS



PREPARATION DES BORDS A SOUDER

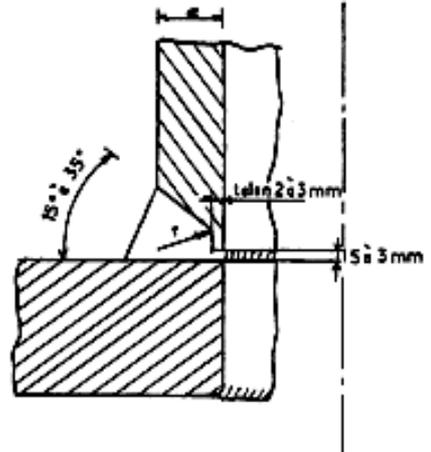
Piquage non pénétrant avec reprise intérieure possible.



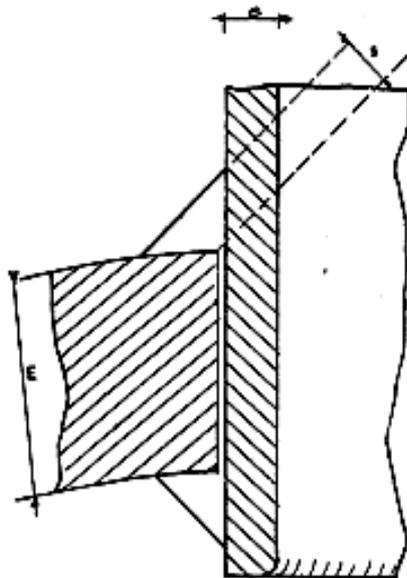
Piquage pénétrant

Piquage non pénétrant : cas de faibles rapports de \bar{Q} piquage/enveloppe.

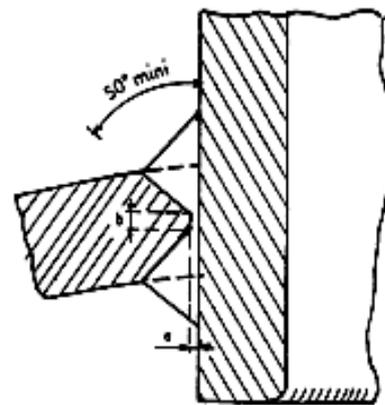
$6 < r < 13 \text{ mm}$



: Piquage pénétrant.



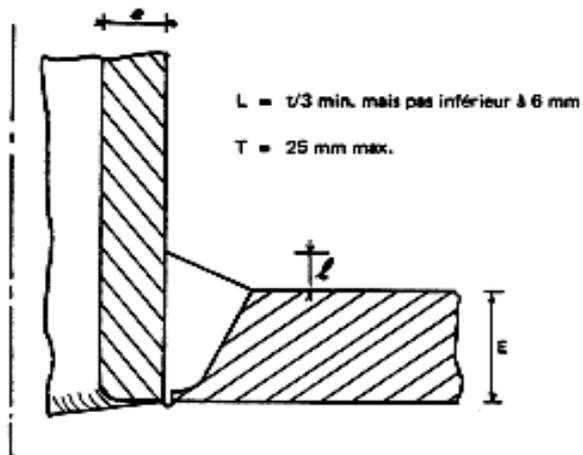
$e < E/2$
 $s = e$



$1 < a < 3 \text{ mm}$
 $0 < b < 3 \text{ mm}$

PRÉPARATION DES BORDS A SOUDER

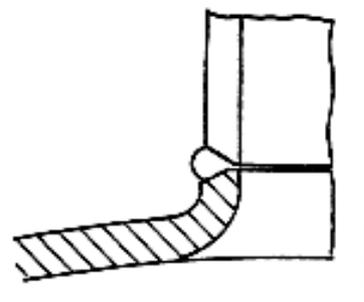
Piquage pénétrant avec soudage d'un seul côté



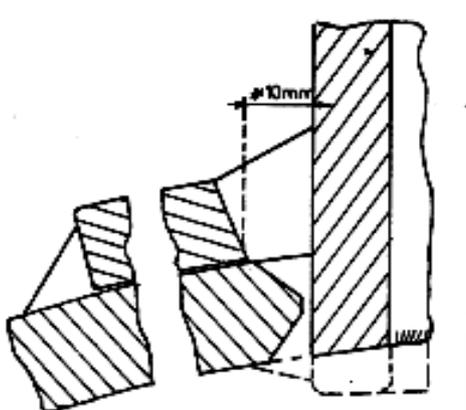
$$e \geq \frac{E}{3}$$

$E = 25 \text{ mm maximum.}$

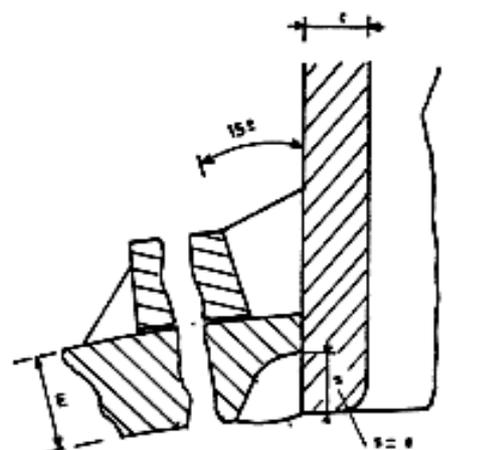
: Piquage sur bords relevés.



: Piquage pénétrant avec anneau renfort

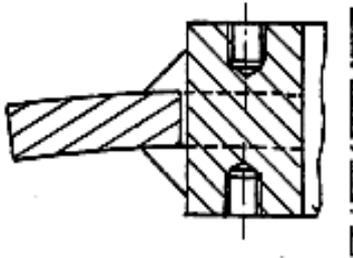


: Piquage pénétrant avec anneau renfort.

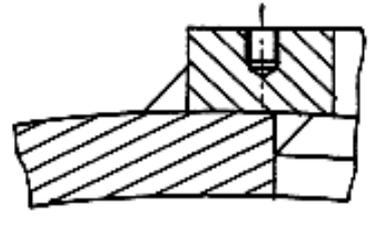


PREPARATION DES BORDS A SOUDER

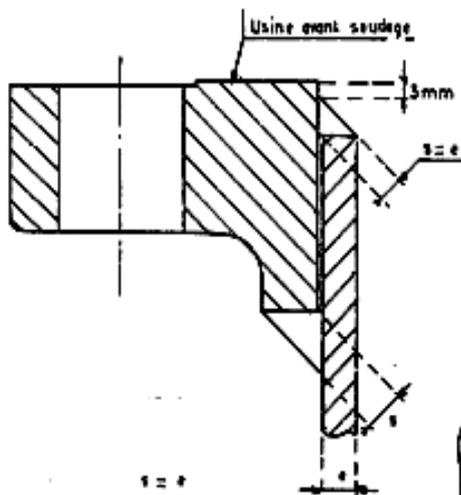
: Piquage avec soudure d'angle pour fixations spéciales.



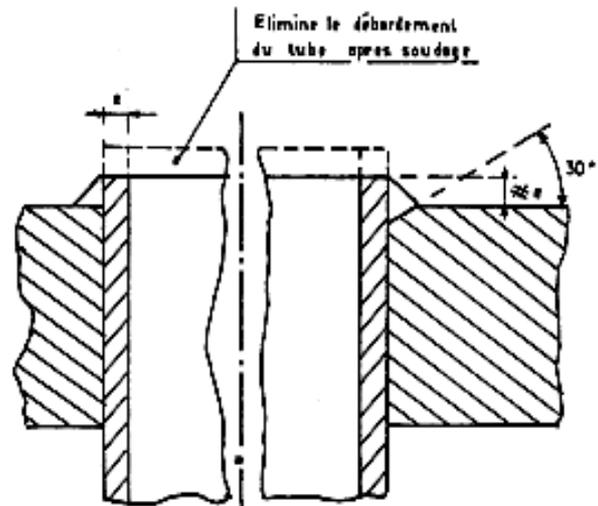
: Piquage avec soudure d'angle pour fixations spéciales.



: Bride à colerette avec emboîtement soudée d'angle



Fixation de tubes sur plaques tubulaires.

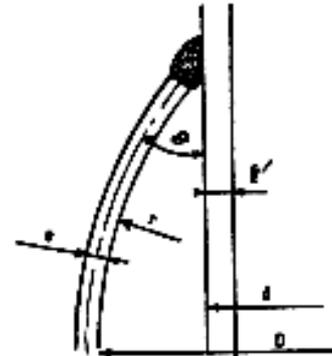
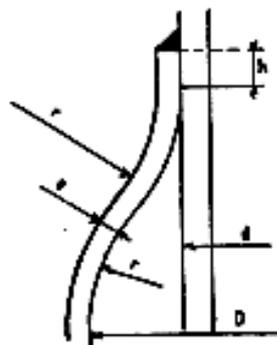
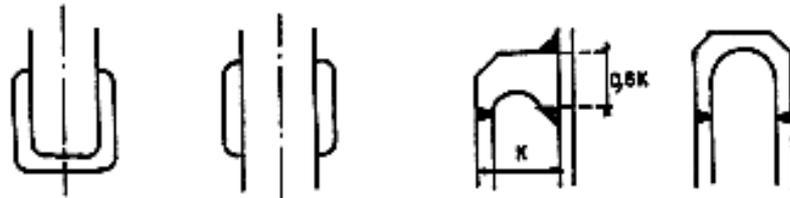


PREPARATION DES BORDS A SOUDER

CAS DES APPAREILS A DOUBLE ENVELOPPE

EXTRAITS DE LA CIRCULAIRE MINISTERIELLE DU 25.09.1960

Différents types de montage.



$$r > \frac{D}{10}$$

$$h \geq 3e$$

$$\tau = \frac{P}{\pi d S} \leq \frac{8}{30} \alpha R$$

τ : taux de travail dans la soudure

P : poussée axiale totale sur l'assemblage (pression + $t^\circ C$)

S : épaisseur cordon de soudure.

α : coeff. résistance relative de la soudure.

R : résistance rupture (paroi extérieure).

$$r \geq \frac{D}{10}$$

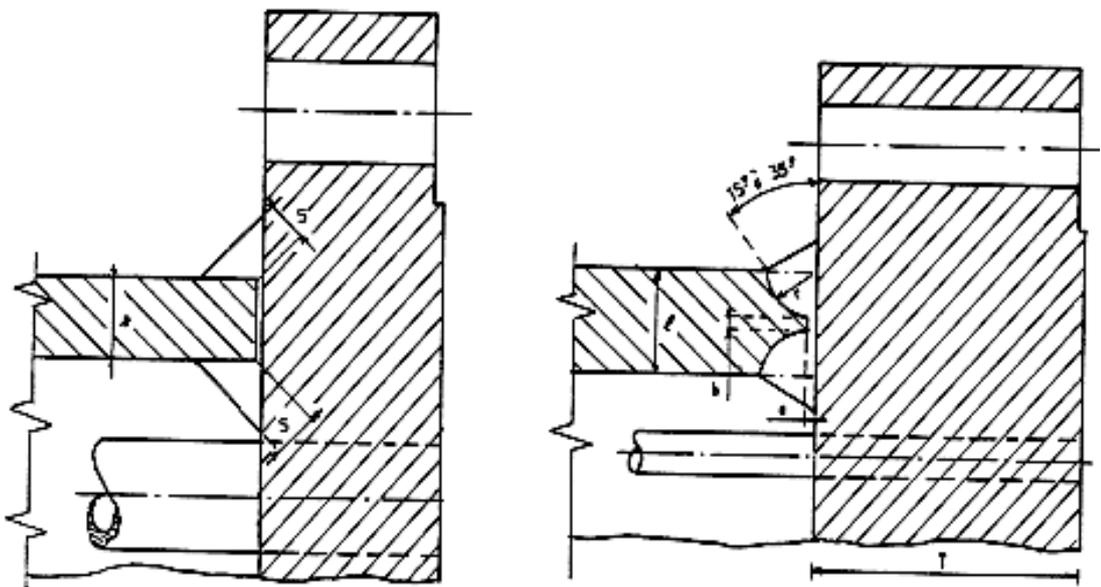
$$20^\circ < \theta < 45^\circ$$

$$\tau = \frac{P}{\pi d S} \leq \frac{8}{30} \alpha R$$

$$e \geq \frac{4}{10} \sqrt{\frac{P}{\pi R'}}$$

R' : résistance rupture (paroi intérieure).

EXEMPLE DE FIXATION DE PLAQUES TUBULAIRES SUR UNE ENVELOPPE

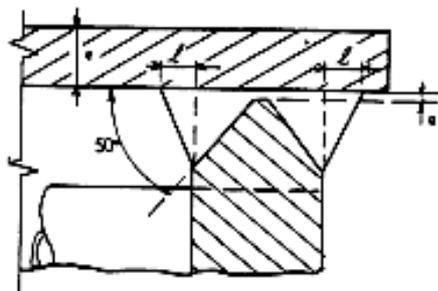


s = e

$$r = 6 \text{ à } 13 \text{ mm}$$

$$0 < a < 3 \text{ mm}$$

$$1 < b < 3 \text{ mm}$$

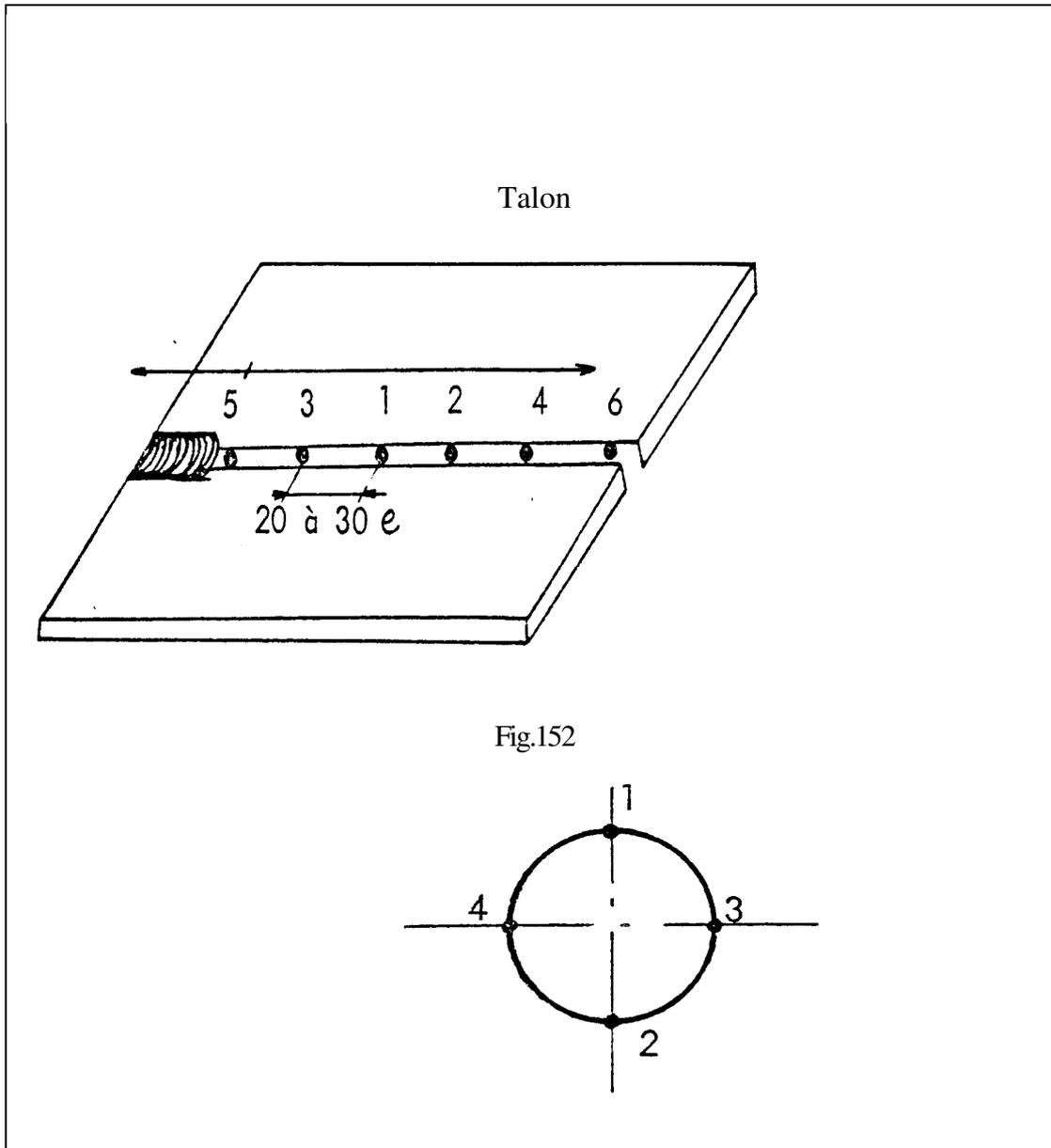


$$l \neq e/3$$

$$0 < a < 3 \text{ mm}$$

4.7 Pointage des pièces

Avant le début de toute soudure, il y a lieu d'immobiliser les parties à assembler afin d'éviter tout écartement trop important ou tout chevauchement des tôles du au phénomène de dilatation et de retrait en cours de soudage. Avant pointage, prévoir un écartement plus important à celui que l'on souhaite après pointage. Après pointage, exécuter un talon puis commencer la soudure dans le sens inverse du talon après retournement de la pièce ou déplacement du soudeur fig.152.



4.8. Pointage des tubes de tôles d'angles

Exécuter les points toujours diamétralement opposés pour compenser les retraits **fig.153**.

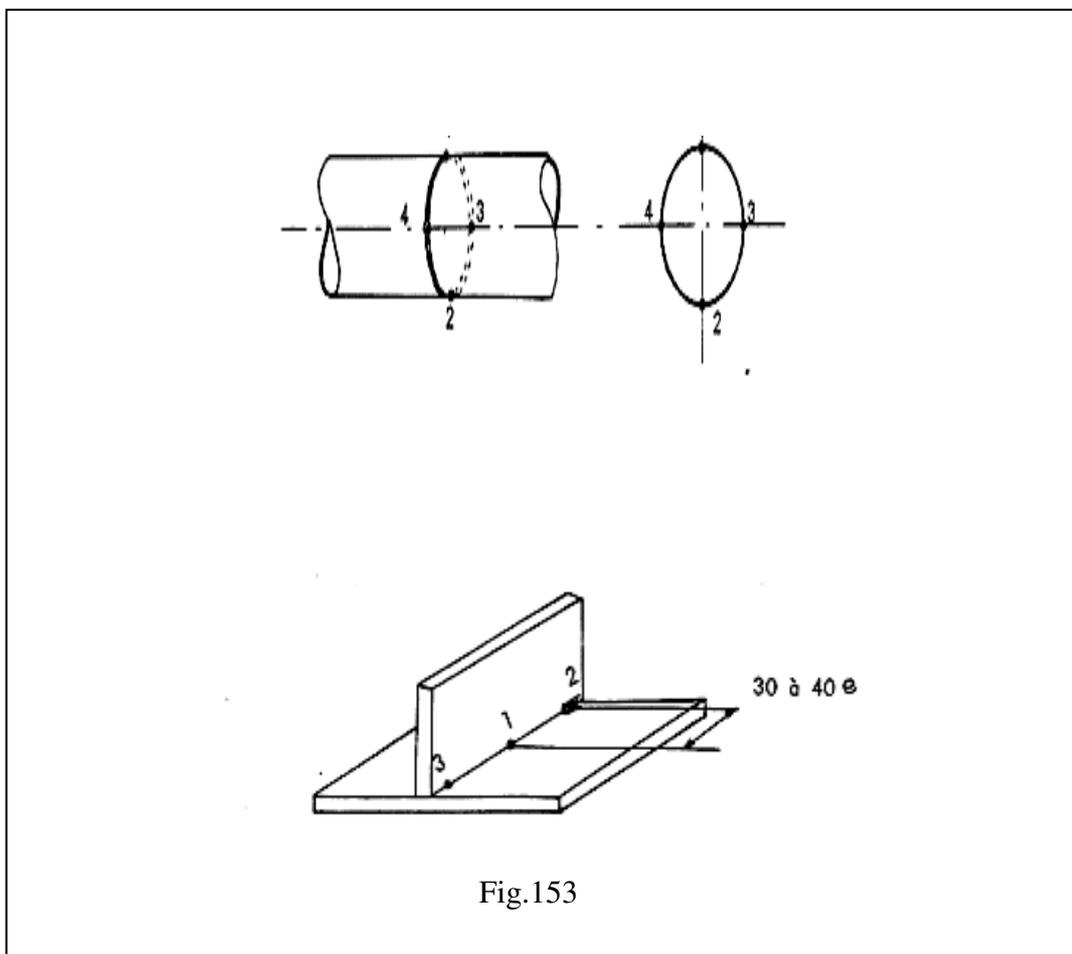


Fig.153

4.9 L'oxycoupage C'est une opération de coupage thermique, destinée à découper les métaux par combustion sous jet d'oxygène ou par fusion du métal ou encore par l'utilisation simultanée des deux procédés.

Dans le cas par **combustion**, le métal est chauffé jusqu'à sa combustion ou il brûle grâce au jet d'oxygène. Dans le cas par **fusion**, le métal est chauffé jusqu'à sa fusion complète à l'endroit de coupe grâce à la source de chaleur provoquée par l'arc électrique, laser, plasma etc. Dans le

procédé oxycoupage classique, la chaleur de coupe est obtenue grâce à la combustion d'acétylène avec l'oxygène. L'oxycoupage ne peut pas être appliqué à certains métaux dont la température de fusion est inférieure à la température d'inflammation, car le métal doit brûler à l'état solide, l'aluminium et ses alliages est un exemple.

Le plus souvent l'oxycoupage est utilisé pour les aciers, dont la température de fusion est supérieure à celle de leur inflammation (1080°C à 1380°C). Car les oxydes FeO et Fe₃O₄ formés lors de l'oxycoupage fondent à une température inférieure à la température de fusion de la fonte et de l'acier.

Les aciers au carbone avec 0,3% de carbone maximum et les aciers faiblement alliés avec 0,2% de carbone maximum peuvent être coupés dans n'importe quelles conditions industrielles et sans limitation d'épaisseur ni de température ambiante. A partir de 0,5 %C, il faut augmenter la chauffe et avec %C > 1,9 il y a impossibilité de coupe. Le chalumeau oxycoupeur au point de vue construction diffère de celui utilisé pour le soudage. Un type de chalumeau est représenté sur la figure.154.

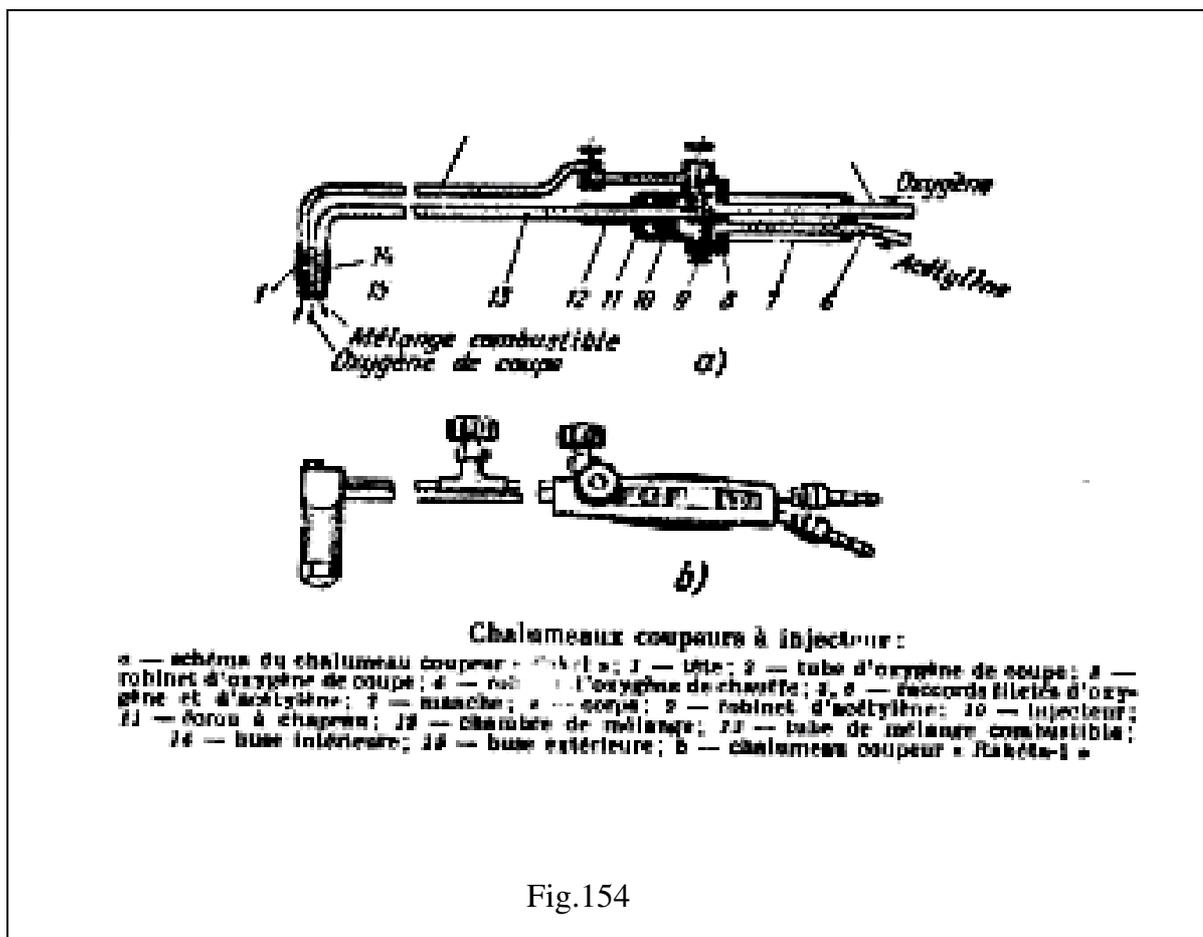


Fig.154

Certains éléments accompagnant le fer favorisent la coupe tels que le Manganèse, Nickel et d'autres la rendent impossible tels que silicium, chrome, tungstène.

Pour permettre de couper les fontes et aciers alliés on a pu mettre au point certains procédés tels que :

- **Oxycoupage avec métal d'apport 'acier doux**
- **Oxycoupage à la poudre en silice**
- **Oxycoupage à la poudre en fer**

La vitesse d'oxycoupage manuel est déterminée selon l'expression suivante :

$$V = 40000 / 50 + S \text{ (mm/mn)}$$

S : épaisseur de l'acier à couper.

Les faibles vitesses de coupe provoqueront une fusion des bords et les grandes vitesses se traduiront par l'apparition des portions non coupées dues au retard du jet d'oxygène.

Avant chaque coupe on doit procéder au nettoyage de la surface du métal à couper, car sa propreté influe sur la qualité de coupe.

La rouille, les salissures qui pourraient entraver l'opération de coupage seront éliminées par un procédé thermique, mécanique ou chimique.

La méthode de découpage la plus simple consiste à chauffer la surface du métal suivant la ligne de coupe et à le nettoyer ensuite avec une brosse métallique.

Il existe aussi le découpage mécanique ou le découpage chimique avec l'utilisation de dissolvants à base d'acide chlorhydrique ou sulfurique.

4.10 Rechargement

Le rechargement est un procédé qui consiste à recouvrir une partie du métal de base par une couche de métal en fusion. Le rechargement est destiné surtout à la réparation des pièces détériorées ou encore à obtenir des couches superficielles du métal ayant une bonne résistance à l'usure, à la corrosion etc.. obtenue grâce à l'introduction d'éléments d'alliage. Le rechargement s'effectue en plusieurs couches.

A la différence du soudage, les défauts rencontrés lors du chargement tels que tensions internes, déformation etc.. sont négligeables et cela est dû à la faible pénétration (limitée uniquement à la zone).

Les métaux d'apport utilisés pour le rechargement se distinguent par leur composition chimique et qui en dépendent de la destination de la partie de la pièce à recharger.

- Rechargement sans qualité particulière (aciers faiblement alliés).
- Rechargement résistant aux chocs (aciers austénitiques au manganèse).
- Rechargement de la fonte (fontes alliées au chrome et au chrome-nickel).
- Rechargement de l'aluminium (alliages au silicium).
- Rechargement des différents métaux (le métal d'apport est identique à celui de base).

Le rechargement au chalumeau oxyacétylénique a un emploi plus restreint que le rechargement à l'arc électrique à causes des grandes déformations. Le rechargement à l'arc électrique s'effectue avec des électrodes épaisses de diamètre (6 - 12mm) et en présence d'intensité de courant importante (250 à 500A). La largeur de la passe est considérée normale si elle est égale à 3 -4 fois le diamètre de l'électrode. La méthode à employer est le soudage de gauche à droite ou d'avant en arrière.

4.11 Le soudage hétérogène

Dans le soudage hétérogène on distingue plusieurs procédés :

a- Soudo-brasage

En soudo-brasage la pénétration des joints et le mode opératoire sont sensiblement les mêmes qu'en soudage autogène. Le métal d'apport vient mouiller les bords des pièces à souder pour assurer la liaison. La température à obtenir varie avec les métaux à souder

Acier : 750 -950°C (rouge cerise)

Fonte : 650-800°C (rouge sombre)

Cuivre : 850-900°C

Aluminium : 600°C

Il offre l'avantage de dilatation et de retraits moindre qu'en soudage autogène.

b- Brasage tendre

La température de fusion du métal d'apport est ici très basse, inférieure à 400°C. Un tel type de joint n'est pas fait pour résister à des températures ou à des efforts mécaniques élevés

Les alliages d'apport de brasage sont à base d'étain, de plomb, de cadmium (200 à 270°C). Le brasage tendre on le pratique aussi au fer à souder.

c- Brasage fort

Le mode opératoire et la préparation des pièces sont proches du soudage autogène. Le brasage est caractérisé par l'introduction entre deux surfaces présentant en général un faible écartement, un métal fondu à fort pouvoir mouillant.

En brasage fort la température de fusion du métal d'apport est supérieure à 450°C. les métaux ou alliages d'apport utilisés le plus souvent sont :

- Le laiton (Cu+Zn)
- L'argent
- Le cuivre

Le brasage est réalisé avec un apport très faible de métal, alors que le soudo-brasage nécessite un dépôt de métal d'apport relativement important variant avec la forme et les dimensions du joint à réaliser.

Dans le brasage fort, le métal d'apport a une résistance mécanique supérieure à celle des métaux d'apport employés dans le brasage tendre.

Le métal d'apport mouille et s'accroche aux tôles à souder des pièces de toutes sortes en fonte, acier, bronze, cuivre ou assembler des alliages différents (Acier-Fonte, Cuivre-Acier, Cuivre-Laiton) il s'applique également à l'aluminium et ses alliages.

Métaux d'apport de brasure

Les alliages du genre laiton contenant du silicium sont destinés pour le soudo-brasage de l'acier et de la fonte (le silicium abaisse la température de fusion de l'alliage 850- 950°C).

Pour le brasage tendre on utilise les alliages à base d'étain et de plomb dont la température de fusion est de 270°C.

Les alliages d'argent conviennent pour tous les métaux ferreux et cuivreux grâce à leur fluidité, mouillabilité et leurs bonnes caractéristiques mécaniques. Les alliages d'aluminium-silicium (Al-Si10) sont utilisés pour l'aluminium et ses alliages.

Les alliages Mg-Al-Zn et Cu-Au sont destinés respectivement pour le magnésium et pour la bijouterie (prothèse dentaire).

Type de brasure

N°	% composition chimique						d'écoulement °C	Point de fusion °C
	Ag	Cu	Zn	Cd	Sn	Ni		
1	5	58	37				870	855
2	9	53	38				850	790
3	20	45	35				815	780
4	30	38	32				765	740
5	35	26	21	18			700	610
6	40	30	28			2	780	670
7	45	30	25				745	680
8	50	15	17	18			635	630
9	60	30			10		720	690
10	70	20	10				755	725
11	80	16	4				810	735

Flux de brasure

Le mouillage ne peut se faire que sur un métal mis à nu et parfaitement propre c'est à dire dégraissé et décapé. Au cours du brasage, l'élévation de la température donne naissance à de nouveaux oxydes métalliques et autres composés qui forment un film empêchant le contact métal de base-métal d'apport.

Pour que le métal d'apport mouille le métal de base, il faut empêcher la formation de ce film, c'est le rôle des flux (ou fondants) qui réduisent, détachent et mettent en suspension les oxydes.

Le flux se présente sous différentes formes ; poudres, pâtes, liquide ou gaz. Les plus utilisés sont les pâtes et poudres.

Le flux peut être projeté sur le joint ou en chauffant la baguette d'apport sur quelques centimètres à partir de son extrémité et la plonge dans le flux qui se dépose ainsi sur elle.

Pour les alliages à base de fer et de cuivre, on emploie comme flux :

- Le borax ou borate de soude (760°C).
- Mélange de borax (50%) et acide borique (50%).
- Mélange borax, acide borique et fluorures qui fond à 550°C, il est utilisé pour le brasage à température relativement basse (brasage à l'argent).

Ces flux ne sont pas corrosifs. Pour les alliages d'aluminium, les flux utilisés sont des mélanges de chlorures, fluorures alcalins (de sodium et potassium) et de bromures. Ces flux sont corrosifs.

Défauts de soudure

Les défauts de soudure les plus fréquents sont :

- **Collage** On dit qu'il y a collage quand la liaison entre le métal d'apport et le métal de base est insuffisante, ceci résulte d'une fusion imparfaite de métaux.

- **Manque de pénétration** La soudure ne traverse pas toute l'épaisseur du métal de base. Les causes sont le chauffage insuffisant, soudage trop rapide.

- **Caniveau ou morsure** Creux qui se produisent dans le métal de base le long de la soudure. Les causes sont le chauffage excessif, angle d'inclinaison du chalumeau incorrect.

- **Dénivellation ou dissymétrie** Proviennent d'un mauvais cintrage ou glissement entre les pointages.

- **Fissures** Les fissures et les criques dans le sens de l'épaisseur ou longitudinale sont dues au retrait de refroidissement ou à la trempe locale du métal à trop forte concentration en carbone.

Les possibilités de soudage entre deux métaux semblables ou différents

*	Aluminium	Laiton	Cuivre	Cupro-nickel	Acier doux	Nickel	Argent	Acier inoxydable
I aluminium								
Laiton			*		*	*		
Cuivre		*	*	*	*	*	*	
Cupro-nickel			*	*	*	*	*	*
Acier doux	*					*		
Nickel					*	*	*	
Argent	*		*	*			*	
Acier inoxydable					*	*		*

4.12 Le soudage à l'arc électrique

C'est un procédé de soudage autogène, donc la chaleur est fournie par l'arc électrique qui jaillit entre l'électrode et la pièce à souder. La formation d'un arc électrique entre l'électrode et les éléments à souder (le plus souvent sont de même nature) engendre la chaleur qui fait fondre localement la pièce à souder et l'électrode dont le métal est projeté dans le bain de fusion et formant ainsi la soudure.

La plupart des électrodes utilisées actuellement ont un enrobage qui facilite l'amorçage. La chaleur de fusion est fournie à l'aide d'un courant électrique approprié fourni par un transformateur de soudage (poste de soudage) figure 155.

Le rôle du poste de soudage est de débiter le courant électrique convenable (forte intensité sous faible différence de potentiel). Le courant électrique fourni par le réseau sous tension (220 ou 380V le plus souvent) est transformé, car la tension d'utilisation est comprise entre 18 et 50V.

La soudure à l'arc électrique est moins souple que la soudure oxyacétylénique, mais l'exécution des soudures est plus rapide que celle du chalumeau, l'apport de chaleur étant très localisé et très important (température de l'arc comprise entre 3000 et 4000°C). Ce procédé est à déconseiller dans le cas du soudage des tôles très minces.

Le soudage à l'arc électrique s'applique aux aciers doux, la plupart des aciers spéciaux et inoxydables sont soudables à l'arc électrique, mais au delà d'une teneur de 0,4 à 0,5% de carbone les soudures sont assez fragiles.

Le soudage de la fonte grise est possible soit à froid (exige une préparation coûteuse et une exécution attentive), soit à chaud (préchauffage, soudage, refroidissement lent).

Les applications aux métaux et alliages non ferreux quoique possible dans la plupart des cas ont été jusqu'alors assez limitées.

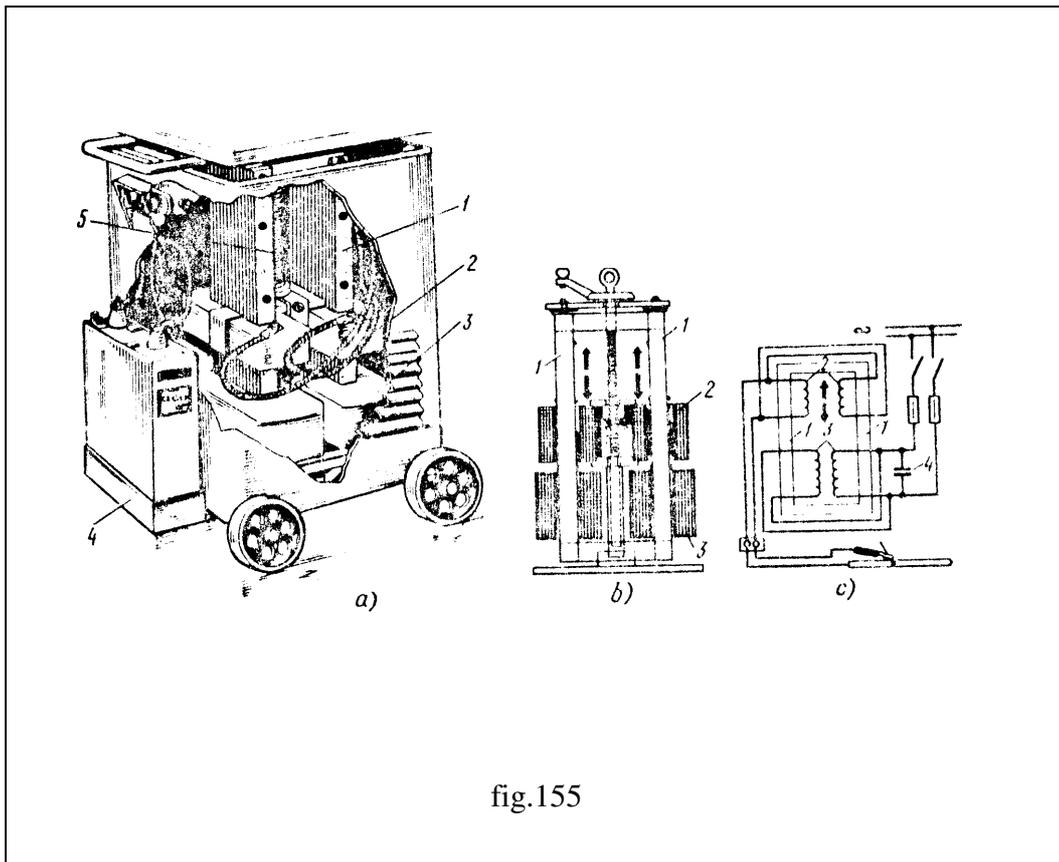


fig.155

4.12.1 L'arc électrique

C'est une décharge électrique de longue durée se produisant dans un mélange de gaz et de vapeurs ionisées formée sous l'effet du passage du courant électrique entre le métal d'apport (électrode) et la pièce à souder (anode) figure.65. Le mélange de gaz et de vapeur constitue le milieu conducteur et permet le passage de l'arc. Pour amorcer un arc et le maintenir, il est nécessaire que l'espace qui sépare l'électrode et le métal à souder contient des particules à charges électriques positives et négatives (ions positifs et négatifs et électrons) qui sont obtenus lorsque les atomes perdent ou captent des électrons (phénomène d'ionisation). Lorsqu'on fait le contact entre l'électrode et le métal de base, un courant passe, mais vu le mauvais contact, la résistance est grande, d'où une élévation de la température par effet Joule où $E = 0,24.U.I.(V. A = cal/sec)$. Dans ce cas c'est l'amorçage. Et si on écarte le courant passe toujours et il apparaît une lumière éblouissante c'est l'arc électrique.

Forme et aspect de l'arc (figure.156) L'arc éclate entre :

- L'extrémité et l'électrode et la surface de la pièce, On distingue : Le noyau de l'arc, très lumineux, reliant directement le bout de l'électrode au métal fondu.

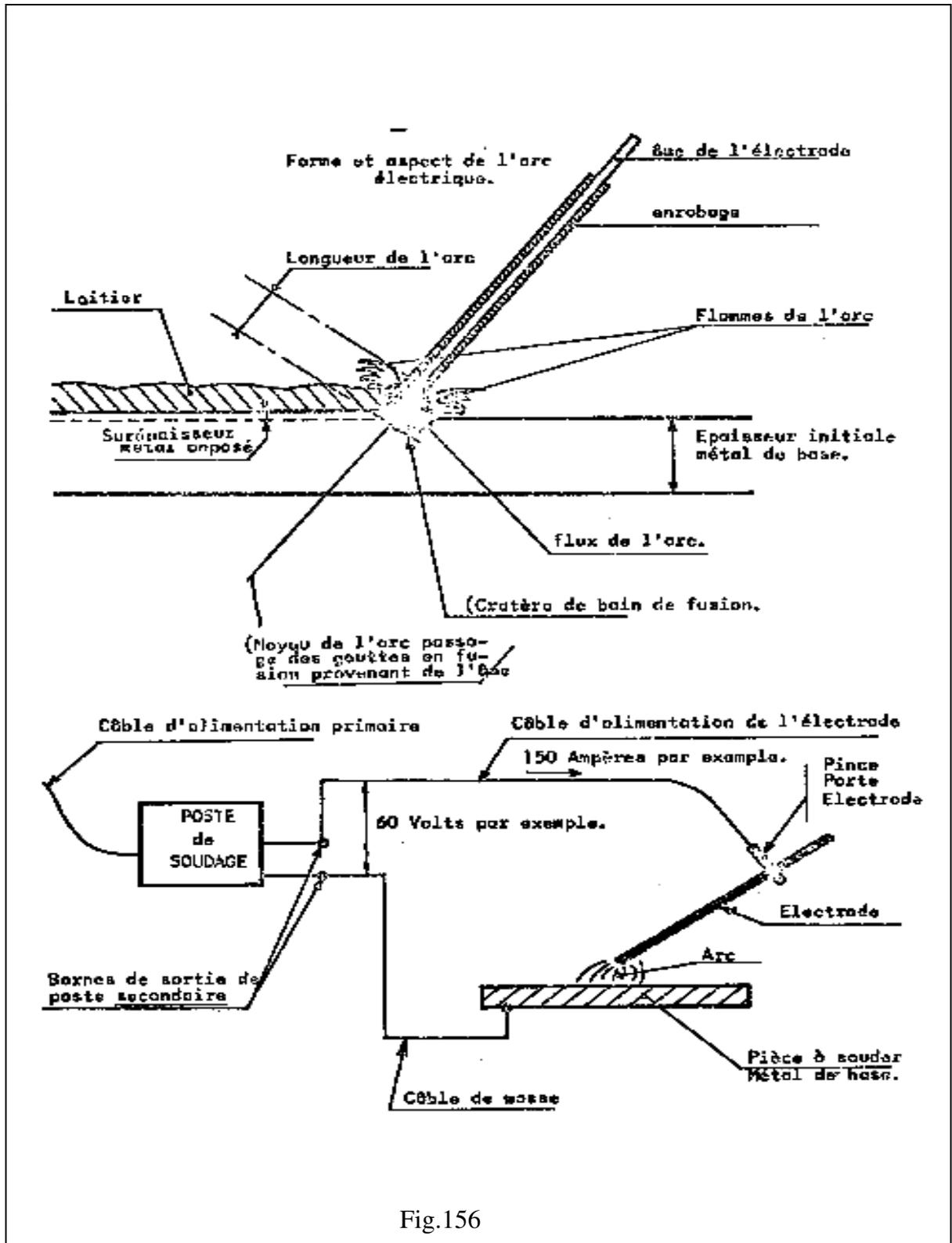


Fig.156

- Le flux de l'arc entourant le noyau, un peu moins brillant
- Les flammes de l'arc entourant le flux et qui sont aisément déviées par le champ magnétique en courant continu, et les courants d'air et dont la couleur dépend du métal soudé.

Caractéristiques mécaniques de l'arc

Le métal de l'électrode est projeté sur la pièce en fusion sous forme de vapeur et de gouttelettes. Ce transport se fait le long de l'arc, dans le flux. Le flux reste collé à l'arc par des phénomènes :

- D'attraction,
- D'adhérence et de cohésion
- D'effet de surface

Le transfert du métal de l'électrode vers le métal de base ne dépend pas de la pesanteur.

La finesse des gouttes dépend de la nature de l'âme de l'électrode et de l'enrobage ; elle augmente lorsque l'intensité de soudage augmente.

Si les gouttes sont trop volumineuses, il y a court circuit : l'électrode colle.

Travail de l'arc, rôle de la pénétration

L'arc pénètre dans la pièce à souder sur une certaine épaisseur où le métal est en fusion : le cratère, la profondeur de ce cratère détermine la pénétration. Le métal d'apport s'accumule sur les bords du cratère dont la profondeur permet d'observer la pénétration. Il faut que le cratère soit profond afin d'obtenir une pénétration correcte. La pénétration augmente avec le diamètre de l'électrode, elle croît également avec l'intensité de soudage. Une faible vitesse d'avance l'augmente mais faiblement. La tension de soudage que nous allons définir est essentiellement fonction de la nature de l'enrobage. Sauf dans certains cas spéciaux, il est néfaste de rechercher une trop forte pénétration.

Elle a pour rôle :

- De refondre superficiellement les couches de soudures antérieures en éliminant toute trace de laitier ou les collages.
- De fondre le talon en soudage bord à bord.
- De fondre les bords du chanfrein.

Avantages de l'arc court

- Concentrer la chaleur,
- Protège bien le métal fondu par les flammes et l'absorption des gaz extérieurs est ainsi élevée.
- Il augmente la concentration du métal déposé.

Inconvénients dus à un arc long

- Il disperse la chaleur,
- Il est instable,
- Il augmente le trajet des gouttelettes et augmente par conséquent le risque d'oxydation du métal fondu. L'arc court ne présente donc que des avantages.

Caractéristiques électriques de l'arc Nous allons tout d'abord donner quelques définitions :

-tension à vide du générateur (U_0)

C'est le nombre de volts mesurés aux bornes secondaires du post de soudage lorsque l'arc n'est pas établi, c'est à dire lorsque le circuit est ouvert.

-Intensité de court-circuit (I_{cc})

C'est le nombre d'ampères qui traverse les câbles et l'électrode lorsque cette dernière est collée au métal de base. A ce moment là il n'y a pas d'arc et la tension aux bornes du poste est pratiquement nulle.

-Intensité de soudage (I_s)

C'est le nombre d'ampères qui traverse les câbles de soudage, l'électrode et l'arc électrique en période de soudage normal. Cette intensité peut en général être lue sur l'ampèremètre qui doit équiper le poste de soudage.

-Tension de charge (U_s)

C'est le nombre de volts mesurés entre la pièce et l'électrode lorsque l'arc est normalement établi en période de soudage.

-En courant continu

Le fonctionnement de l'arc dépend de :

- La tension aux bornes de l'arc (U_s).
- L'intensité du courant dans l'arc (I_s).
- La longueur de l'arc (L).
- La surface du cratère (S).

Tous ces facteurs sont liés par des relations complexes qui sortent du cadre de ce chapitre, le sens du courant est constant, il rentre dans l'arc du côté de l'anode (positive) et sort de l'arc vers la cathode (négative).

La distribution de la chaleur dans l'arc est mal connue on peut retenir que

- 2/3 de la chaleur est libérée sur l'anode (+).
- 1/3 de la chaleur est libérée sur la cathode (-).

Comme la masse de la pièce à souder est grande par rapport à celle de l'électrode, on a tout intérêt (sauf cas particulier : ex : électrodes basiques), à relier la pièce au pôle + du poste. C'est la raison pour laquelle le courant continu donne souvent de meilleurs résultats.

La vitesse de soudage en courant continu est plus grande qu'en courant alternatif. On utilise généralement le courant continu pour le soudage :

- Des tôles peu épaisses,
- Des métaux non ferreux,
- Des métaux inoxydables,
- Avec les électrodes basiques.

- En courant alternatif

En courant alternatif 50 Hz, il y a interruption de l'arc et changement de polarité 10 fois par seconde.

La durée de l'interruption de l'arc est d'environ 1/400ème de seconde, et à chaque amorçage il y a une surtension assez élevée corrigée par des bobines de réactance équipant les postes de soudures.

Comme en courant continu, la tension de soudage, l'intensité de soudage, la longueur de l'arc et la surface du cratère sont des facteurs liés par des relations complexes.

Retenons simplement qu'une variation de la longueur d'arc provoque une élévation de la tension de soudage. Connaissant par conséquent la tension de fonctionnement de l'électrode, on pourra vérifier le travail du soudeur en mesurant cette dernière. L'opérateur dispose d'autres critères pour apprécier de la qualité de l'arc :

1. L'arc court

- émet un bruit de froissement (friture).
- Projette un flux continu de petites étincelles.
- A un aspect symétrique.

2. L'arc long

- émet de petites explosions.
- Projette à chaque explosion de nombreuses gouttelettes.
- A un aspect dissymétrique.
- L'arc est plus instable en courant alternatif à cause des changements de polarité, pour le rendre plus stable, des réactances (volants électriques) sont incorporées dans les postes. Les tensions de soudage doivent être plus fortes qu'en courant continu. Par contre, le courant alternatif ne crée pas de soufflage magnétique de l'arc.

Amorçage de l'arc

En pratique, il suffit pour amorcer l'arc, de frotter l'extrémité de l'électrode sur la pièce à souder puis de l'écartier légèrement pour éviter le collage. Au moment du contact, le courant passe dans le circuit et il continue à circuler quand l'électrode s'écarte de la pièce : l'espace entre les deux est devenu conducteur (on dit qu'il y a eu ionisation). La tension du courant électrique devra être suffisante pour amorcer l'arc, pour pouvoir ioniser l'espace).

entre la pièce et l'électrode. Cette tension minimum varie selon les électrodes entre 40 et 80 volts. Quand l'arc est amorcé, la tension nécessaire au maintien de l'arc diminue (20 à 35volts).

Nota.: Il ne faut jamais que l'électrode rougisse sinon l'arc s'amorce mal ou est instable. Il faut maintenir l'électrode aussi froide que possible ;si elle chauffe, la piquer en son milieu dans le porte électrode.

4.12.2 Les postes de soudage

Ces appareils sont destinés essentiellement à transformer le courant électrique du réseau (à tension élevée : 220 à 380 volts et faible intensités) en un courant utilisable pour le soudage qui met en jeu de fortes intensités mais des tensions faibles.

Ils ont pour rôle essentiel :

- De permettre un réglage de l'intensité,
- D'assurer automatiquement le passage de la tension d'amorçage à la tension d'arc.
- De fournir un courant stable permettant de souder dans les meilleurs conditions.

On distingue deux grandes catégories de postes :

- Les postes à courant alternatif de soudage,
- Les postes à courant continu.

Les postes à courant alternatif

Les transformateurs statiques

Ces transformateurs sont monophasés ou triphasés, leur secondaire fournit du courant alternatif à 50 périodes par seconde comme dans tous les réseaux.

Ils ne nécessitent pratiquement aucun entretien, il n'y a pas en effet de parties tournantes.

Les postes rotatifs et les changeurs de fréquence

Ces postes comportent :

- Un moteur d'entraînement qui peut être soit électrique, soit à essence ou diesel.
- Une génératrice à courant alternatif bobinée spécialement pour usage en soudage.

Cette génératrice fournit soit de l'alternatif à 50 périodes soit un courant de fréquence plus élevée (généralement 150 périodes) auquel cas on lui donne le nom de changeur de fréquence. Ces groupes sont d'un prix inférieur à celui d'un groupe à courant continu mais plus élevé qu'un poste statique.

Les postes à courant continu

Les redresseurs statiques

Ils comportent un transformateur statique analogue à celui des postes statiques alternatifs, et sont en plus équipés d'un redresseur de courant. Ces postes sont généralement triphasés, ils ne déséquilibrent donc pas le réseau sur lequel ils sont branchés. Ils ne nécessitent pratiquement aucun entretien.

Les groupes rotatifs continu

Ces postes comportent :

- Un moteur d'entraînement (moteur électrique ou moteur à essence, ou moteur diesel).
- Une génératrice à courant continu (ou dynamo).

Ces groupes sont les plus onéreux à l'achat et en entretien et ne se justifient en général que pour le soudage avec de fortes intensités en semi-automatique, ou sur chantier.

Choix d'un poste de soudage

Ce choix dépend d'un certain nombre de critères qui peuvent être résumés ainsi :

La tension à vide : cette dernière détermine la capacité du poste à amorcer les électrodes.

Une électrode dont la tension d'amorçage sera de 65 volts par exemple ne pourra être utilisée avec un poste dont la tension à vide n'est que de 60 volts.

- L'intensité de soudage l'intensité que peut fournir un poste dépend de sa puissance ; elle est liée à la tension d'arc qui dépend elle-même du diamètre et du type d'enrobage des électrodes que l'on veut utiliser.
- Le régime d'utilisation de l'appareil,
- Son prix de revient.

Notons que la norme NFA 85-011 donne les critères auxquels doivent répondre les postes de soudage ; elle insiste particulièrement sur la définition des intensités de soudage et sur les facteurs de marche normalisés.

Qu'est ce que le facteur de marche ?

Un poste de soudage débite 200 Ampères à 60% multi horaire s'il peut effectivement fournir 200 Ampères, 24 heures sur 24 heures, à raison d'un cycle de soudage déterminé dans la norme NFA 85-011 :3 minutes de soudage toutes les 5 minutes (ce qui correspond à peu près à 20 électrodes à l'heures).

4.12.3 Les électrodes

Généralités

L'électrode métallique utilisée en soudage à l'arc électrique sert à la fois d'amenée de courant et de métal d'apport. Les électrodes nues, c'est à dire simplement constituées par une baguette de métal ne sont pratiquement plus employées et nous n'en parlerons pas ;en effet avec es électrodes, il est très difficile d'amorcer et de maintenir un arc correct, de plus, le métal s'oxyde et se niture lors du soudage en présence d'air car il n'y a pas de protection.

Les électrodes enrobées sont constituées par :

- Une âme métallique de la nuance voisine ou correspondante au métal à souder.
- Une gaine entourant l'âme, constituée de produits divers destinés à améliorer la qualité de la soudure et appelée : enrobage. Une extrémité de l'électrode est dénudée afin de permettre le passage du courant électrique après fixation dans la porte électrode.

Étude de l'enrobage des électrodes

Rôle de l'enrobage

- **Électrique** Il facilite l'amorçage de l'arc en favorisant l'ionisation. Il stabilise l'arc et permet l'emploi facile du courant alternatif.
- **Mécanique** Il dirige l'arc grâce au cratère d'extrémité. Il permet également une conduite correcte du bain de fusion. Il modifie la tension superficielle du métal fondu et contribue à l'obtention de cordons de formes variées. Il faut signaler que l'intensité du courant a également une action sur la forme du dépôt. Une faible intensité tend à donner un dépôt convexe, une forte intensité un dépôt concave.

- **Métallurgique** Ce rôle est le plus important, l'enrobage protège le métal porté à haute température de l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air. Il forme une scorie plus légère que le métal (laitier) qui joue un rôle d'affinage du bain de fusion en éliminant les impuretés. Le laitier forme à la surface du cordon une couverture qui ralentit son refroidissement et diminue ainsi le durcissement par effet de trempe. Enfin, l'enrobage permet l'incorporation au métal déposé d'éléments destinés à l'améliorer et quelquefois intervient dans le poids de métal déposé. C'est ainsi qu'à partir d'une âme en acier Martin doux, on peut déposer un acier à 13% manganèse ou acier inoxydable.

Épaisseurs des enrobages

Les épaisseurs des enrobages sont classées en 4 catégories en fonction du rapport s/S ; s étant la section de l'enrobage et S la section de l'âme.

- Enrobage mince ou pelliculaire = $s/S \leq 0,25$
- Enrobage semi-épais = $0,25 < s/S \leq 0,5$.
- Enrobage épais = $0,5 < s/S \leq 1$.
- Enrobage très épais = $s/S > 1$.

Remarques

- a) Pour une même composition d'enrobage, la qualité du métal déposé est d'autant meilleure que l'enrobage est plus épais.
- b) Si l'enrobage disparaît en cours de soudage, on dit que l'enrobage est volatil ou semi-volatil.
- c) En soudage en verticale descendante, il sera préférable d'utiliser des électrodes à enrobage mince ou semi-épais.

Défauts des enrobages

L'enrobage peut être de mauvaise qualité, ce qui est rare à la livraison, mais ce dernier peut être détérioré par suite de manipulations sans précaution des paquets ou du stockage dans les milieux humides. L'enrobage peut être mal centré (figure 66), ce qui entraîne des difficultés encours de soudage et l'hétérogénéité du métal déposé.

Différents types d'enrobage

a) Enrobages organiques

Ils sont composés entièrement de matière à base de carbone et de cellulose. Ils ne sont pratiquement plus utilisés.

b) Enrobages semi-organiques du type " rutile "

Ils sont à base de cellulose et de produits minéraux (sels, métalliques, oxyde de titane).

Ces enrobages donnent un arc stable, une fusion rapide, et les électrodes présentent une bonne maniabilité.

Ils s'emploient avec n'importe quel courant et sont indifférents à la polarité.

Fortement chargés en cellulose, on les nomme " enrobages cellulosiques", les électrodes correspondants conviennent particulièrement en soudage vertical descendant sur pipe-line.

c) Enrobages basiques

Ce sont des enrobages minéraux contenant essentiellement du carbonate de chaux et du spathfluor. Ils sont très hygroscopiques et il faut les conserver à l'abri de l'humidité dans un local chauffé (court-circuiter l'électrode avec la pièce pendant cinq secondes environ pour la chauffer si on a des doutes sur l'humidité delà baguette).

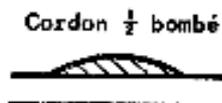
Une électrode humide donne un cordon de soudure poreux e l'utilisation d'une étuve est fortement recommandée (1 heure à 2 heures à 250°C environ).

ELECTRODES à ENROBAGE.



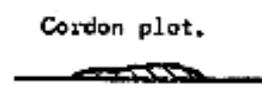
Cordon bombé

Enrobage mince
Soudure à plat.



Cordon $\frac{1}{2}$ bombé

Enrobage semi-épais
Soudure à plat.



Cordon plat.

Enrobage épais.
Soudure à plat.



Enrobage mince
Soudure d'angle.



Enrobage semi-épais
Soudure d'angle.

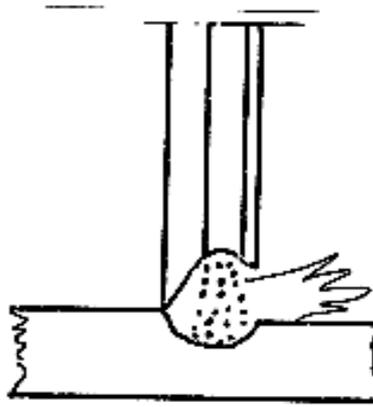


Enrobage épais.
Soudure d'angle.

DEFAUTS des ENROBAGES



Enrobage mal centré.



Fusion d'une électrode mal centrée.



Enrobage en pointe

fig.157

d) Enrobages acides

Ils sont essentiellement composés d'oxyde de fer et de silice (SiO_2) qui forme avec les oxydes métalliques les silicates. Le rutile ou oxyde de titane (TiO_2) rentre dans la composition de la plupart des enrobages acides à cause de son pouvoir désoxydant et dénitreur.

Ce type d'enrobage est de plus en plus remplacé par les enrobages rutilés et "rutile-poudre de fer". Il existe d'autres types d'enrobage.

Nous donnons en résumé dans le tableau n°1 ci-joint. Notons ici le cas particulier des électrodes à "enrobage à poudre de fer", dites encore électrodes à haut rendement, dont l'âme est en acier ordinaire et dont le rapport du poids du métal déposé au poids de l'âme peut atteindre 200% (rendement).

Pour ces électrodes, l'enrobage contient de la poudre de fer et est donc conducteur, il s'ensuit :

- Un amorçage plus facile,
- Une intensité de soudage augmentée,
- Une vitesse de soudage plus grande,
- Des risques d'inclusion de laitier très réduits.

On peut aussi classer les enrobages d'après leur comportement au cours du soudage ; on distingue :

- Les enrobages fusibles : ont un bas point de fusion (1300°C à 1400°C), inférieur au point de fusion de l'acier.
- Les enrobages réfractaires : ont un point de fusion élevé (1500 à 1550°C) supérieur à celui des aciers.
- Les enrobages semi-volatiles : Les produits qui le constituent brûlent et se volatilisent au cours du soudage.
- Les enrobages à apport de métal : leur caractère dominant est alors l'apport métallique.

Rendement de l'électrode

C'est le poids du métal déposé en % du poids de l'âme de la baguette. La différence entre le poids de métal utilisé et celui du métal déposé correspond à la perte de métal qui vient :

- Du bout de l'électrode non utilisable (mégot)
- Des éclaboussures de métal au voisinage du cordon, sous forme de gouttelettes en fusion ou même en vapeur du fait de la haute température.
- Des particules de métal restant incorporées au laitier (très peu).

Le rendement des électrodes oscille entre 70 et 75% dans le cas des électrodes à enrobage à poudre de fer, que nous venons de voir ci-dessus, le rendement peut atteindre 200%.

Choix des électrodes

Le choix des électrodes est conditionné par :

- La nature et les caractéristiques du métal à souder.
- Les facilités d'exécution du travail.
- Les propriétés d'enrobages.
- Les facteurs d'ordre économique.

Une fois la nature de l'acier fixée, le soudeur se trouve en présence d'une grande variété d'électrodes qui se distinguent par de nombreux facteurs dont les principaux peuvent être résumés ainsi :

- Nature du courant (alternatif ou continu).
- Postes dont on dispose (tension à vide).
- Position de soudage.
- Intensité maximum et minimum dont on peut disposer en atelier ou sur chantier.
- Faciliter d'amorçage.
- Pénétration.
- Forme du cordon
- Facilité d'enlèvement du laitier.
- Caractéristiques du métal déposé :
 - Charge de rupture : R en hbar
 - Allongement : A en %
 - Résilience: KCU ou KCV en da J/cm^2
 - Dureté : HV ou HB.
 - Capacité de pliage.
 - Limite élastique : E en hbar.

Intensité du courant adaptée aux électrodes

Cette intensité dépend :

- Du type de l'électrode (mesurés sur l'âme).
- Du type d'enrobage.
- De la nature du travail à exécuter (diamètre de la pièce, écartement des bords, position).

Une électrode peut s'utiliser dans une plage d'intensités comprise entre un minimum et un maximum.

Au dessous de l'intensité minimum, l'arc est instable. Au dessus de l'intensité maximum, l'électrode rougit, les projections deviennent plus abondantes. Il faut retenir qu'il faut à peu près, en passe de pénétration, 20 à 30 Ampères par millimètre de diamètre de la baguette, et 30 à 40 Ampères pour les passes suivantes.

Normalisation et classification des électrodes

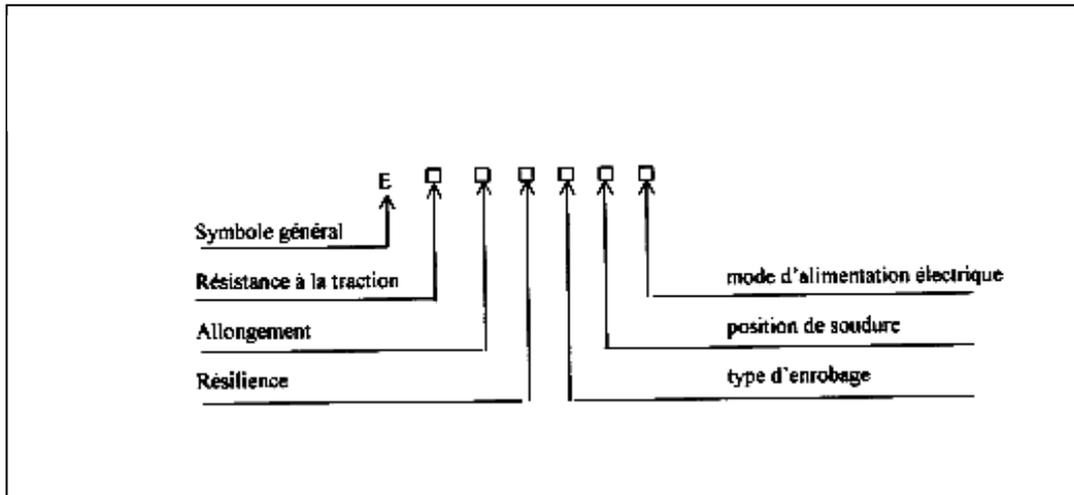
Il existe une grande variété d'électrodes enrobées que l'on peut classer comme suit :

- Pour travaux courants,
- Pour aciers spéciaux,
- Pour rechargement,
- Pour la fonte,
- Pour métaux et alliages non ferreux.

La norme A 81-300 s'applique aux " électrodes métalliques enrobées pour soudage manuel électrique à l'arc des aciers non alliés ou faiblement alliés". C'est le titre de cette norme autrement dit, elle s'applique aux travaux courants. Nous allons donner ci-dessous quelques extraits de cette norme. Nous allons donner ci-dessous quelques extraits de cette norme.

Symbolisation

Une électrode est maintenant définie par un groupe de lettres et de chiffres comme indiqué ci-après. La lettre E placée en tête de la symbolisation a pour objet de distinguer une électrode enrobée de soudage à l'arc de tout autre produit d'apport. Les caractéristiques mécaniques du métal déposé sont définies par les 3 premiers chiffres qui suivent la lettre E. Ces chiffres ont la signification suivante :



Symbole	Résistance minimale A la traction		Allongement Minimal	Résilience maximale	
	En Hbar	En kg/mm'		En da J/cm ²	
0	-	-	-	-	-
1	40,20	41	14	4,90	5
2	43,15	44	18	6,86	7
3	47,07	48	22	8,82	9
4	50,99	52	26	10,78	11
5	54,92	56	30	12,74	13
6	58,84	60	-	-	-

Nota :

- a) L'allongement est déterminé à partir d'une longueur initiale entre repères L_0 liée à la section initiale de la partie calibrée de l'éprouvette S_0 par la relation : $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$
- b) La résilience est déterminée à partir d'une éprouvette avec entaille en U dans les conditions prévues par la norme NFA 03-106.

Le cinquième symbole est une lettre caractérisant l'enrobage de la manière suivante :

- O : oxyde,
- B : basique,
- R : rutile,
- A : acide,
- C : cellulosique,
- V .enrobage d'autres types.

Le sixième symbole est un chiffre qui indique la position de soudage comme il est indiqué ci-dessous :

- 1 : toutes positions,
- 2 : toutes positions excepté la position verticale pour la méthode descendante,
- 3 : à plat, en gouttière, en angle plat,
- 4 : à plat, en gouttière.

Enfin, le dernier le symbole est un chiffre qui indique la nature du courant de soudage

Nota : Le chiffre 0 est en principe réservé aux électrodes utilisés exclusivement en courant continu.

Symbole	Courant continu Polarité recommandée	Courant alternatif Tension à vide nominale
0	H-	
1	Non spécifiée	50 volts 50 volts 50 volts
2	-	
3	+	
4	Non spécifiée	70 volts 70 volts 70 volts
5	-	
6		
7	Non spécifiée	90 volts 90 volts 90 volts
8	-	
9	+	

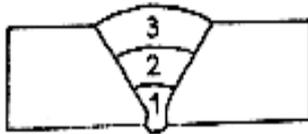
Diamètres	1	1,5	2-2,5	3,2- 4 – 5	-- 6 – 8
Longueur en mm	150	225	350	450	

INTENSITES DE SOUDAGE, en AMPERES, en FONCTION du DIAMETRE des
ELECTRODES et de L'EPAISSEUR des ENROBAGES.

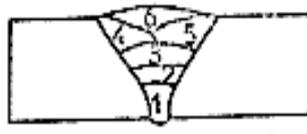
Ø en mm	ENROBAGE MINCE			ENROBAGE ½ EPAIS			ENROBAGE EPAIS		
	Mini	Maxi	Moyen	Mini	Maxi	Moyen	Mini	Maxi	Moyen
2	30	50	40	35	55	45	40	70	55
2,5	50	75	60	60	85	70	60	100	80
3,25	75	115	95	85	125	105	90	140	115
4	110	150	130	120	160	140	130	170	150
5	140	190	165	150	210	180	160	240	200
6	170	240	200	190	280	235	200	320	260
8	210	315	260	250	375	310	250	430	340

EXECUTION ET ASPECT DES SOUDURES

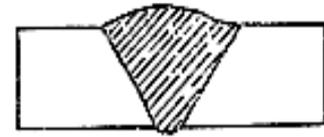
Flamme



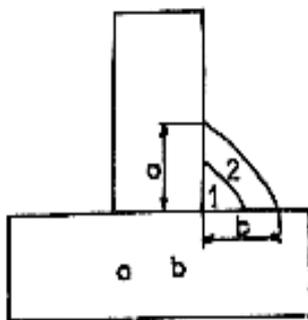
Passes larges à plat.



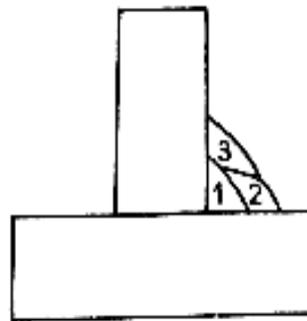
Passes étroites à plat.



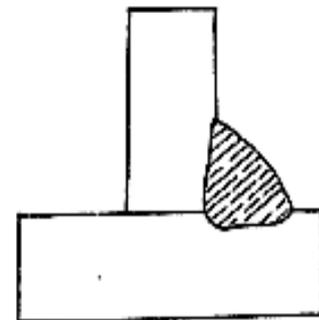
Aspect en coupe.



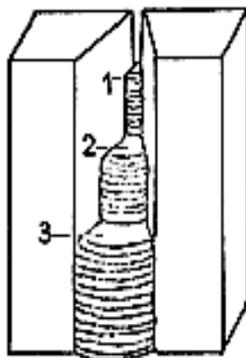
Passes larges.



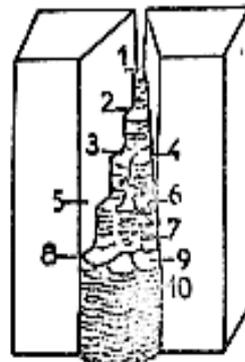
Passes étroites.



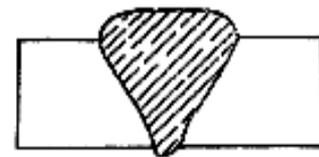
Aspect en coupe.



Passes larges.



Passes étroites.

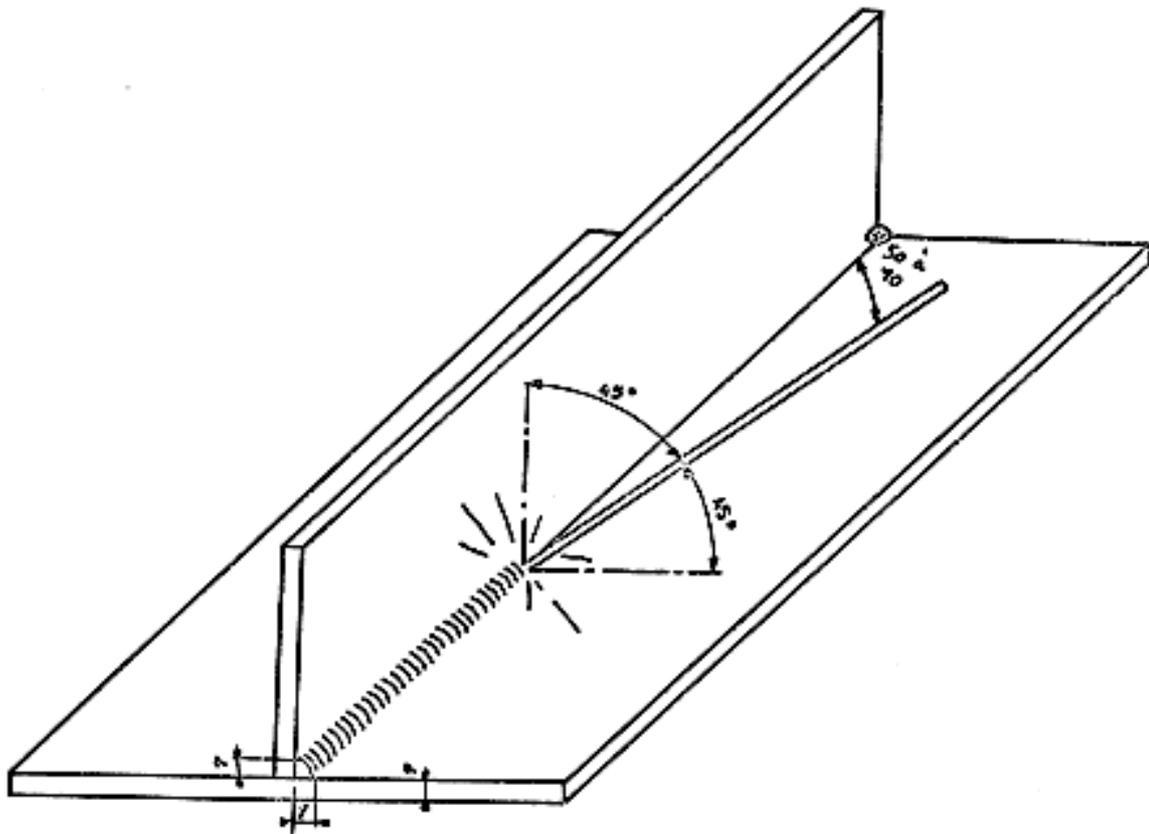


Aspect en coupe.

SOUDEURES MONTANTE ET PLAFOND.

SOUDURE A L'ARC

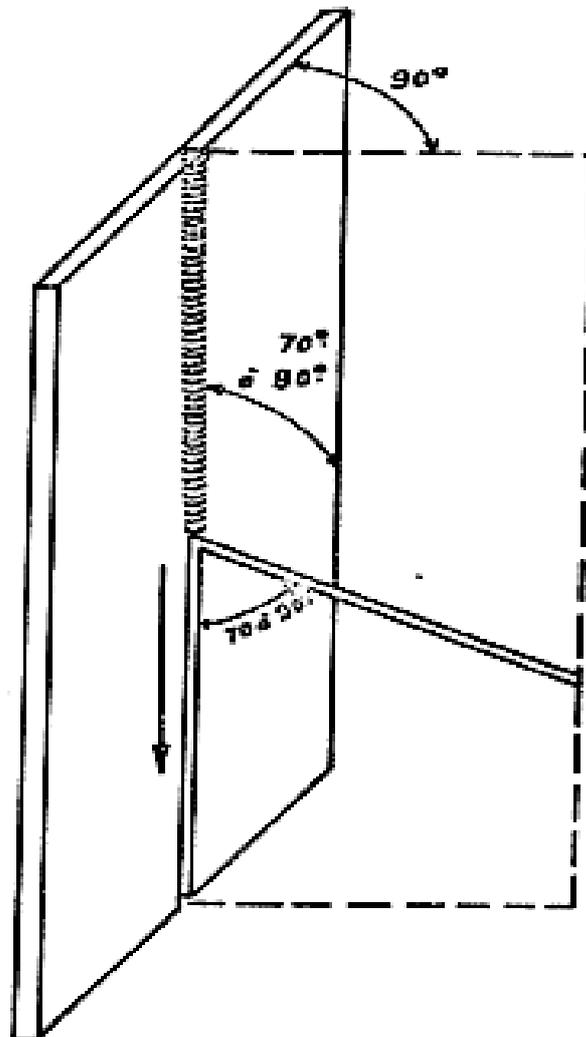
SOUDURE EN ANGLE EXTERIEUR



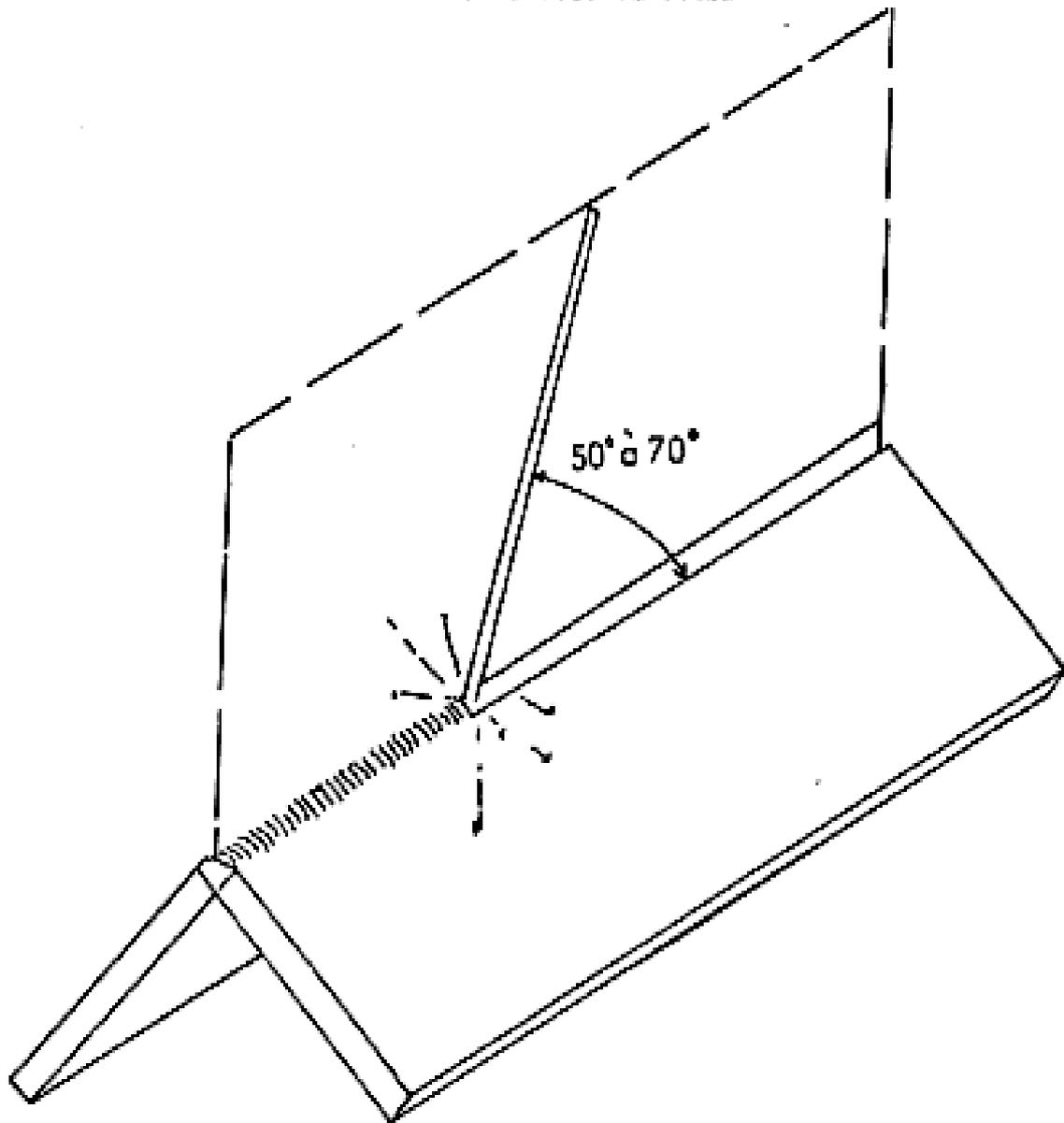
Electrode de ϕ 3,25 en première passe et en ϕ 4 en 2ème passe.
Pointer correctement la pièce.
Exécuter 2 passes : 1 étroite, 1 large intéressant uniformément
les 2 tôles.
Veiller à la position de l'électrode.

SOUDEUR BOUT A BOUT DESCENDANTE

Intensité 10 à 15 % supérieure
à la normale.



SOUDURE D'ANGLE EXTERIEUR



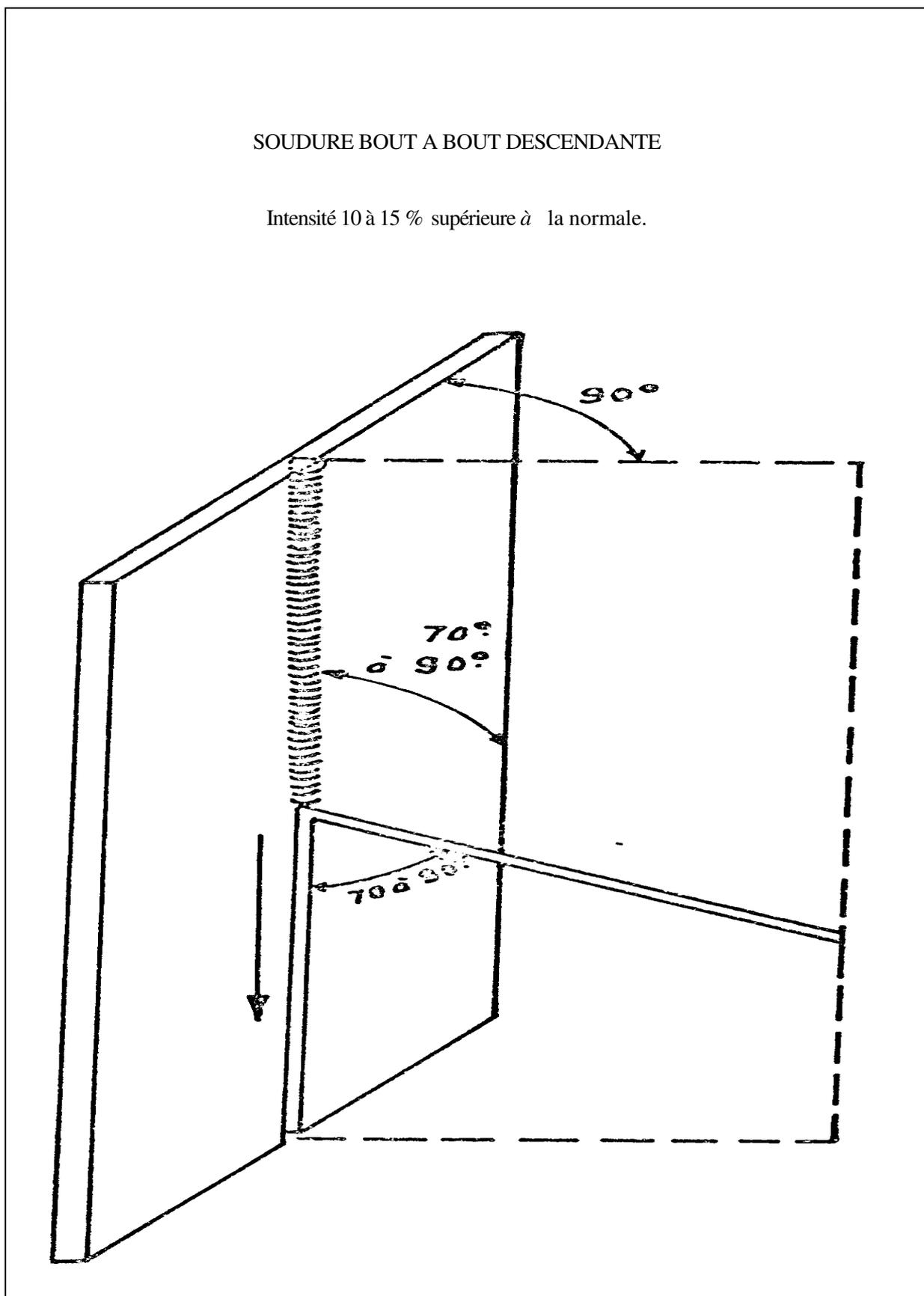
Laissier un intervalle de 1 m/m environ.

Veiller au pointage des tôles.

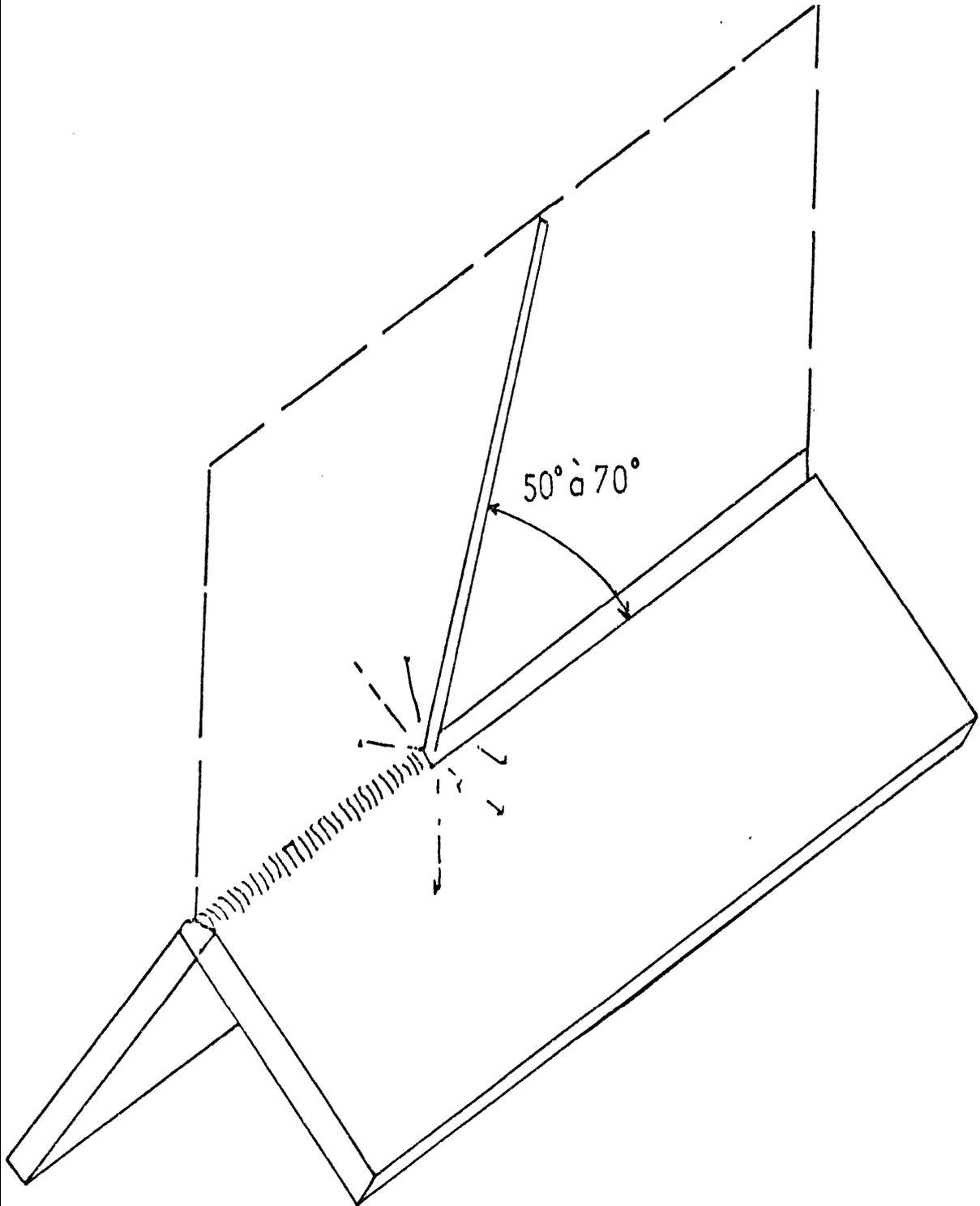
Le cordon de soudure doit intéresser uniformément les deux tôles.

SOUDURE BOUT A BOUT DESCENDANTE

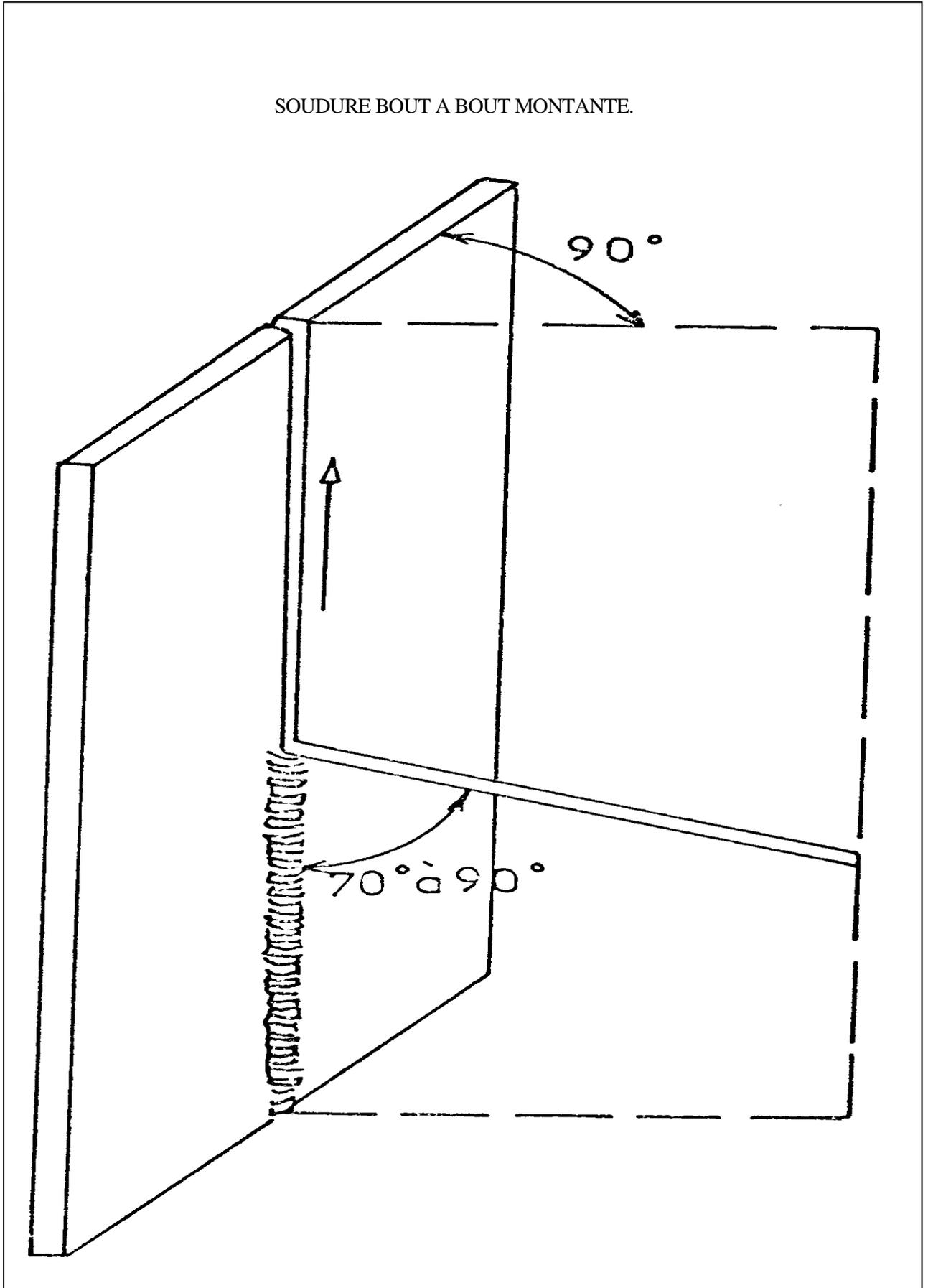
Intensité 10 à 15 % supérieure à la normale.



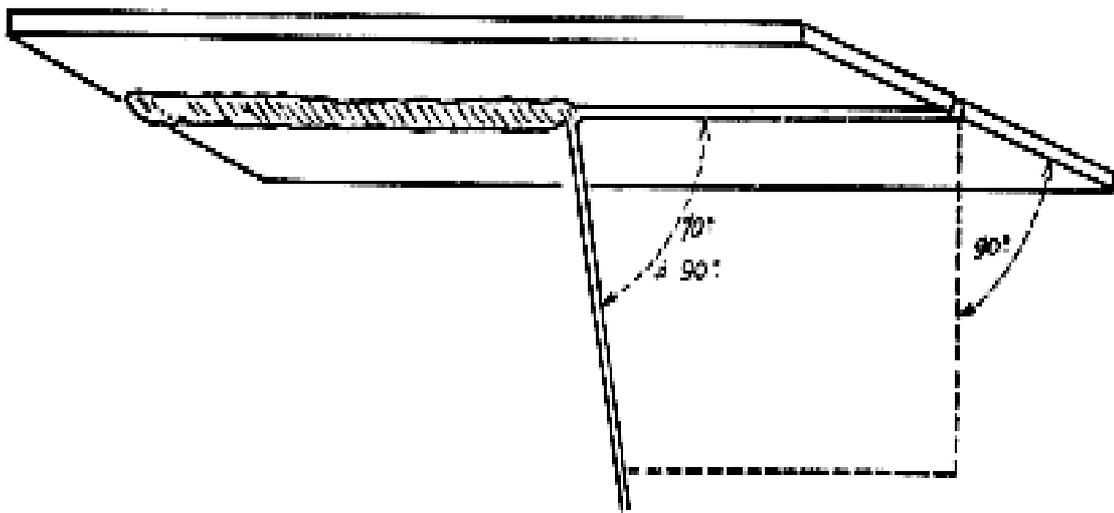
SOUDURE D'ANGLE EXTERIEUR



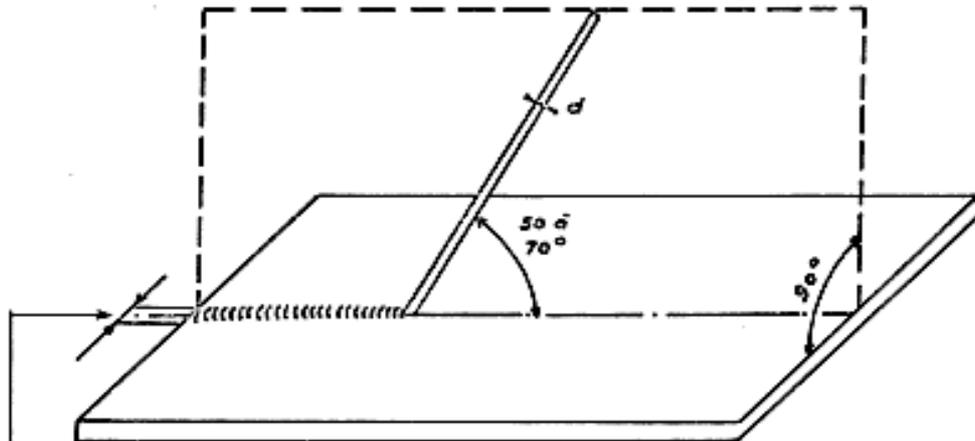
SOUDURE BOUT A BOUT MONTANTE.



SOUDURE AU PLAFOND

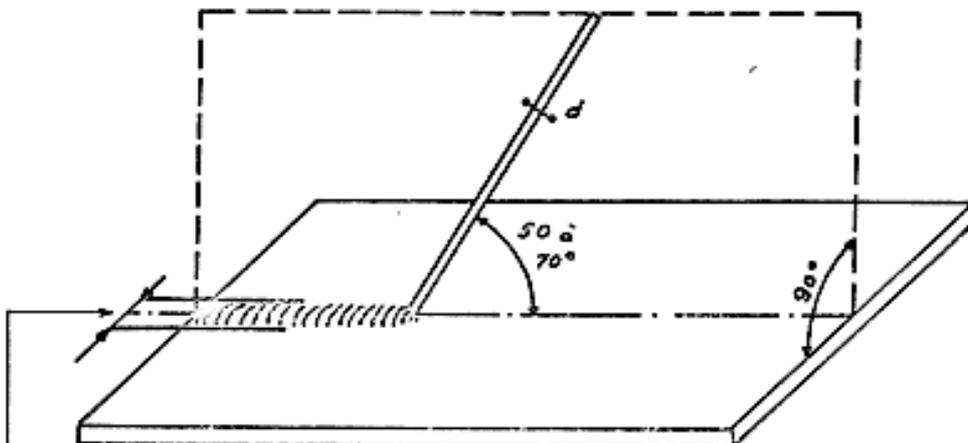


PASSE ETROITE



Balancement de l'électrode : 1 à 2 fois le diamètre de l'électrode.

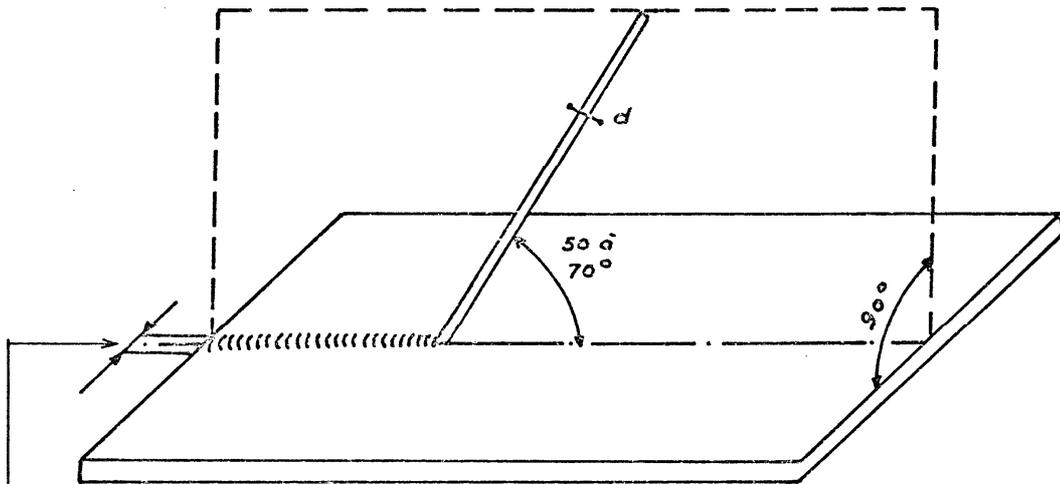
PASSE LARGE



Balancement de l'électrode : 3 à 4 fois son diamètre.

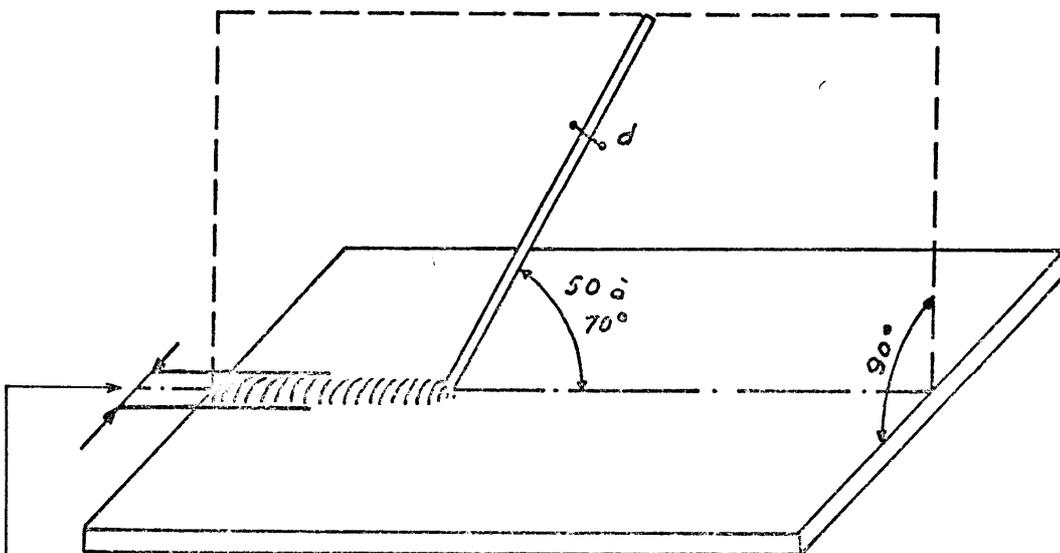
Ex : tôle de 9 m/n et β électrode : 3,25 pour première passe et β 4 pour passes suivantes.

Veiller à la bonne tenue de l'électrode.



Balancement de l'électrode : 1 a 2 fois le diamètre de l'électrode PASSE ETROITE

PASSE LARGE

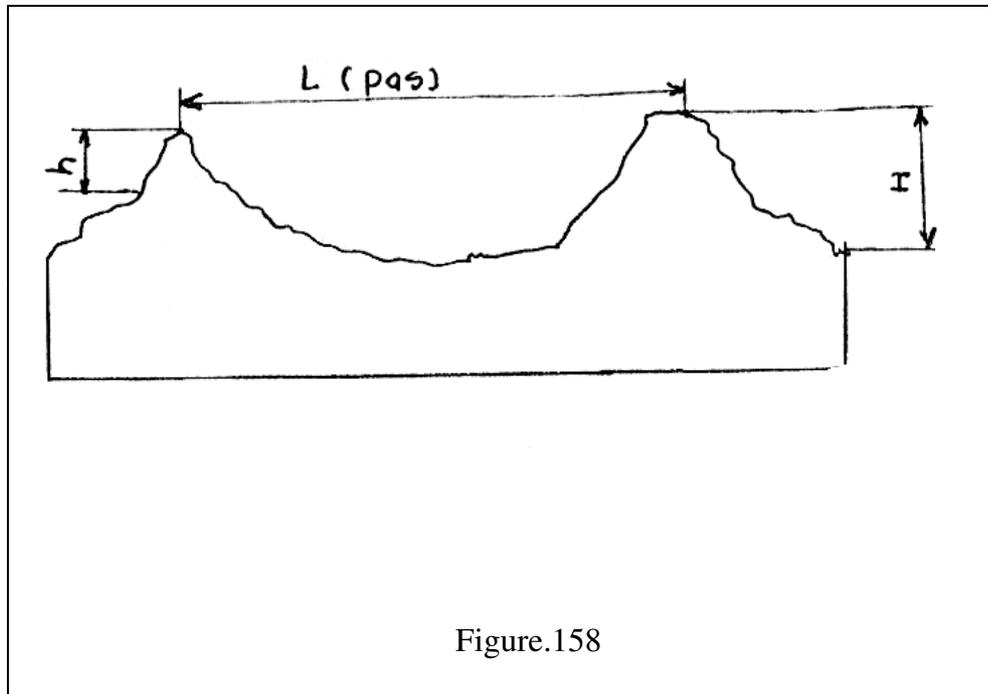


5. ETATS DE SURFACE

5.1. 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.158), 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.

5.2. 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. 159).

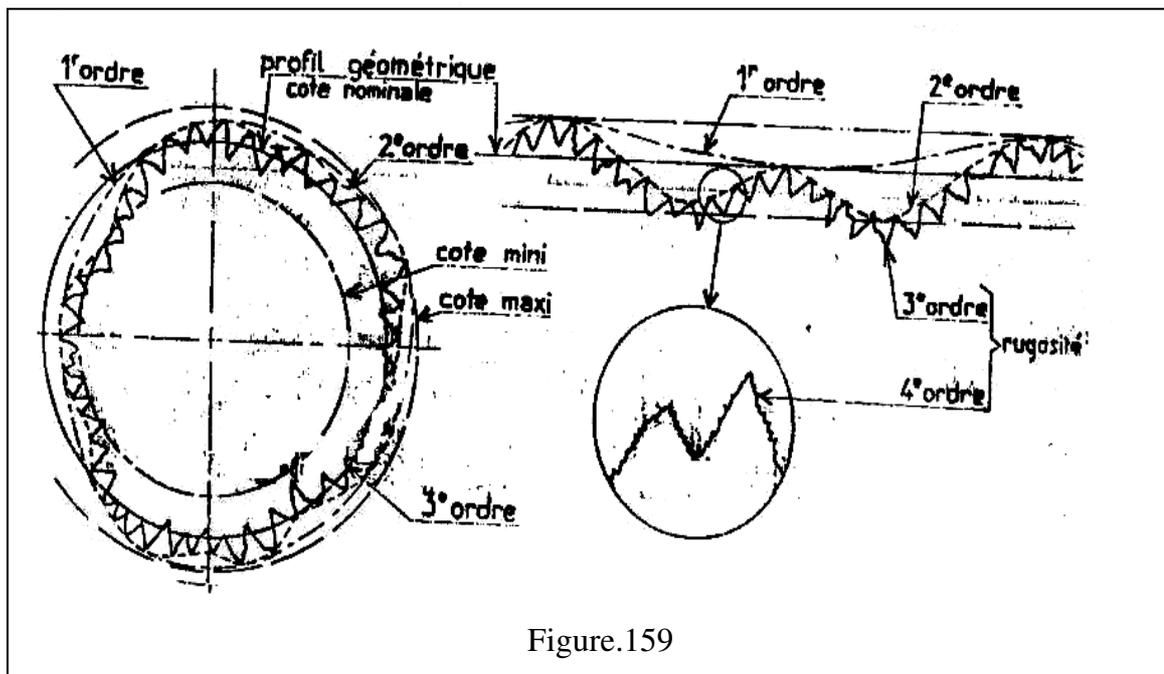


Figure.159

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 vibrations hautes fréquences.

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

5.3. 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.160)

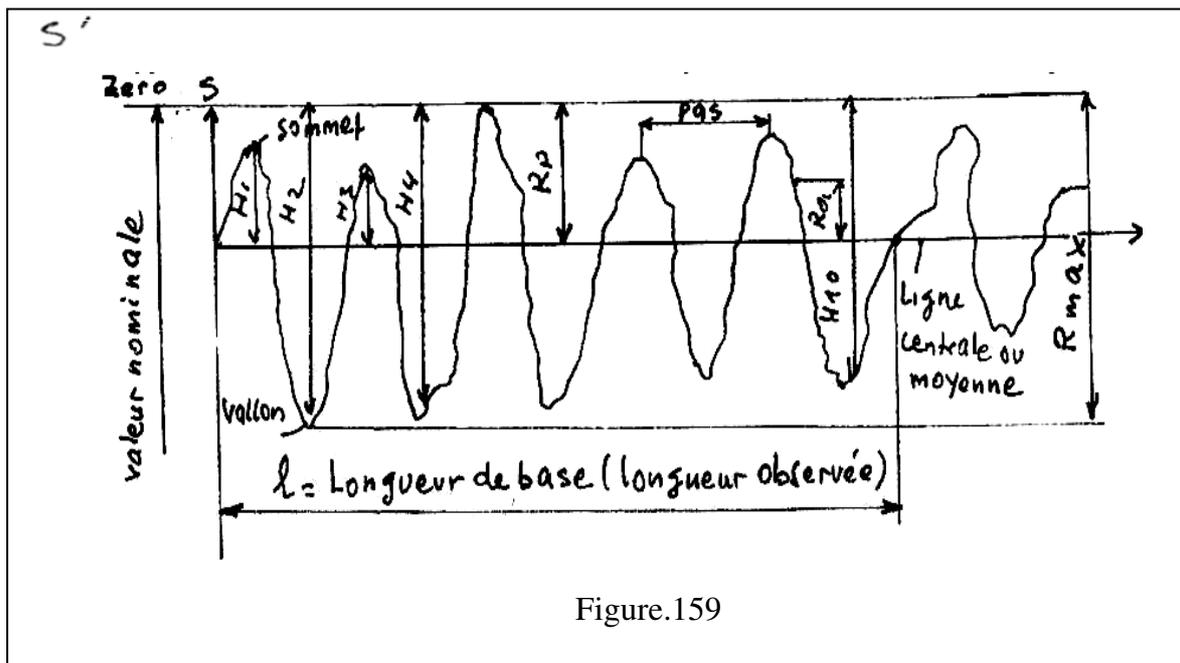


Figure.159

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.

5.4. 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 :

$$R_m 300 \sqrt{\quad} \quad R_p 40 \sqrt{\quad} \quad R_a 1,6 \sqrt{\quad} \quad 1,6 \sqrt{\quad} \quad 0,08 \sqrt{\quad} \quad \text{Rodé}$$

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

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

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.160).

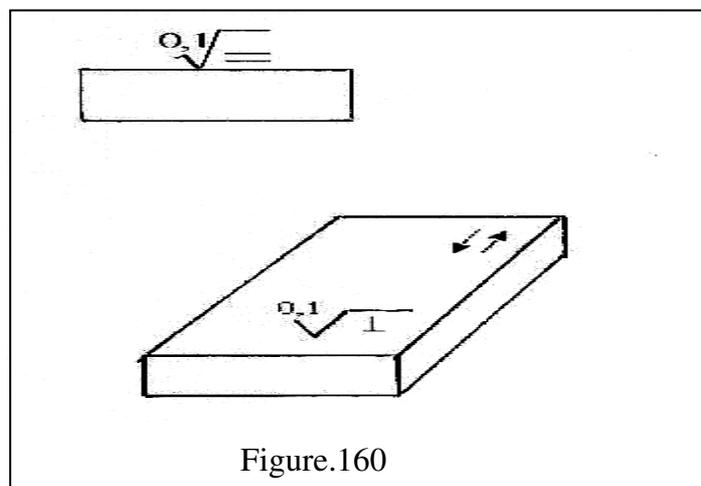


Figure.160

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

5.5. Les indices de façonnage

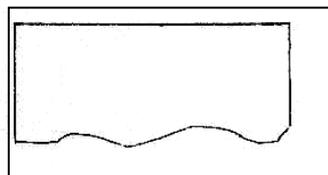
Dans ce paragraphe nous aborderons l'état géométrique des surfaces des pièces mécaniques. L'état de surface possède une grande influence sur les propriétés physiques et mécaniques des pièces, tels que frottement de glissement et de roulement., la résistance à l'usure, la résistance à l'écoulement des 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.

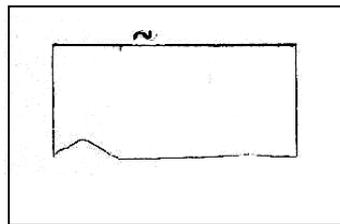
5.5.1. Surface sans surépaisseurs d'usinage

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



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

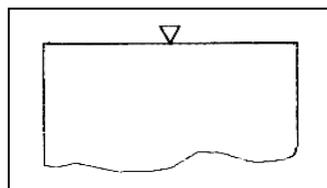
Ra = 100 à 200 microns.



5.5.2. Surfaces avec surépaisseurs d'usinage

Le symbole utilisé est un triangle équilatéral.

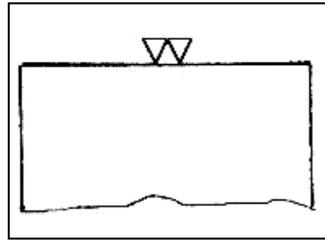
- Un seul triangle ∇ signifie que les surfaces sont utilisées comme surfaces de contact d'assemblage et doivent avoir un bon aspect, elles peuvent être obtenues par tournage, meulage, rabotage, perçage et grattage. Ra = 12,5 à 50 microns



- Deux triangles $\nabla\nabla$, les surfaces doivent être géométriquement très correctes. Elles sont utilisées surtout pour les faces d'assemblage fixes et précises. Un parachèvement tels

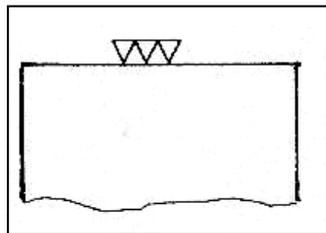
que le tournage de finition, le fraisage de face, le grattage, le brochage, la rectification et l'alésage, peut être nécessaire.

Ra = 1,6 à 6,3 microns.



- Trois triangles $\nabla\nabla\nabla$, 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.

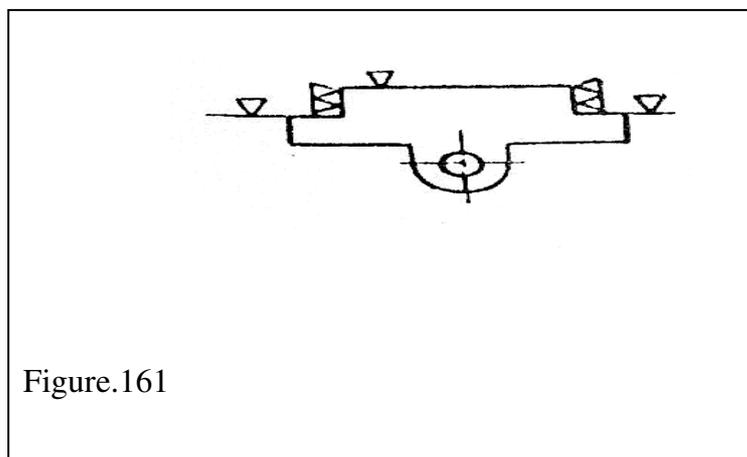
Ra = 0,05 à 0,8 microns.



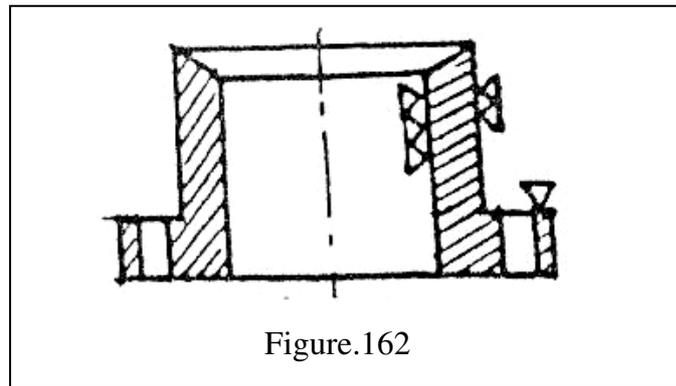
5.6. Mise en place des symboles sur le dessin

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

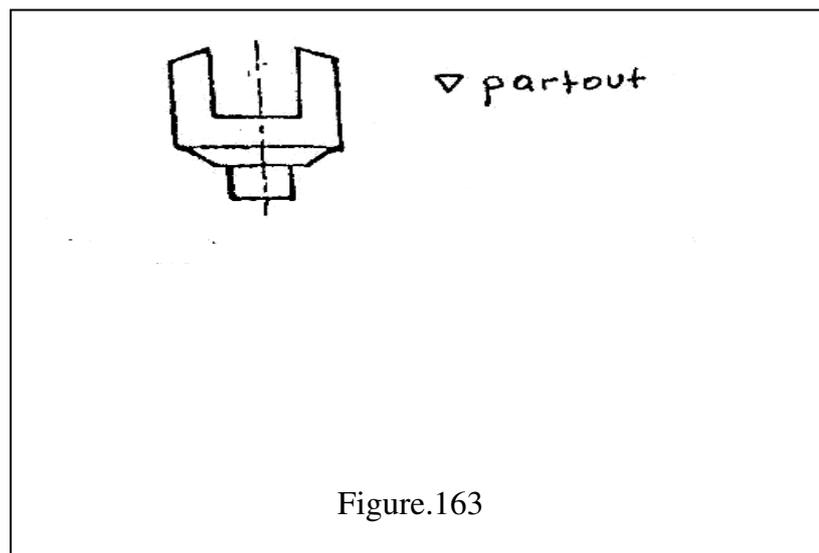
Pour une même surface, le symbole ne doit figurer qu'une seule fois quel que soit le nombre de vues. Si la pièce possède des surfaces symétriques les symboles sont placés sur chacune d'elles (fig. 161).



Le symbole n'est placé que sur une seule génératrice lorsqu'il s'agit des surfaces de révolution (fig. 162).



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. 163).



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. 164)

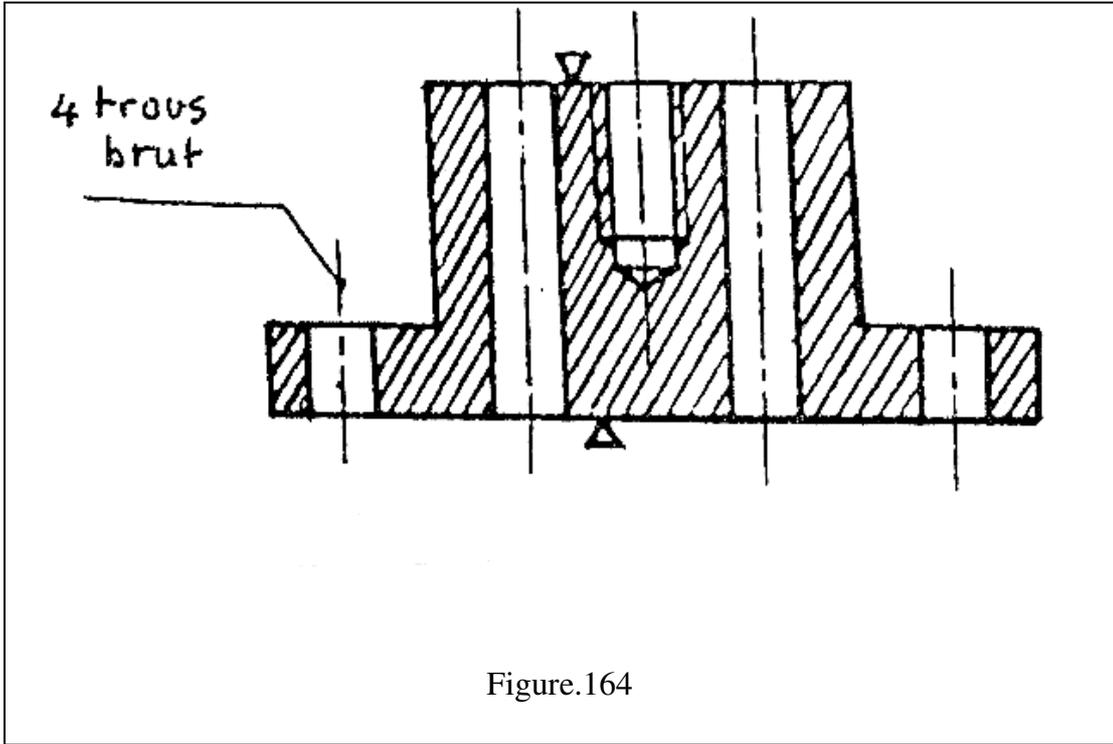


Figure.164

ÉTATS DE SURFACE

obtenus par les différents procédés d'usinage

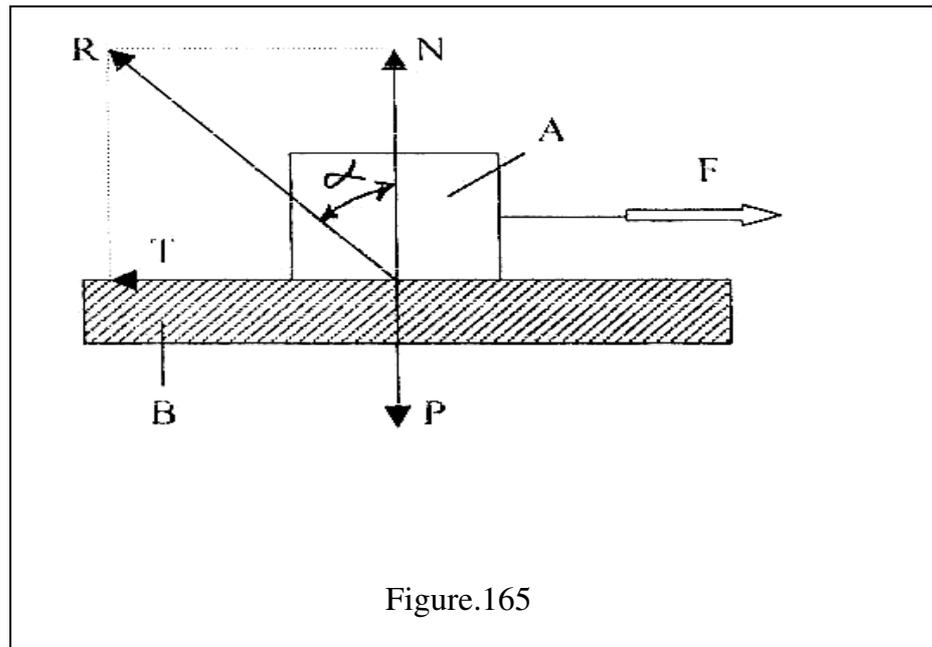
Signes de façonnage	▽▽▽					▽▽				▽	∞			
Valeur de Ra (en microns)	0,025	0,050	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100	200
Orycoupage														
Sciage														
Tournage (ébauche)														
Meulage														
Rabotage														
Perçage														
Fraisage de profil														
Tournage (finition)														
Fraisage de face														
Gratage														
Brochage														
Alésage à l'outil														
Alésage à l'alésoir														
Rectification ordinaire														
Fraisage de face (carbure)														
Taillage														
Tonnelage														
Galetage														
Tournage diamant														
Alésage diamant														
Rectification de précision														
Rodage à la pierre														
Polissage														
Superfinition														
Valeur de Ra (μ)	0,025	0,050	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100	200

← Contrôle possible par comparaison visuo-tactile

Valeur usuelle
 Valeurs possibles

6.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 appelé 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. 166).

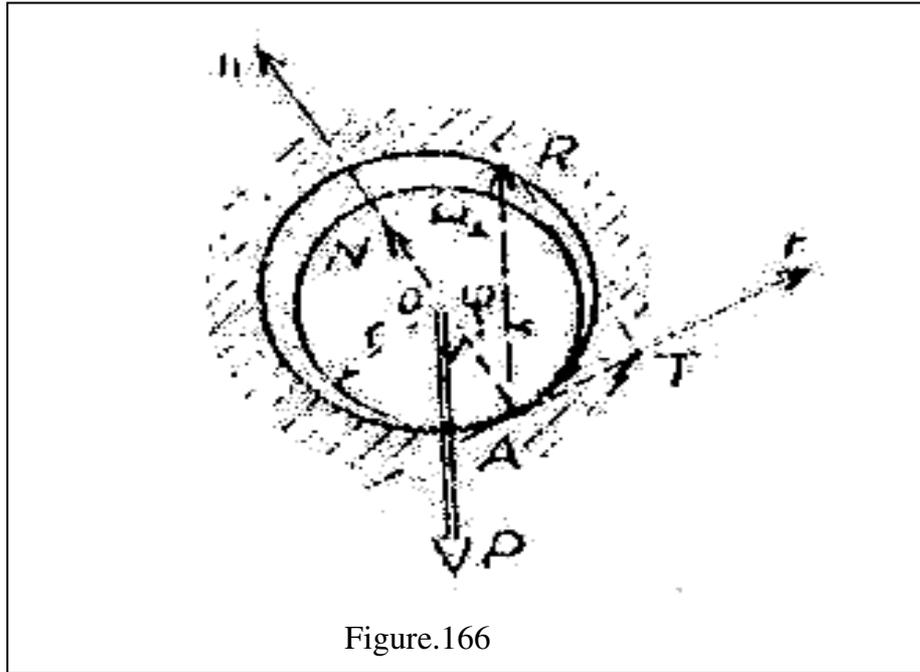


Figure.166

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**

6.1. 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 ou creuser ces aspérités (fig. 167).

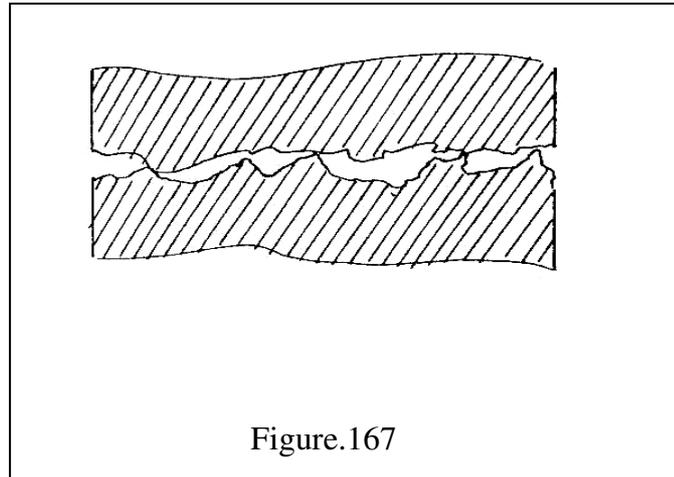


Figure.167

- 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. 168). 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

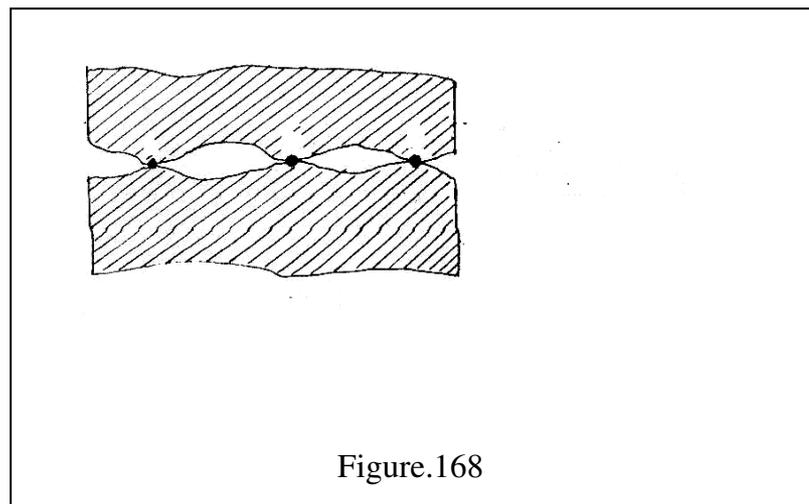


Figure.168

- 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.

6.1.1. 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 :

6.1.1.1. 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, sulfinitation 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 frottantes et leur dureté peuvent être améliorés par traitement de surface (cémentation, nitruration, sulfinitation, 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.).

6.1.1.2. 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'antifricion 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'additive extrême pression incorporée 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.

6.2. 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).

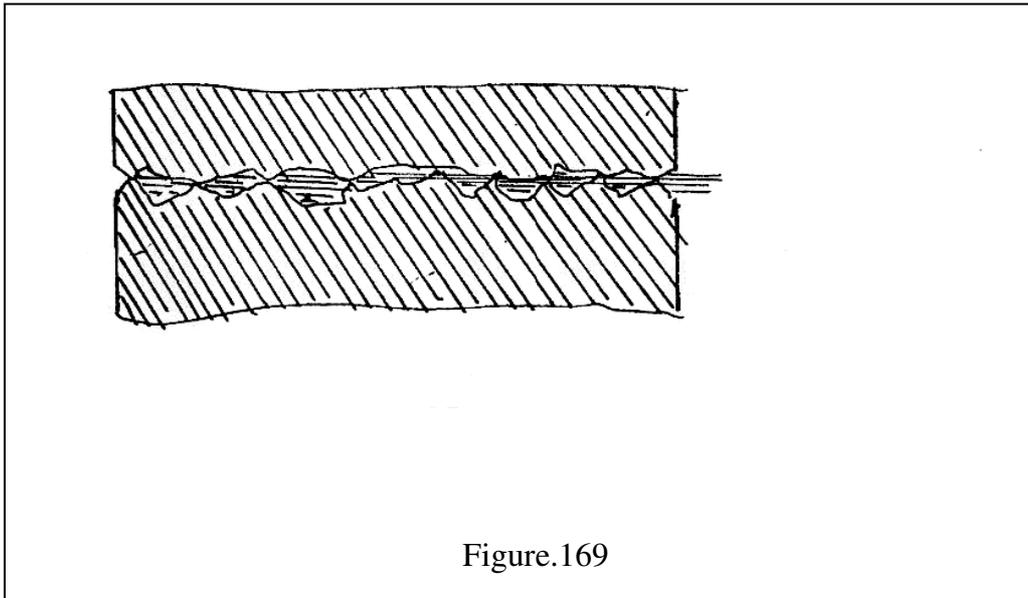
Pratiquement, seules les huiles et graisses d'origine minérale remplissent suffisamment ces conditions pour pouvoir être utilisées comme lubrifiants.

6.2.1. Modes d'action d'un lubrifiant

On distingue essentiellement deux régimes de lubrifiant :

6.2.1.1. 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. 169). La couche du lubrifiant est discontinue et le coefficient de frottement f est de l'ordre de 0,008: à 0,12.



6.2.1.2. 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.170), 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.

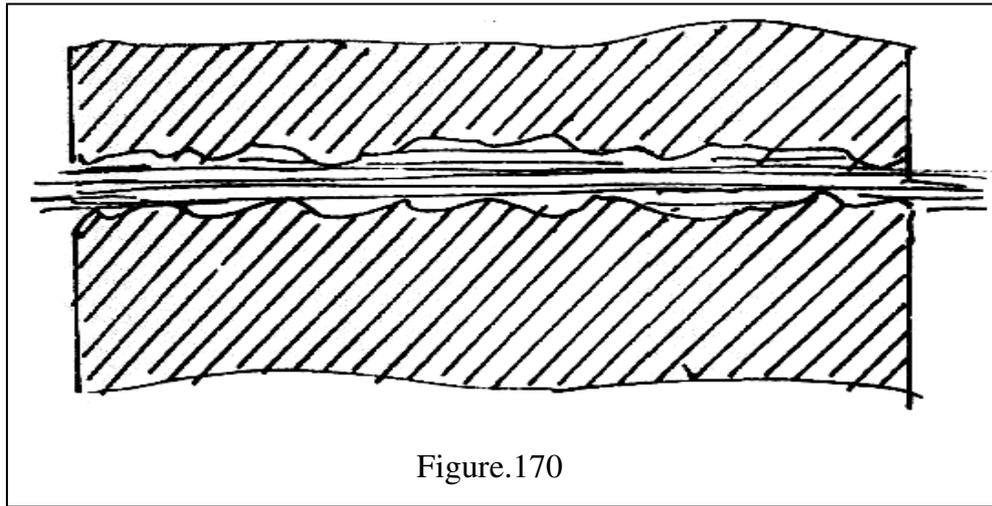


Figure.170

Le coefficient de frottement et l'épaisseur du filin 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.

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

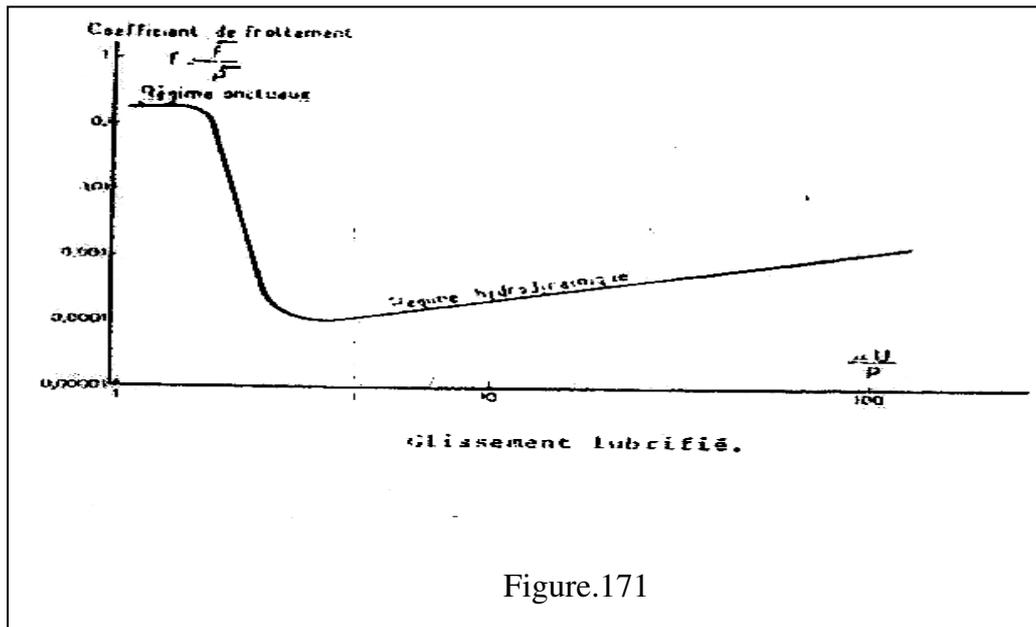


Figure.171

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.

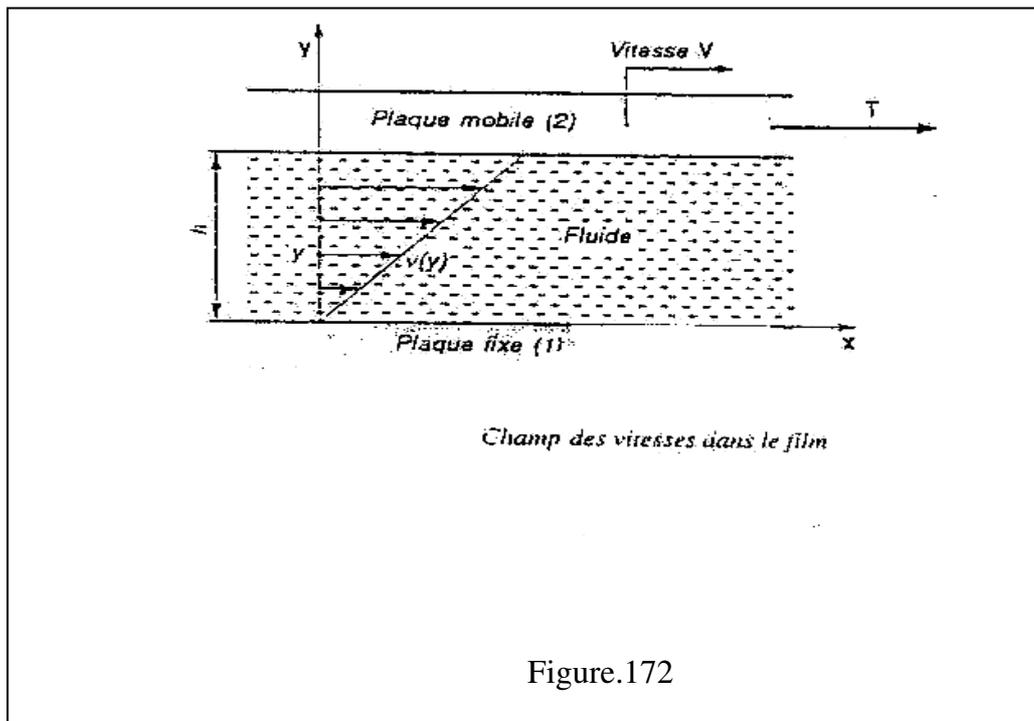
Quelque soit le phénomène mis en jeu, l'épaisseur minimale du film doit être plus grande que la hauteur des aspérités des surfaces, sinon on est en présence de lubrification

hydrodynamique où le film d'huile a une épaisseur relativement importante (6 à 8 μm lorsque les surfaces sont rectifiées).

6.2.2 Caractéristiques d'un lubrifiant

6.2.2.1 La viscosité

Si on considère deux plaques parallèles horizontales distantes de h (fig. 172)



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 :

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

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

Dans le système SI est exprimé 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.

6.2.2.2. 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. 173)

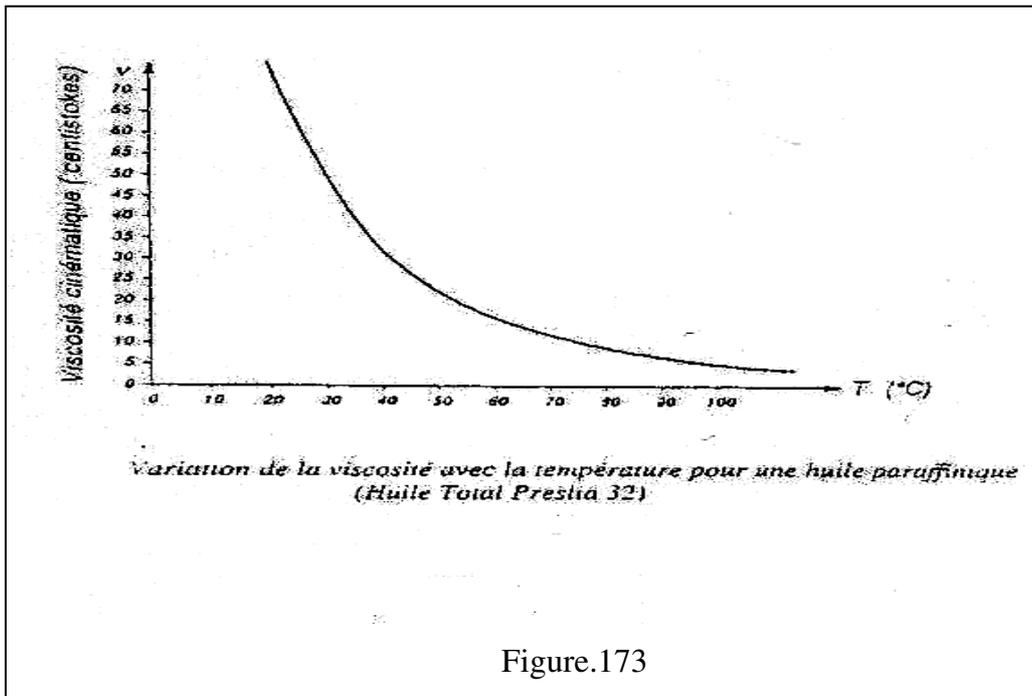


Figure.173

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

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

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.174) permet une conversion rapide d'unités et fournit la loi viscosité températures d'un certain nombre d'huiles normalisées.

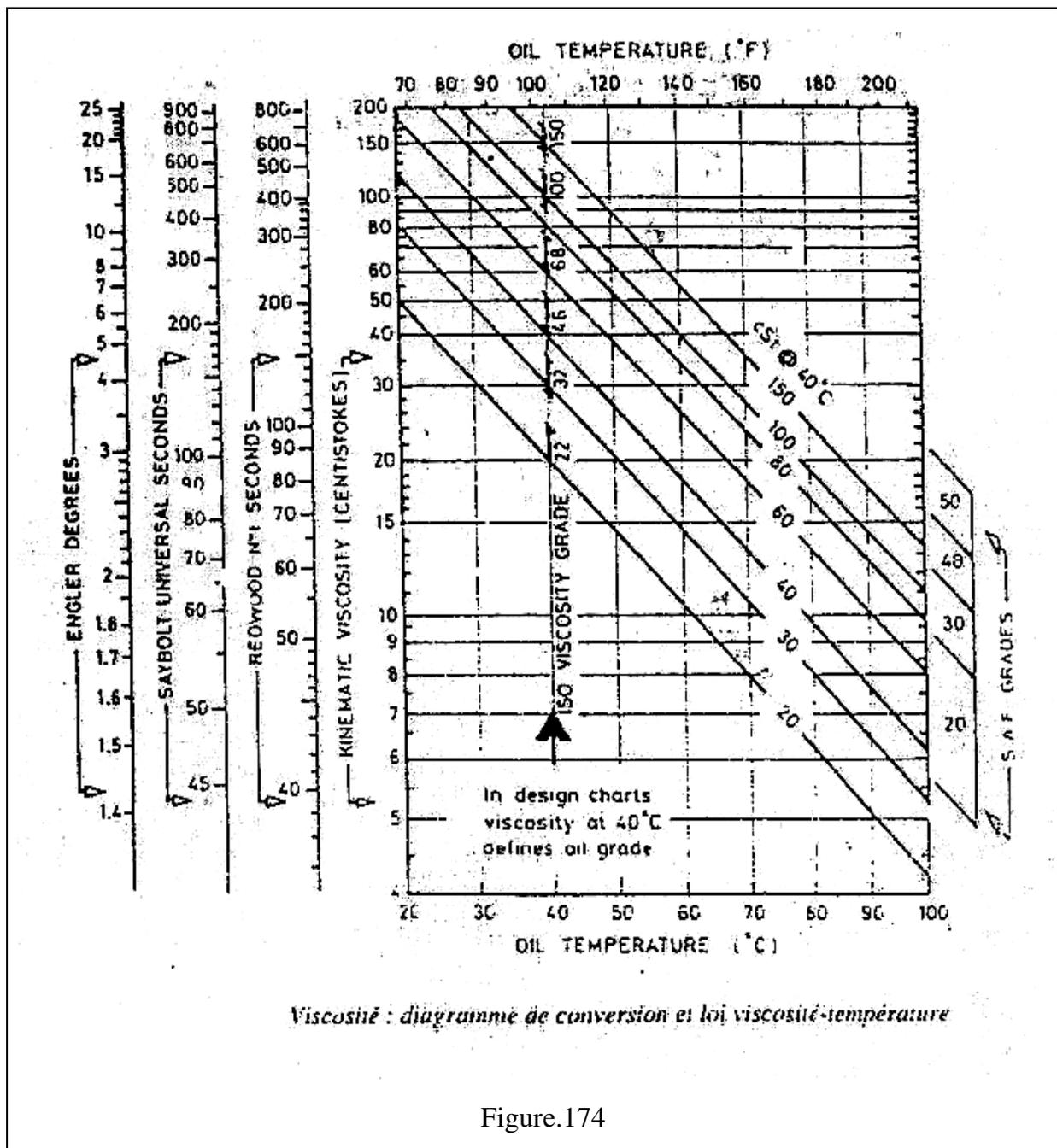


Figure.174

6.2.2.3. 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.

6.2.2.6. 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.

6.2.2.7. La résistance au froid

Une huile figée ou gelée peut empêcher toute lubrification.

6.2.2.8. Caractéristiques diverses

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

6.2.3. 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.175) fait suite à une zone de contraction, et inversement par la suite, la limite entre les zones étant sur la lime 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.

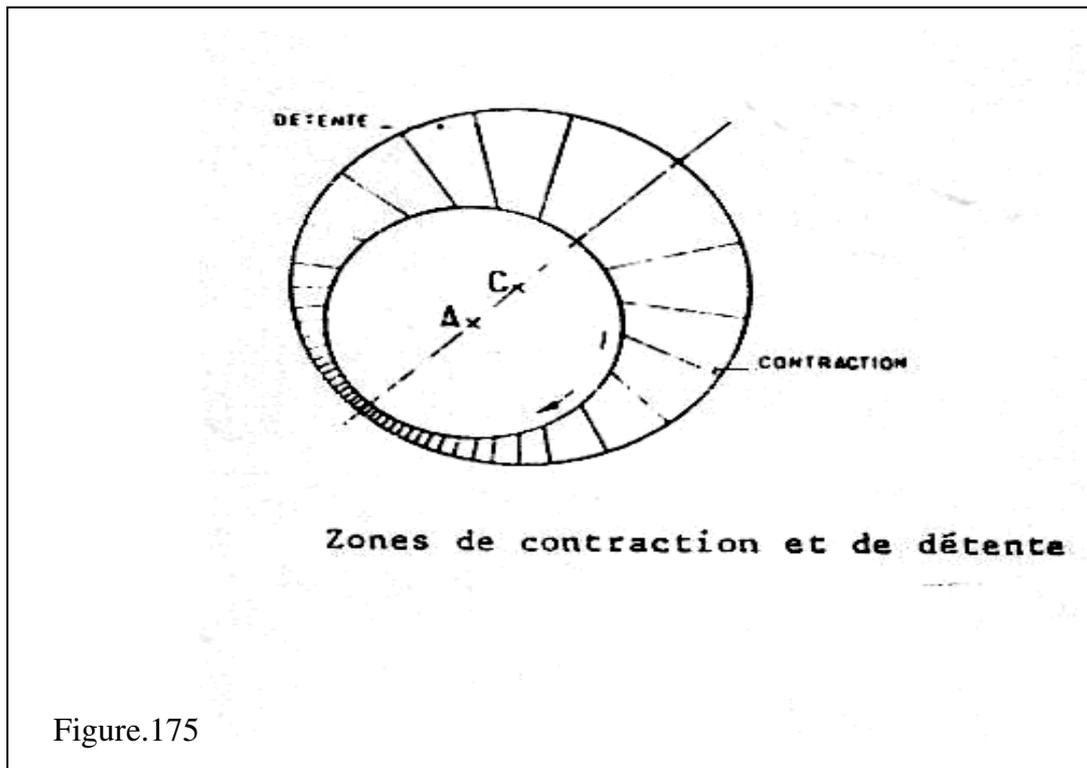


Figure.175

A l'arrêt ou au repos (fig..176a), 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.176 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.176c) 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.

6.2.2.4. L'oxydabilité

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

6.2.2.5. 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.

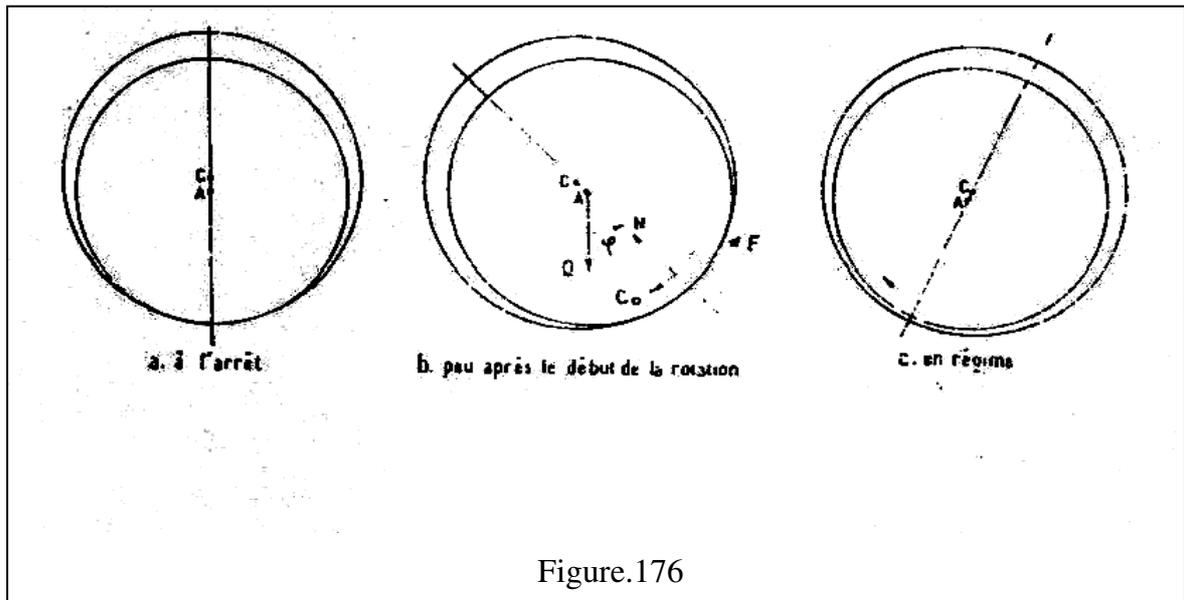


Figure.176

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

Les pressions existantes entre différents points du film d'huile se répartissent selon la figure 177 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.

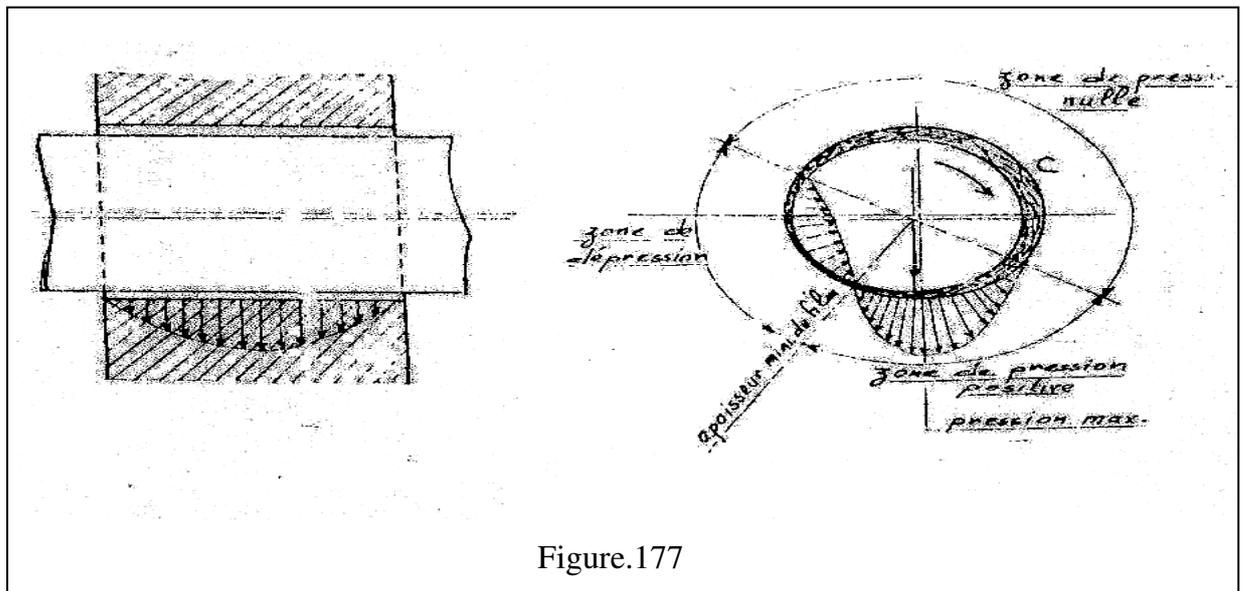


Figure.177

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. 178) 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. Cette rainure ne doit en aucun cas être située dans la zone des pressions maximales car la portance du palier serait considérablement amputée.

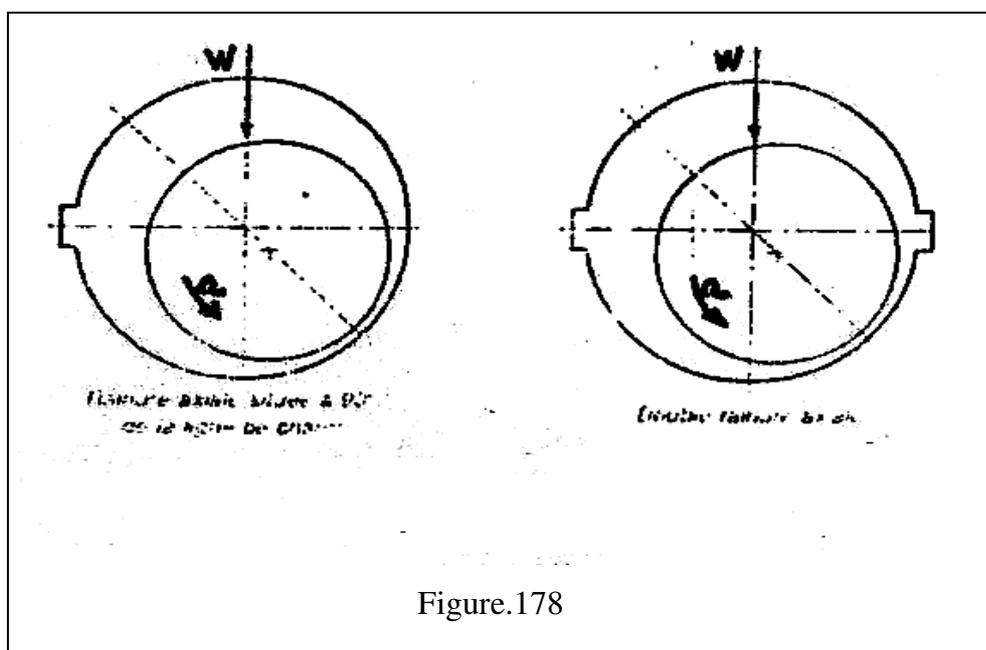
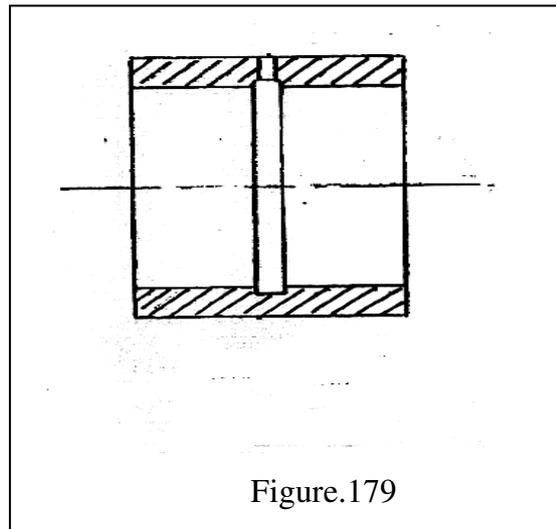


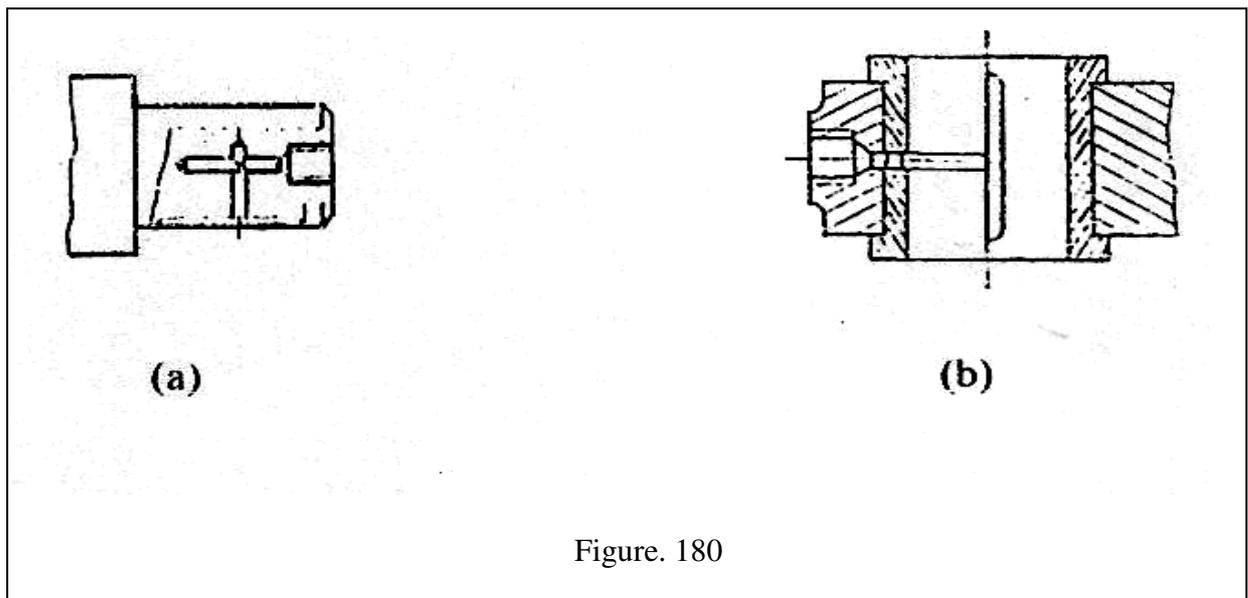
Figure.178

b. Les rainures circonférentielles :

Les rainures circonférentielles (fig. 179) 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.



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.180 a et b).



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. 181b).

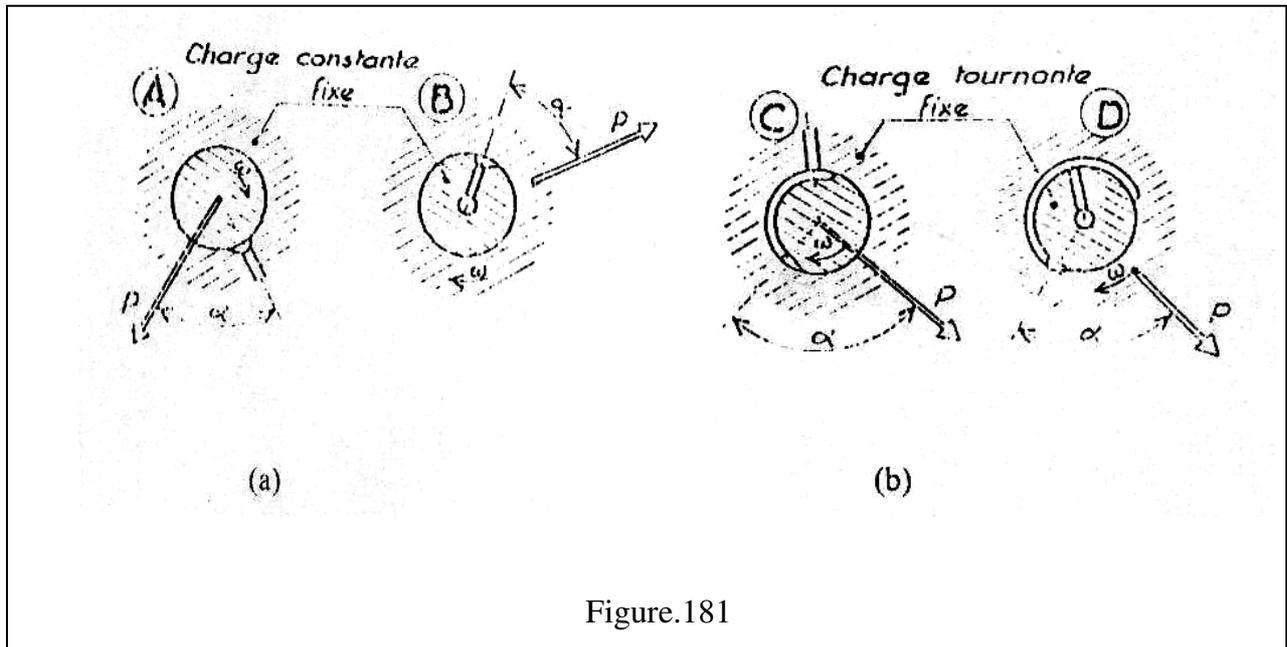


Figure.181

6.2.5. 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

6.2.5.2. 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,...).

6.2.5.3. 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 à jour.

6.2.6. 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.

6.2.7. 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'automaticité 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.

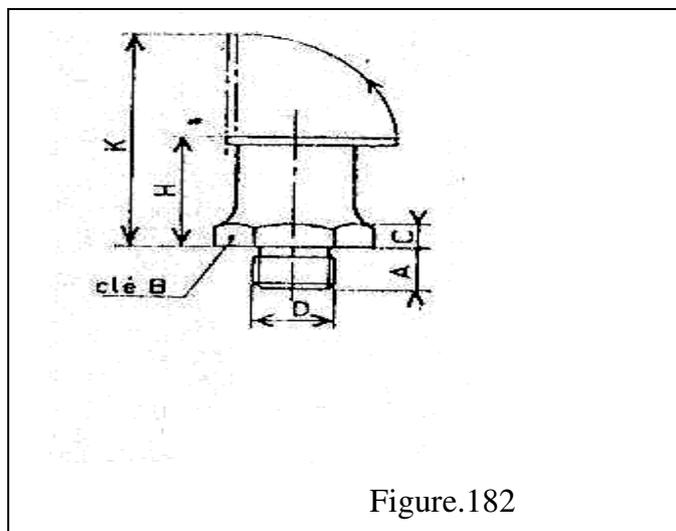
Selon l'importance de la lubrification ou du produit p.v on distingue deux types de dispositifs :

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

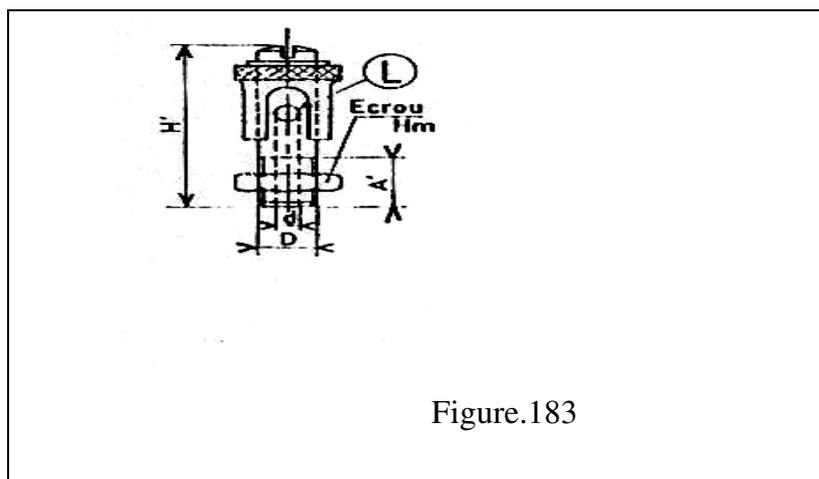
6.2.7.1. Dispositifs à lubrification perdue

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. 182).



- b. **Graisseur à chapeau tournant** (fig. 183)



c. **Graisseur Stauffer (à graisse) (fig. 184).**

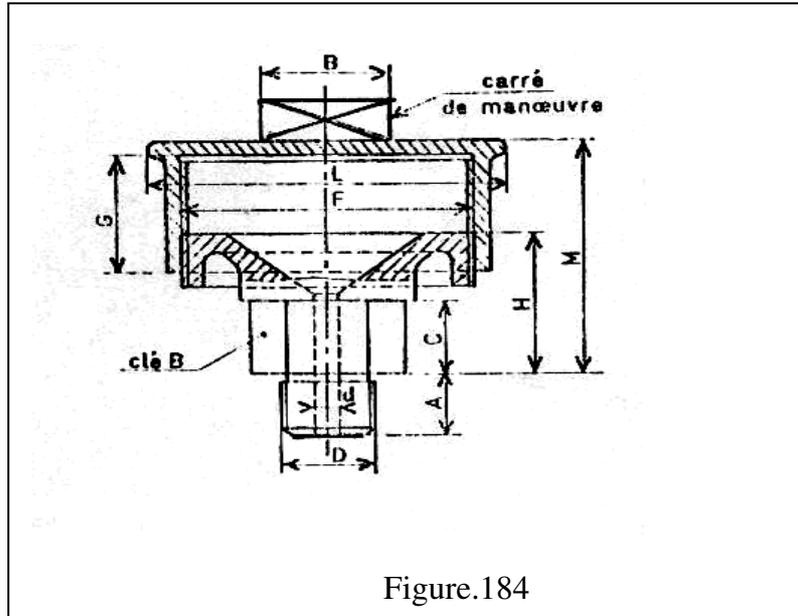


Figure.184

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.185a) pour le graissage haute pression, à la graisse, au moyen d'une pompe s'accrochant sur la tête du graisseur
- Graisseur « six pans » (fig.186b) pour le graissage moyenne pression.
- Graisseurs « Lub » ou « Metrolub » (fig.187c) pour le graissage basse pression. à l'huile ou a la graisse légère.

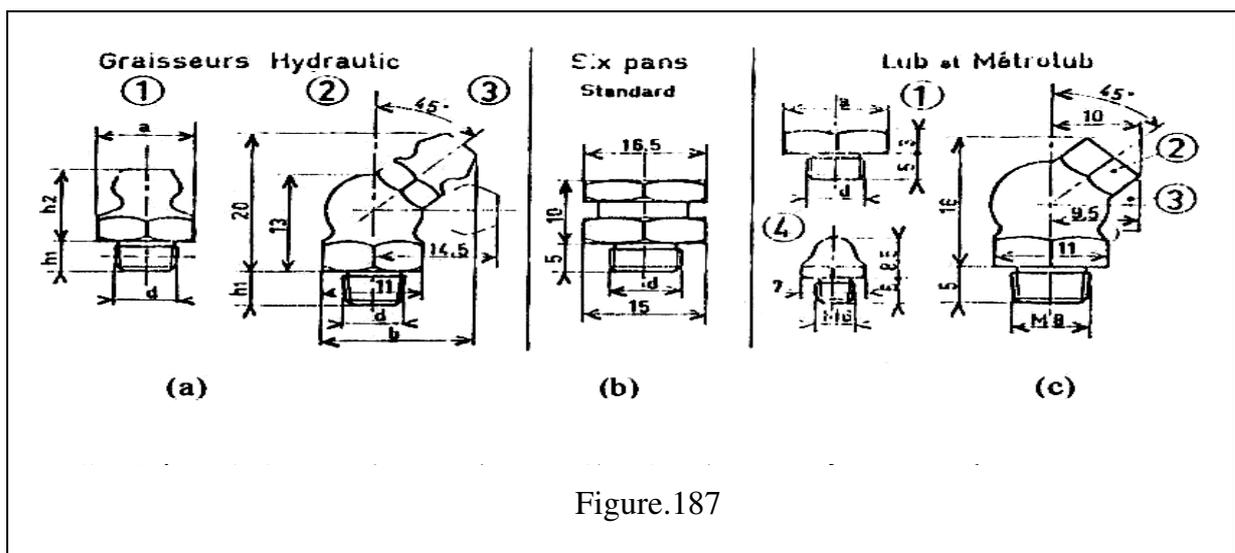
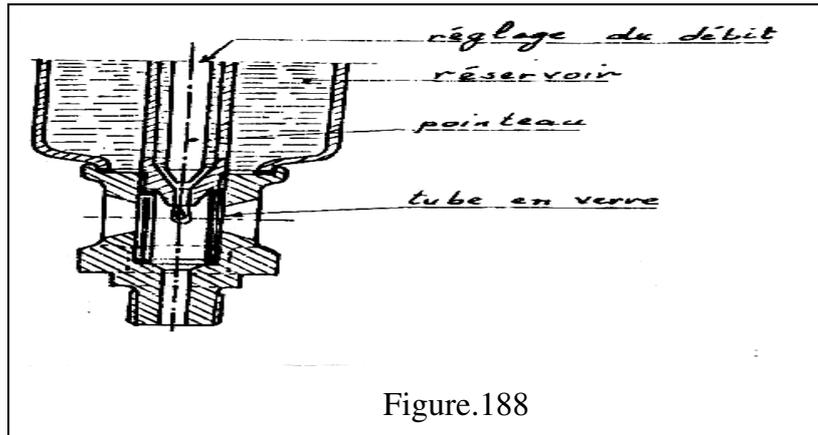


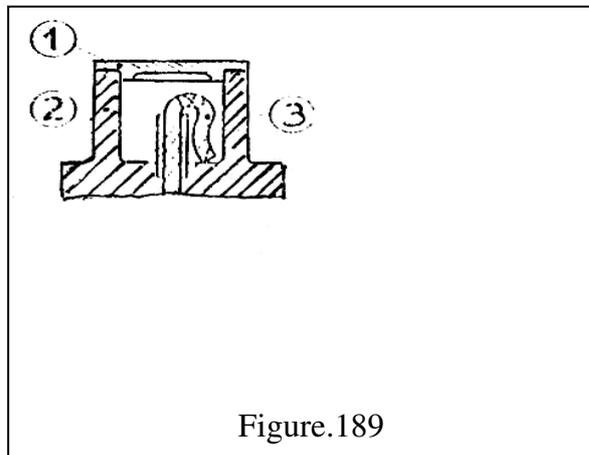
Figure.187

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

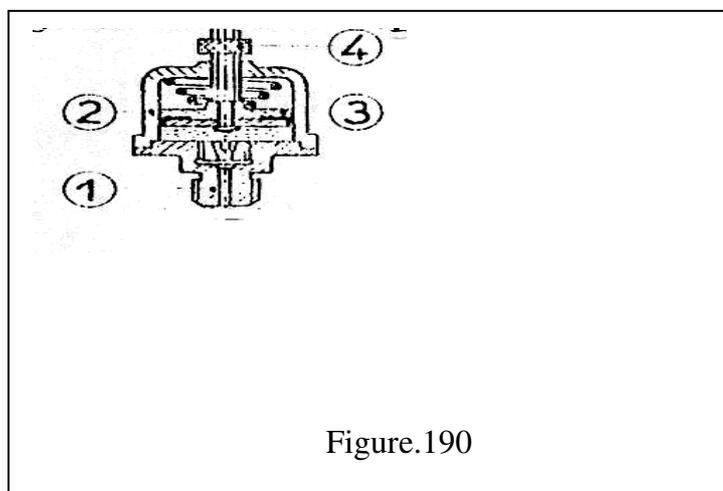
- par gravité c'est le cas d'un graisseur compte-gouttes par exemple (fig. 188)



- par capillarité (graisseur à mèche). (fig. 189)



- par ressorts (graisseur Stauffer à ressort). (fig. 190)



- par commande mécanique (fig. 191)

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 .

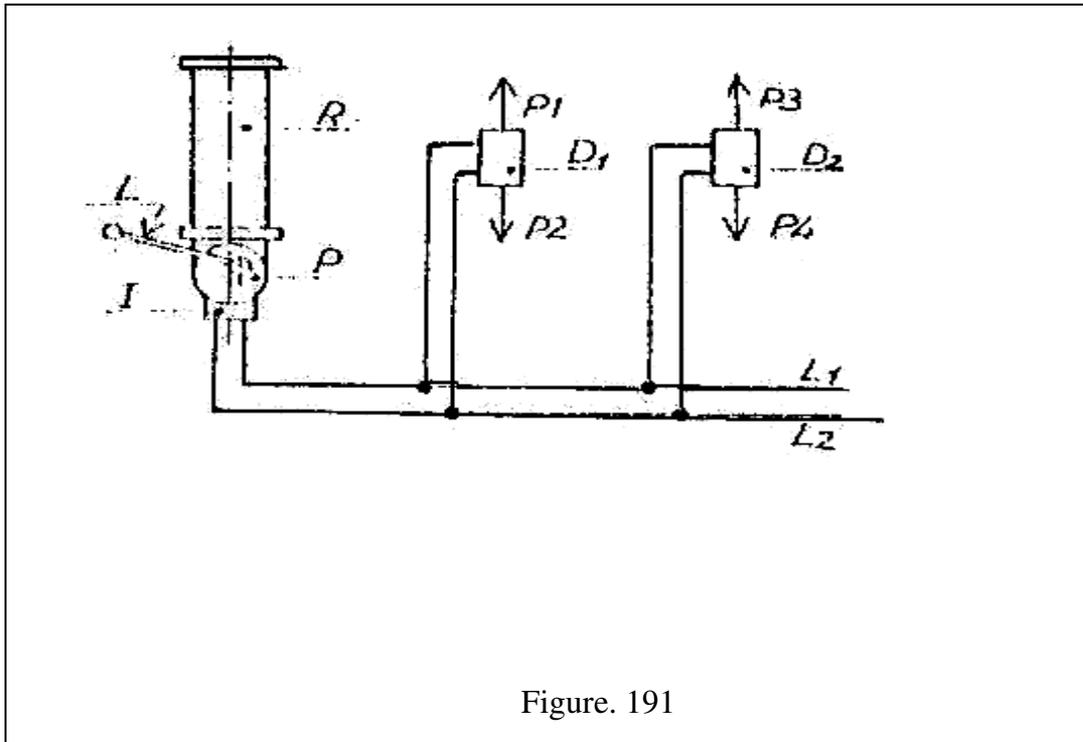


Figure. 191

6.2.7.2. Dispositifs à récupération d'huile

a. Graissage par barbotage, (fig. 192)

L'huile est entraînée vers les surfaces à lubrifier par l'organe mobile lui-même qui baigne dans une réserve d'huile (engrenages de boîte 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.

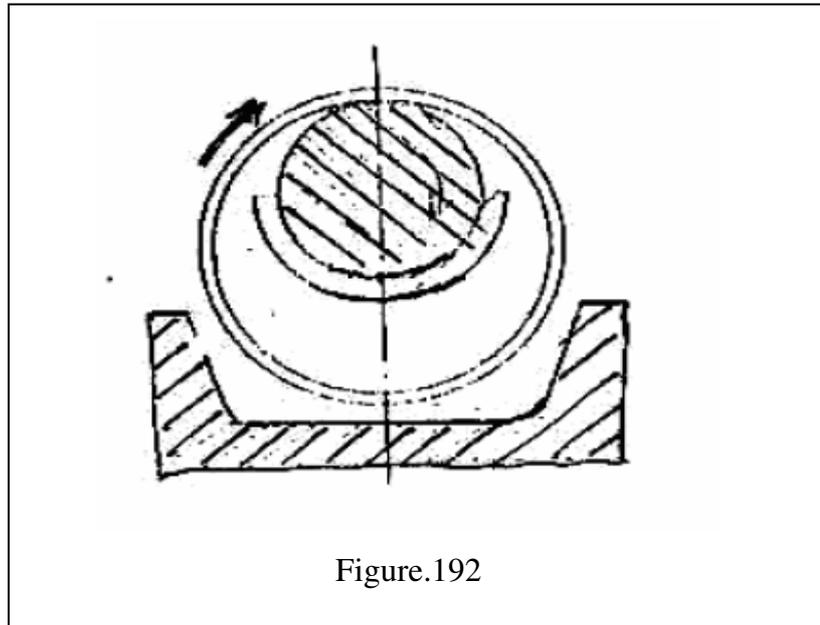


Figure.192

b. Par circulation d'huile (graissage sous pression) , (fig. 193) :

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.).

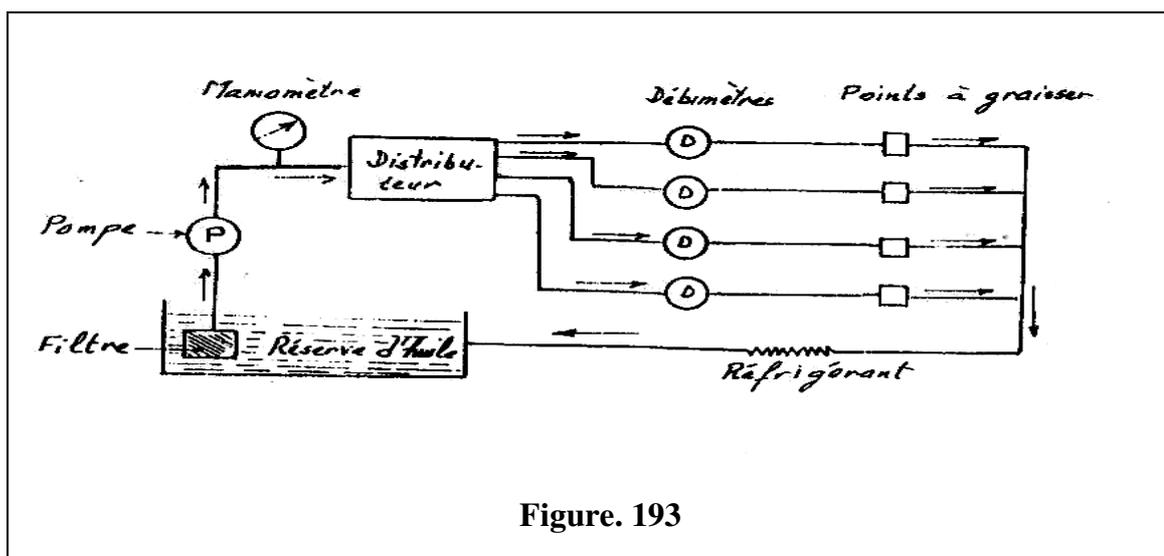


Figure. 193

7. USURE ET PROPRIETES DES MATERIAUX

7.1. 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 :

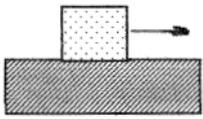
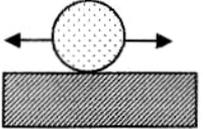
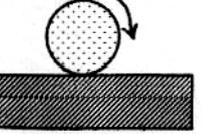
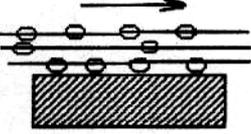
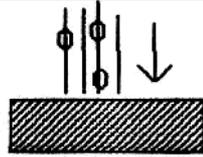
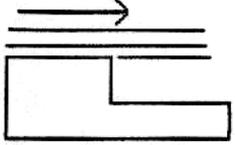
- Les métaux accouplés.
- La rugosité des couches limites (surface, lubrification).
- Le type de mouvement (glissement, roulement, écoulement, chocs, etc.).
- La vitesse du mouvement.

- 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 :

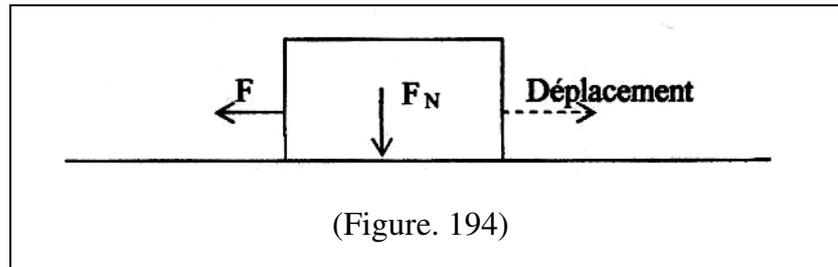
- L'usure due aux frottements entre corps solides.
- L'usure due aux impacts et aux fluides (érosion)

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

7.2. Le frottement

7.2.1. 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. 194).



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.

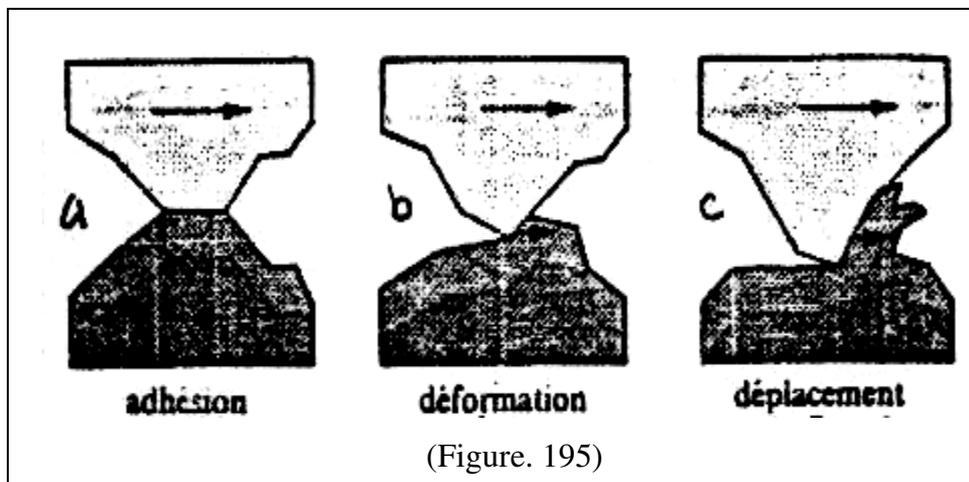
Dans les systèmes à mouvement, on cherche le plus souvent à minimiser les frottements, pour cela, on utilise normalement des lubrifiants. Ces derniers permettent de réduire le coefficient de frottement jusqu'à des valeurs inférieures à 0,1.

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

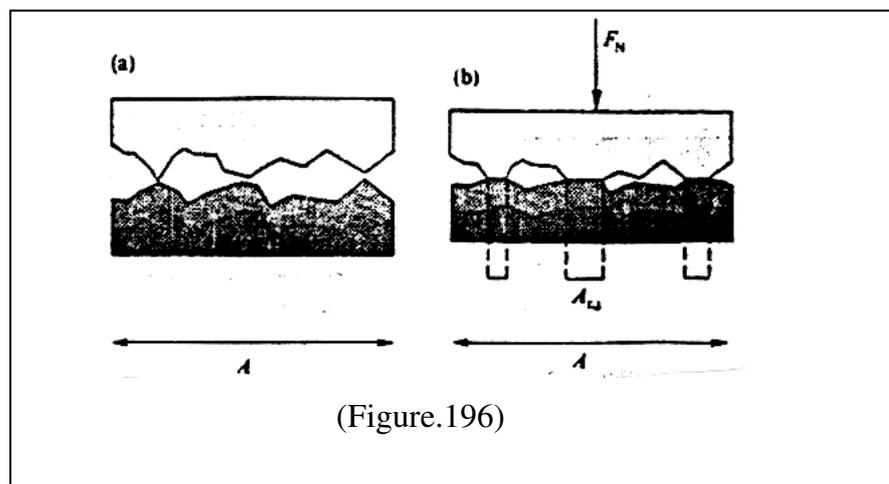
Trois phénomènes physiques bien distincts, provoquent des pertes d'énergie lors du frottement entre deux solides rugueux et influencent aussi sur la valeur du coefficient de frottement.

- Formation et rupture des jonctions d'adhésion aux lieux de contact (fig. 195 a).
- Déformation élasto-plastique des aspérités (fig. 195 b).
- Déplacement de matière par labourage (fig. 195 c)



7.2.1.1. Formation et rupture des jonctions d'adhésion

La figure 196 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 :

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

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 197a montre la variation du recouvrement de la surface en fonction de la dose d'O₂, et la figure 197 b montre l'influence de l'O₂ adsorbé sur le coefficient de frottement entre deux surfaces de Tungstène.

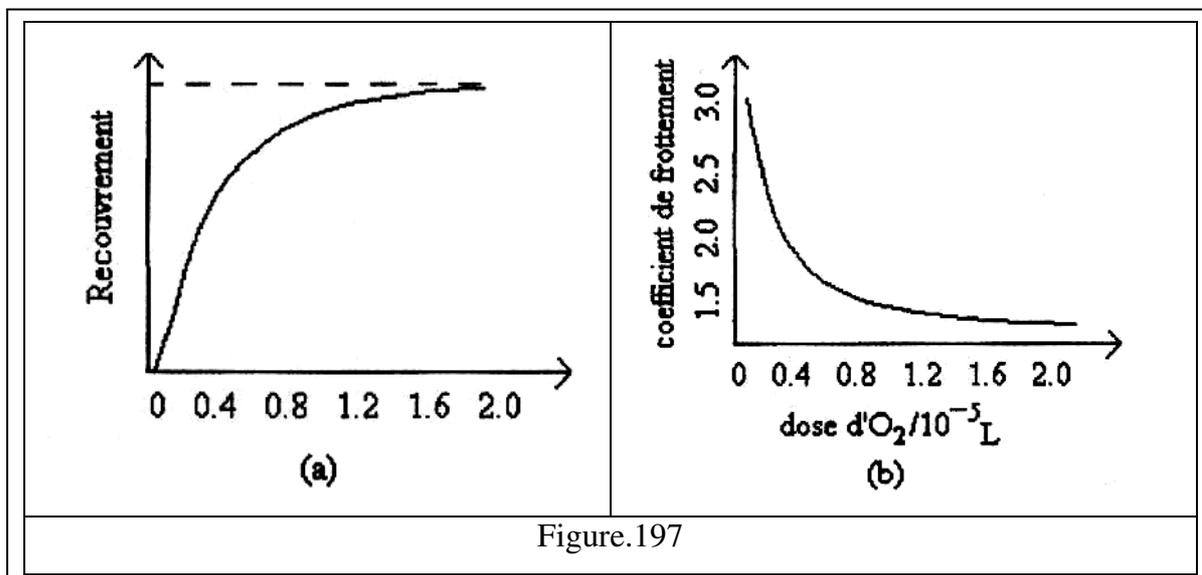


Figure.197

Les graphes (fig.197), 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.

7.2.1.2. 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.

7.2.1.3. 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 :

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_{\text{ad}} + \mathbf{f}_{\text{def}} + \mathbf{f}_{\text{pl}}$$

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

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

f_{pl} : 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.

7.2.1.4. 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 ($\text{J/m}^2 \text{ s}$) 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 :

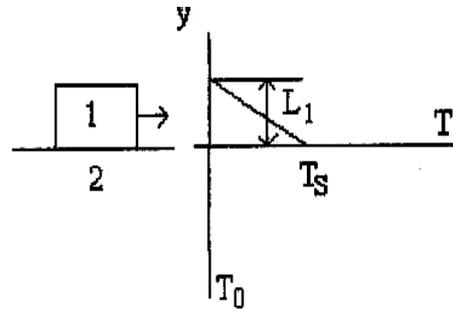
$$Q_1 \approx K_1 \frac{T_S - T_0}{L_1}$$

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

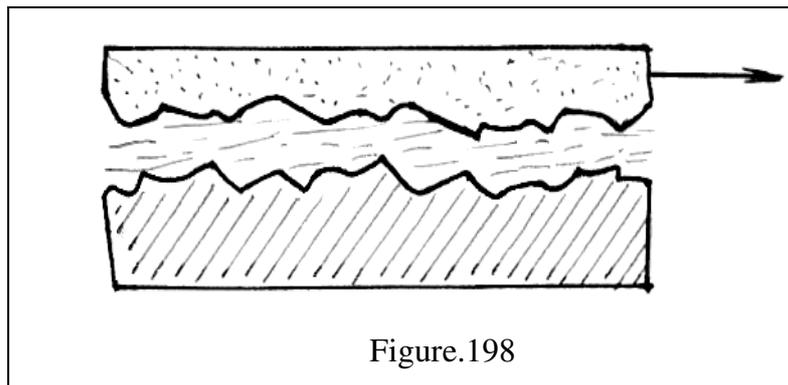
d'énergie mécanique se transforme alors en chaleur, ce qui augmente localement la température temporairement. La température à la surface d'une aspérité peut aussi dépasser de beaucoup la température moyenne T_s , on parle alors d'une pointe de température. Ces pointes de température modifient localement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

7.2.2. 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.

7.2.2.1. Le régime de lubrification hydrodynamique



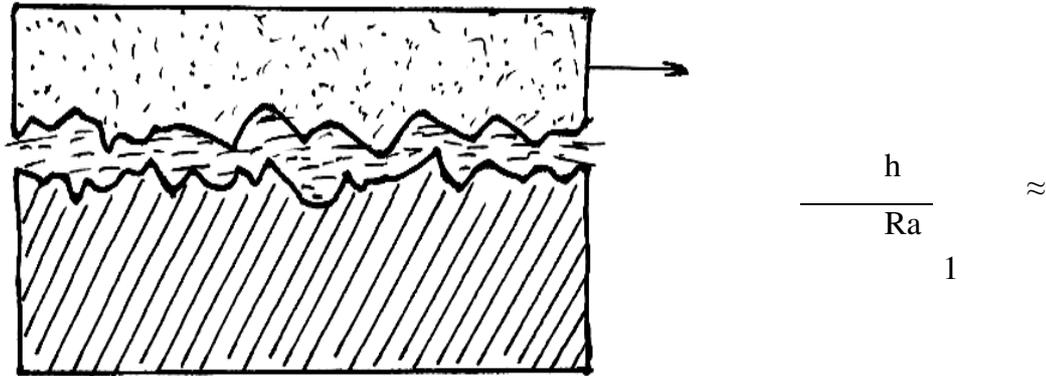
Appelé aussi élastohydrodynamique et signifie que les propriétés du film continu, séparant les deux solides, dont notamment la viscosité, déterminent le coefficient de frottement. L'épaisseur moyenne du film liquide h dépasse largement la rugosité moyenne Ra des surfaces de contact.

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.

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

7.2.2.2. Régime de lubrification mixte

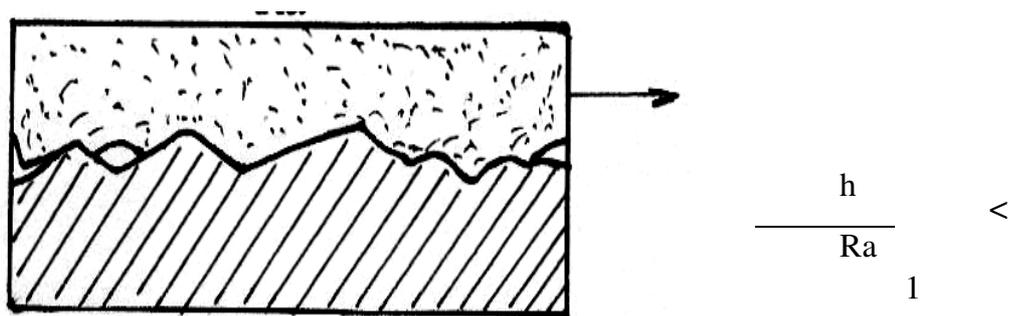
Si la force normale augmente, ou si la viscosité du lubrifiant devient insuffisante, le contact entre dans un régime de lubrification mixte. Le film liquide possède alors une épaisseur comparable à la rugosité moyenne de la surface et certaines aspérités entrent en contact (fig. 199)



(Figure.199)

7.2.2.3. 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. 100).



(Figure.100)

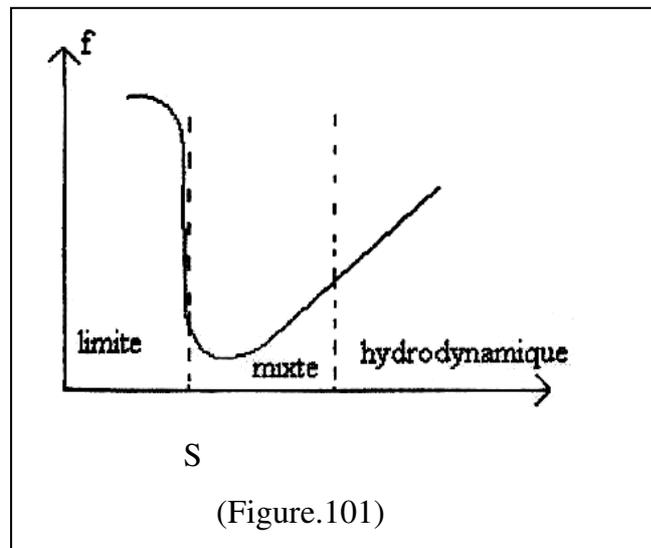
On atteint le régime de lubrification limite lorsque la force normale devient trop élevée ou lorsque la viscosité du lubrifiant est particulièrement faible. Le coefficient de frottement peut alors devenir très élevé, amenant à une destruction du contact par grippage.

7.3. 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.101).

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

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 :

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

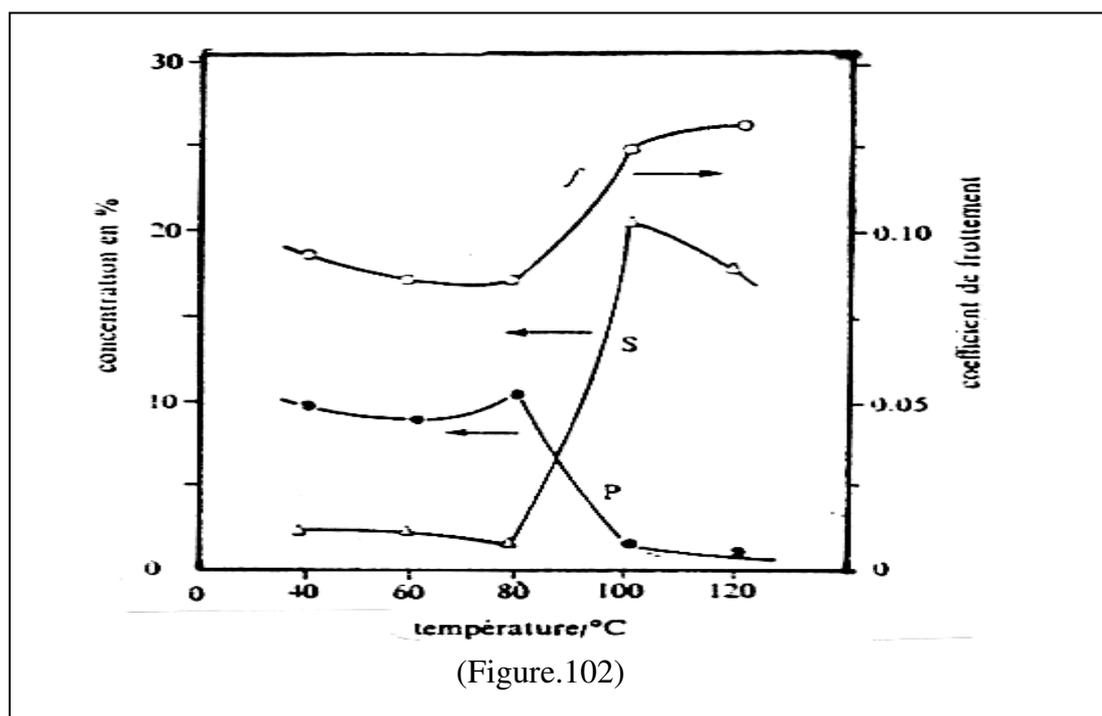
K : facteur de proportionnalité.

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 102 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.

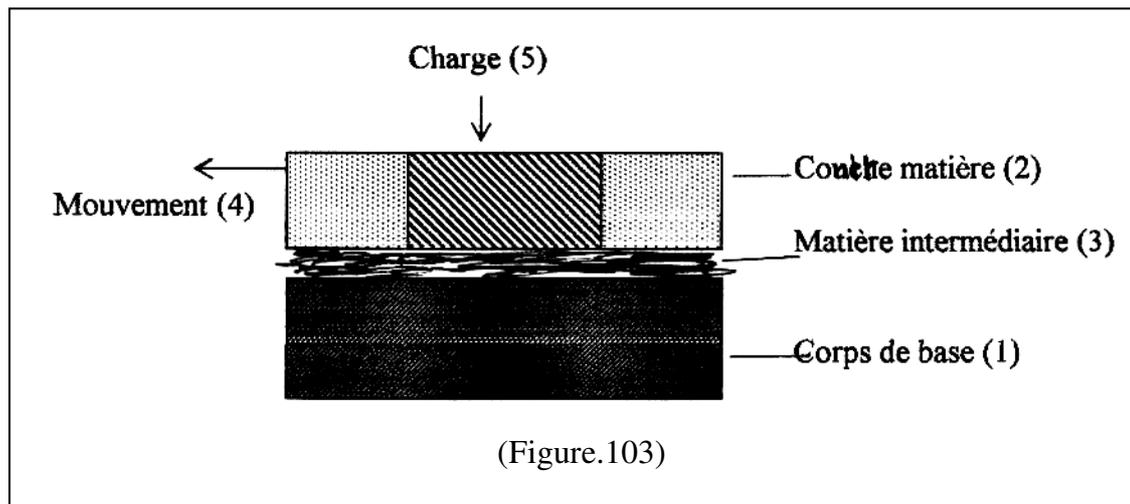


L'influence du P, S et de la température sur le coefficient de frottement est illustrée par la figure 102. L'augmentation de la température réduit progressivement la viscosité du lubrifiant. Le coefficient de frottement diminue par conséquent jusqu'à ce que le film superficiel ne sépare plus les métaux. On observe alors une brusque augmentation du coefficient de frottement à 80°C.

7.4. 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. 103).



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.

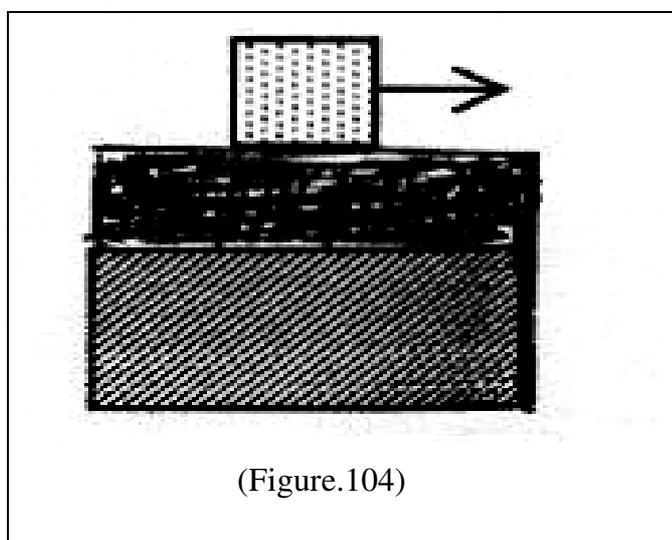
5. Le mouvement : on différencie généralement trois types de mouvement relatifs entre les forces en contact.

- 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.

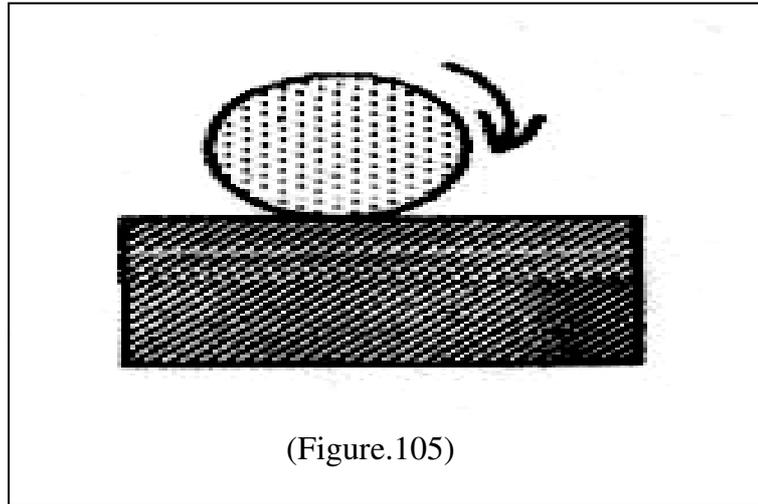
7.4.1. L'usure par glissement

Elle se produit lorsque les surfaces de deux solides glissent l'une sur l'autre (fig. 104), 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.



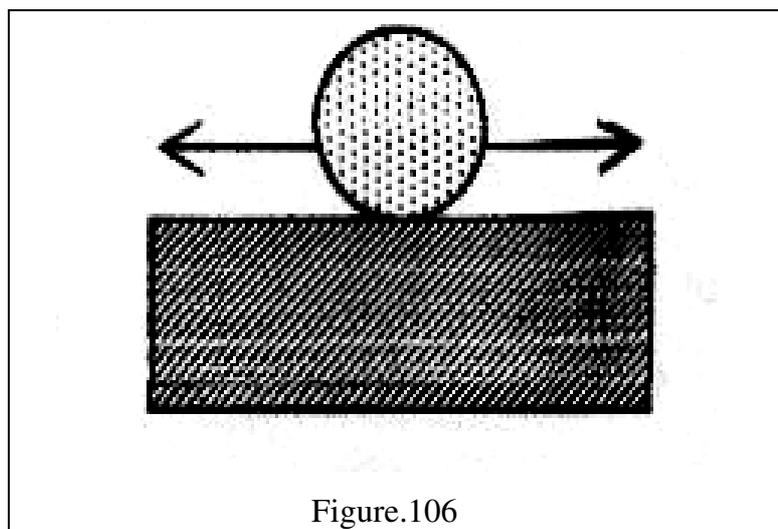
7.4.2. L'usure par roulement

Elle correspond au roulement d'une bille ou cylindre sur une surface solide (fig.105), 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.



7.4.3. L'usure par frottement en petits débattements

Elle désigne une altération due à des mouvements alternatifs de hautes fréquences et de faibles amplitudes, (fig.106). 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.

7.5. 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.

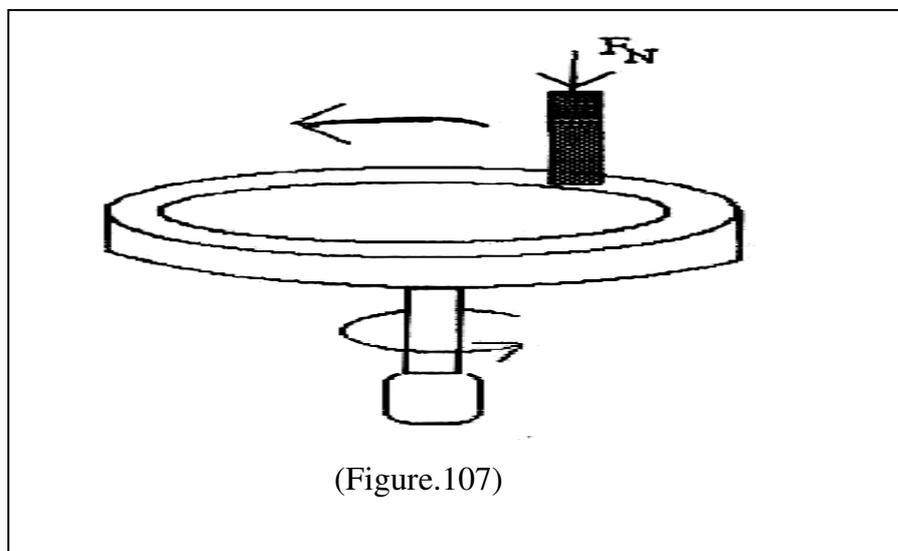
Dans les méthodes directes, on peut avoir :

- 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 (%).

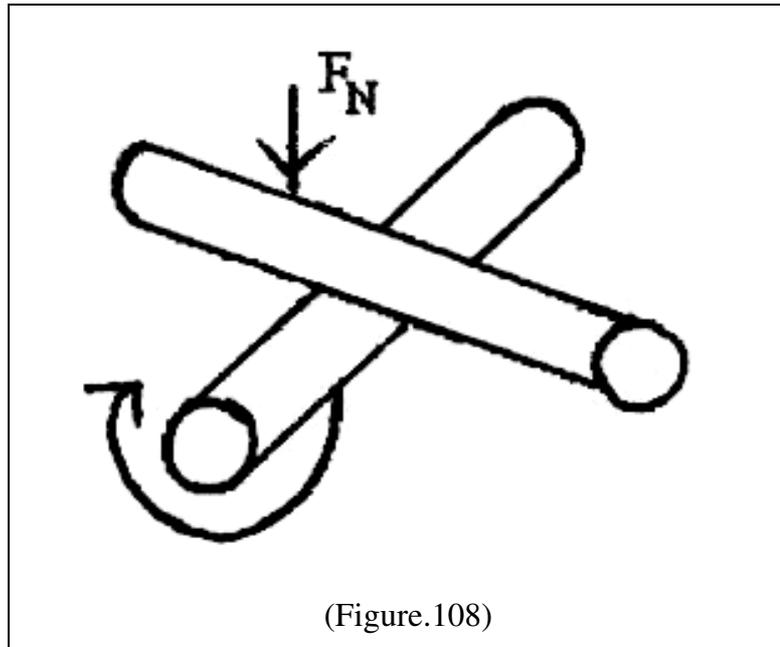
Comme valeurs caractéristiques indirectes, peuvent être déterminées la durée de vie totale ou d'usure (heures), la quantité d'apport d'usure (kg , m^3) ou encore, des grandeurs mesurées indirectement, par exemple la température. Les résultats des essais d'usure ne peuvent pas être généralisés à cause 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 :



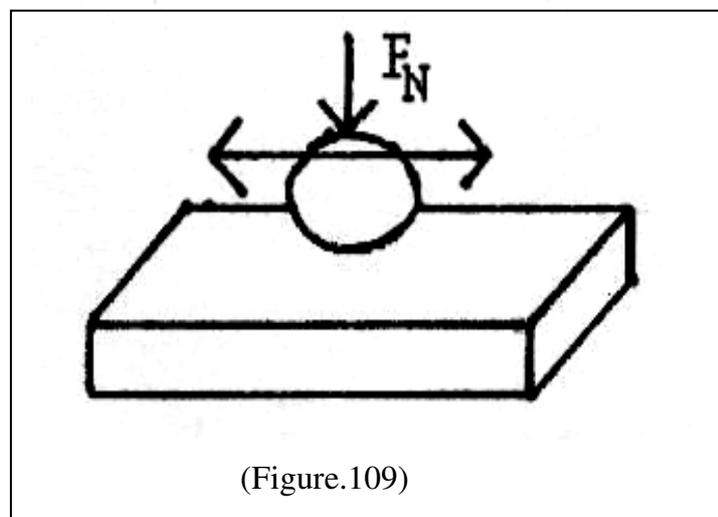
Cet essai comprend un disque tournant sur lequel s'applique un crayon ou une bille fixe avec une force constante. La force normale appliquée et le moment angulaire nécessaire à la rotation du disque permettent d'obtenir le coefficient de frottement comme le montre la figure 107.

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.

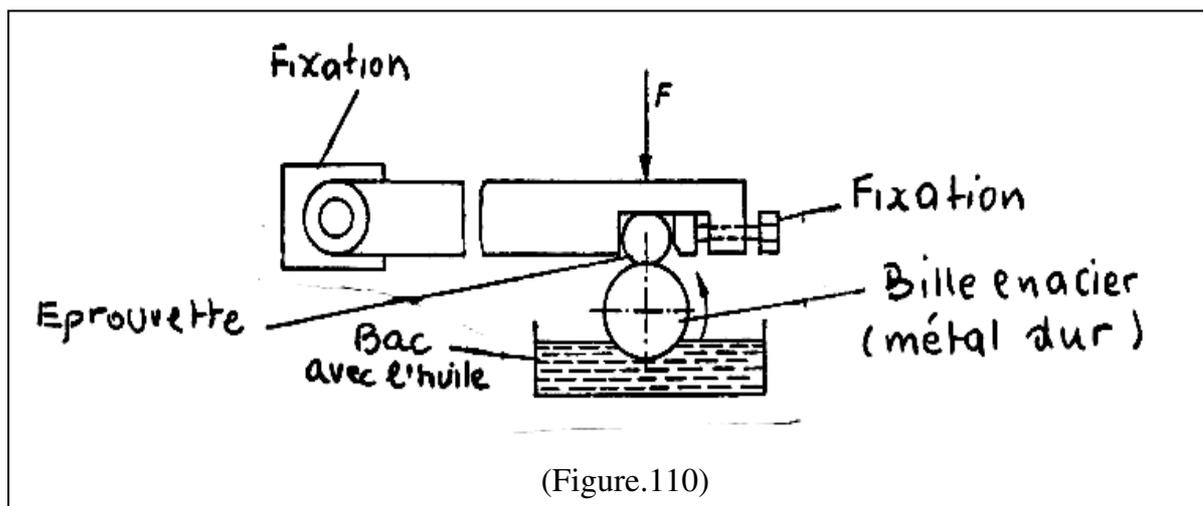
c. L'essai à mouvement alternatif



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.

7.5.1. Essai d'usure de glissement

Avec l'appareil, ci-dessous (fig.110), on peut déterminer l'usure de glissement avec ou sans lubrifiant.



La charge et la vitesse de glissement peuvent être variées. 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.**

7.5.2. 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.

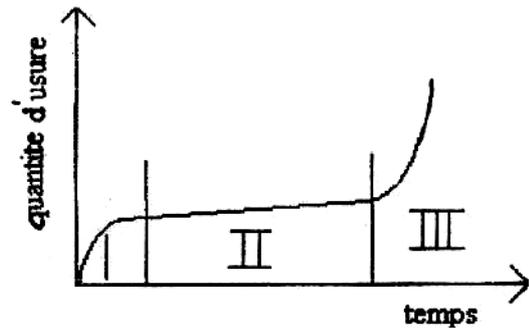
Cette loi garde sa validité tant que les variations de températures dues aux frottements restent négligeables.

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

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.111) 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.111)

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.

7.5.3. Mécanismes d'usure

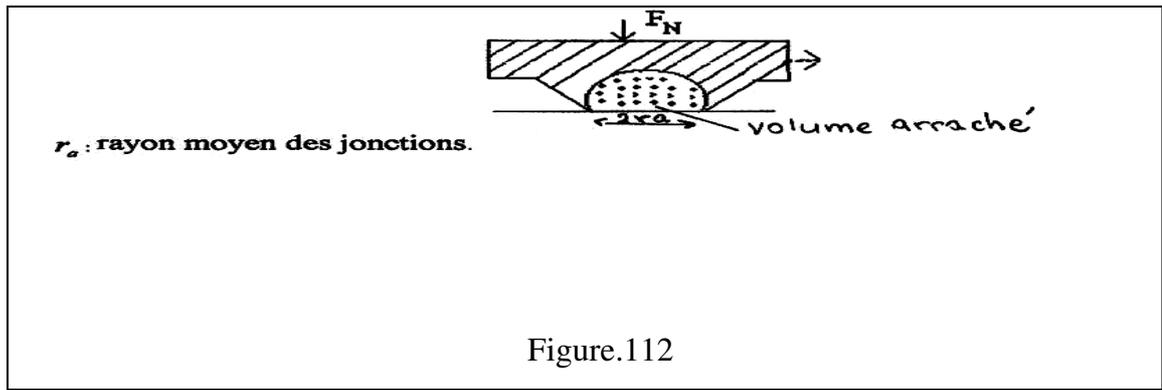
On distingue généralement quatre mécanismes d'usure.

- 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

7.5.3.1. 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 :

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

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 $n_j / 2 r_a$.

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

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

En intégrant l'expression :

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

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

Avec :

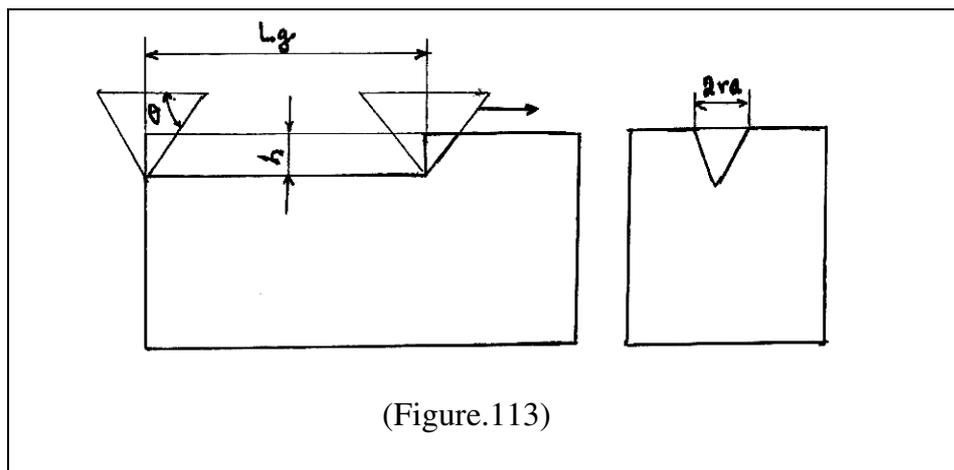
$$\frac{K_{WA}}{3} = K_w$$

7.5.3.2. 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 113 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 :

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

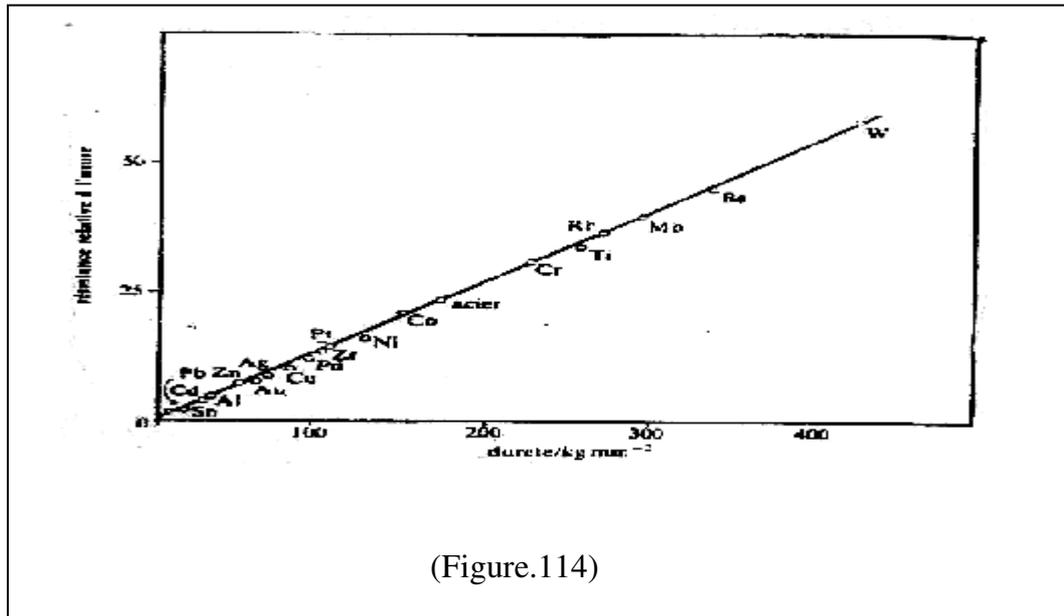
$$= \frac{H \cdot F_N}{A_r} = \frac{F_N}{\Pi \cdot r_a^2} \Rightarrow r_a^2 = \frac{F_N}{\Pi \cdot H}$$

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

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

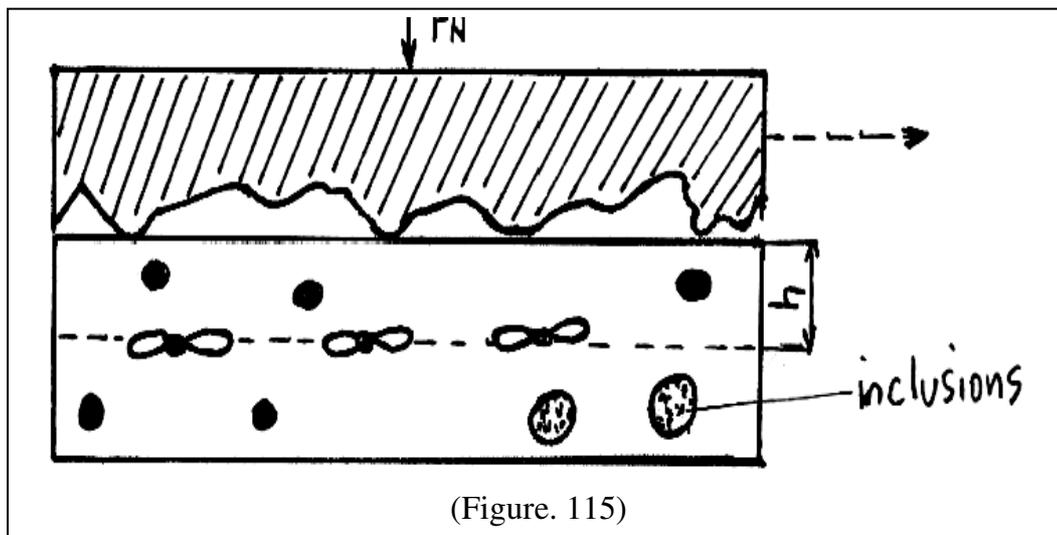
Dans ce modèle, le coefficient d'usure dépend surtout de l'angle d'attaque de l'abrasif. La vitesse d'usure d'abrasion est inversement proportionnelle à la dureté du matériau usé.

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 114 montre l'influence de la dureté sur la résistance relative à l'usure de différents métaux.



7.5.3.3. 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.



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 115 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 :

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

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

Avec $h \approx r_a$

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

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

A_r : surface réelle de contact.

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

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

$$= \frac{H}{N} \frac{F}{A_r} \Rightarrow r = \frac{A}{N} \frac{F}{H} \Rightarrow w = \frac{V}{N} \frac{1}{c_{rit}} \frac{F}{N \cdot L_{gl} H}$$

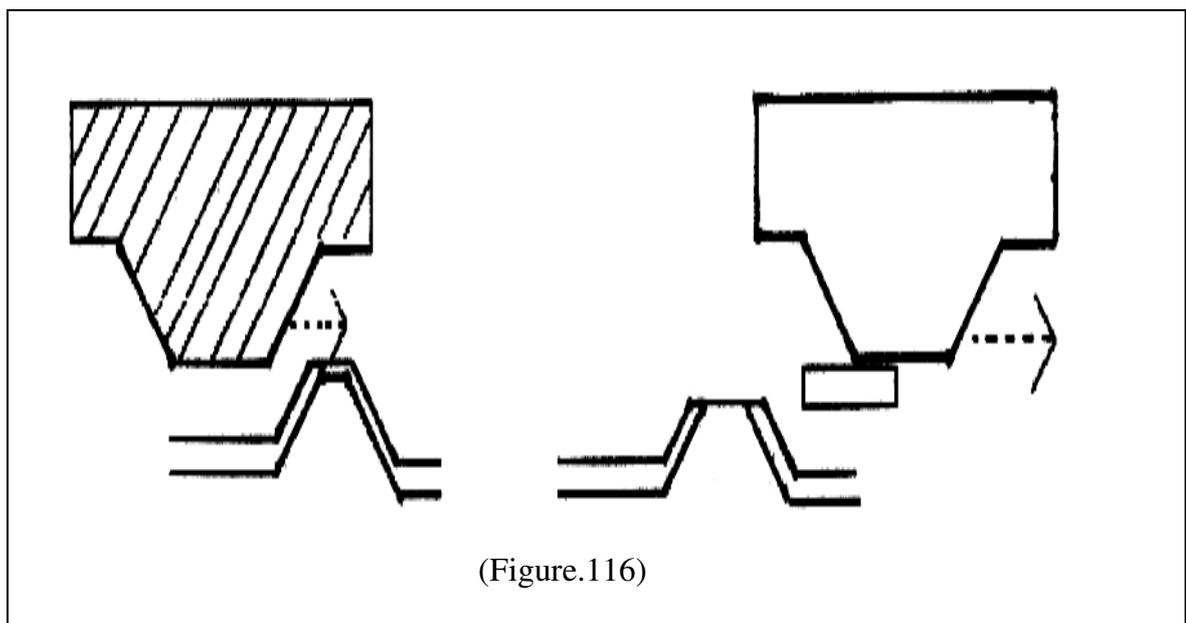
$$K_w = \frac{1}{n_{crit}}$$

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.

7.5.3.4. 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 116. 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.

Kp : constante d'oxydation parabolique.

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

$$t_{crit} = \frac{L_{crit}^2}{K_p}$$

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

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

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

v_{gl} : vitesse de glissement.

A_t : surface réelle de contact.

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

En posant :

$$K_{crit} = \frac{L_{crit}^2}{K_p}$$

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

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

$$K_w = \frac{K_p}{v_{gl} L_{crit}}$$

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

7.6. 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.

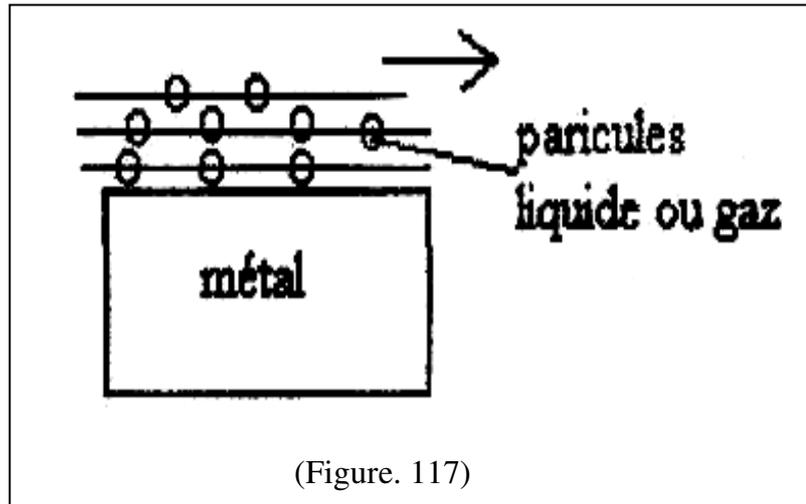
7.7. Usure due aux impacts et aux fluides

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

7.7.1. 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. 117).



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**.

7.7.2. 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.

$$E_{\text{Kin}} = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2$$
$$f' = \frac{F \cdot A}{E_{\text{Kin}}}$$

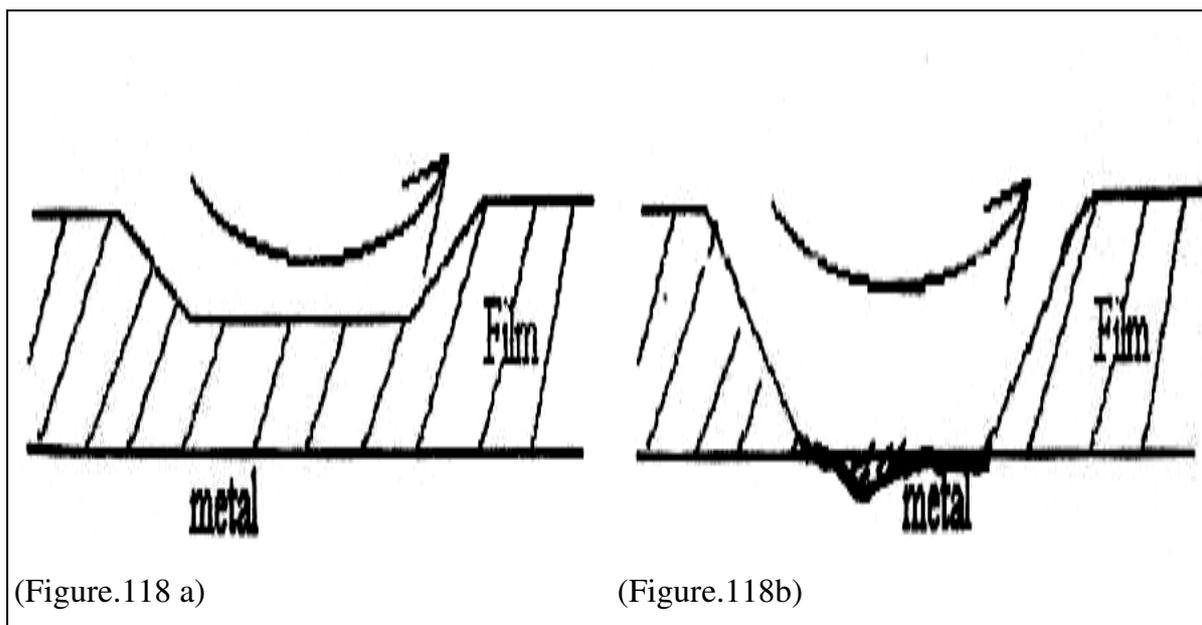
f' dépend de la vitesse d'écoulement du fluide, de la rugosité des parois et de la géométrie de l'installation. Selon la relation :

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

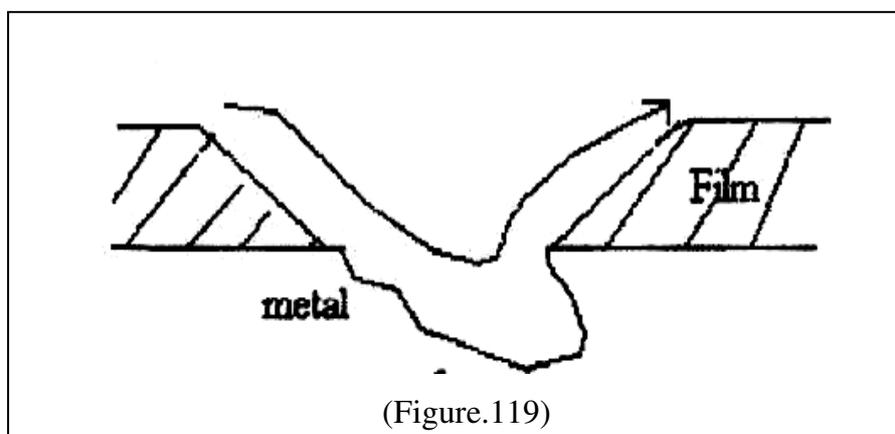
La vitesse critique de corrosion-érosion v_{crit} , s'élève à :

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

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 118 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.

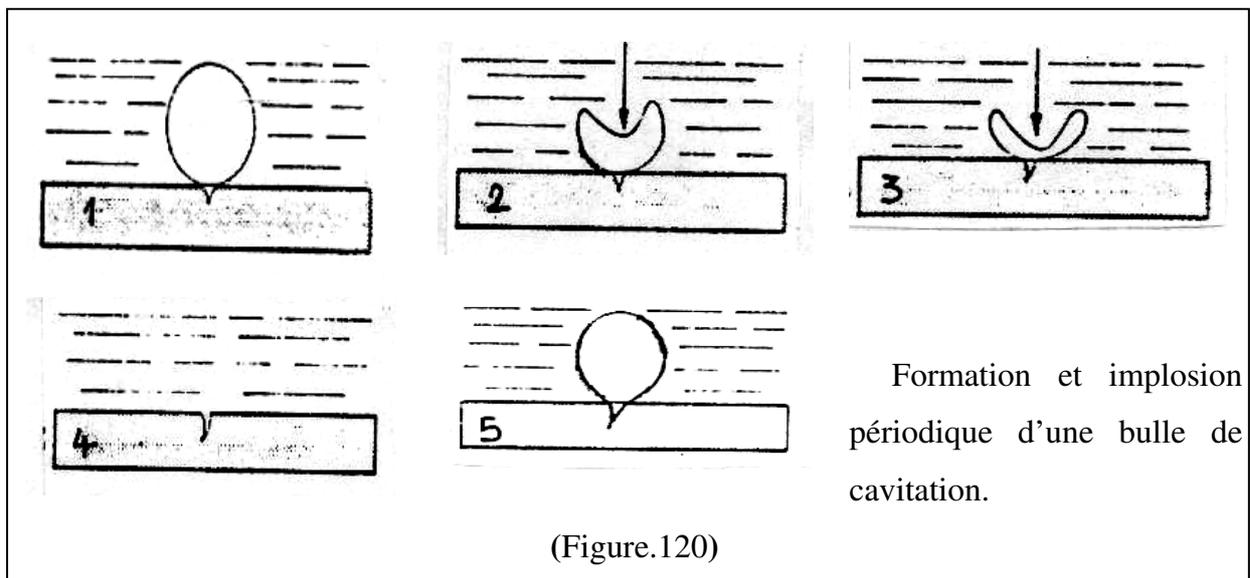
7.7.3. Usure par cavitation ou corrosion-cavitation

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

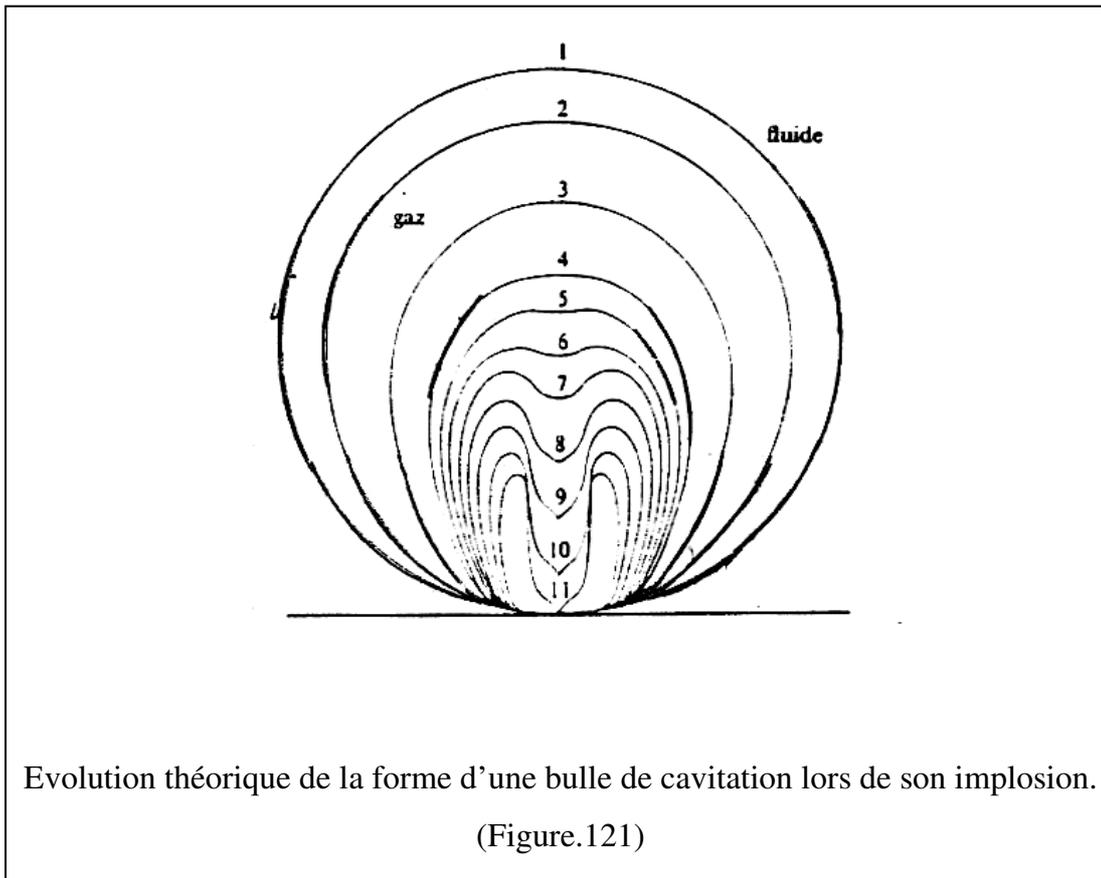
aval d'un orifice dans une conduite, sur certaines parties d'une hélice de bateau ou d'une turbine hydraulique, c'est à dire, lorsque la pression dans les fluides en écoulement turbulent devient temporairement inférieure à la pression de vapeur du liquide, le phénomène de cavitation peut se produire.

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.

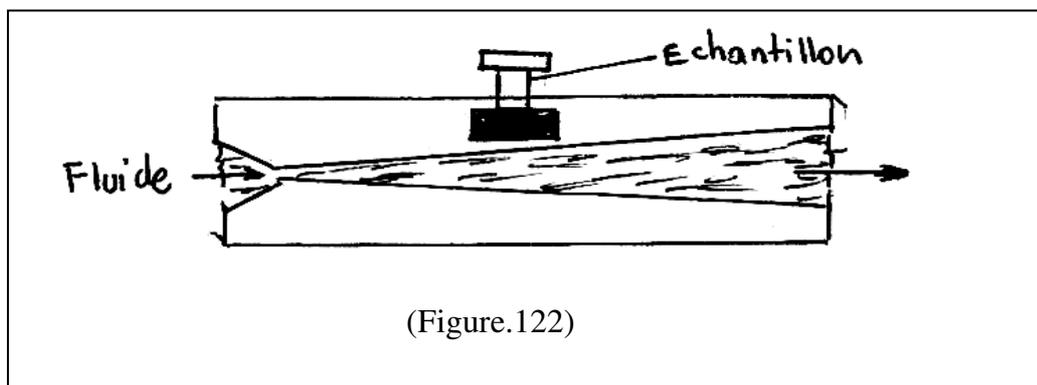
En raison des fluctuations de pression, les bulles de cavitation implosent lorsque la pression augmente localement. Ce phénomène produit une onde de choc pendant un temps très court (quelques microsecondes). La pression à la surface du métal peut donc atteindre une valeur très élevée jusqu'à 1000 Mpa comme le montre les figures 120 / 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 121, 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 122. Le système venturi existe sous différentes formes, mais son principe reste identique.

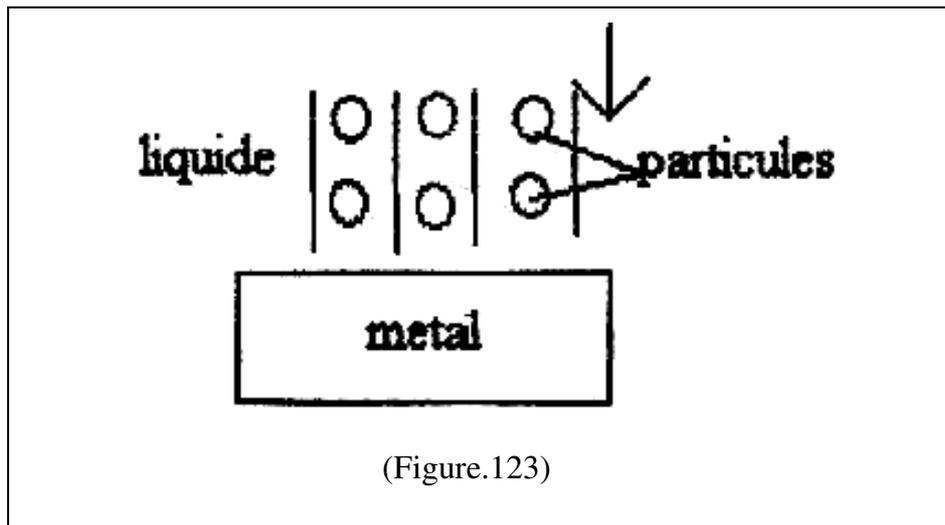


Un fluide s'écoule en régime turbulent dans une conduite. Il passe par un rétrécissement qui provoque la formation de bulles de cavitation. Celles-ci sont entraînées par le fluide et

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.

7.7.4. 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. 123).



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.

7.7.5. 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
Bainite	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.

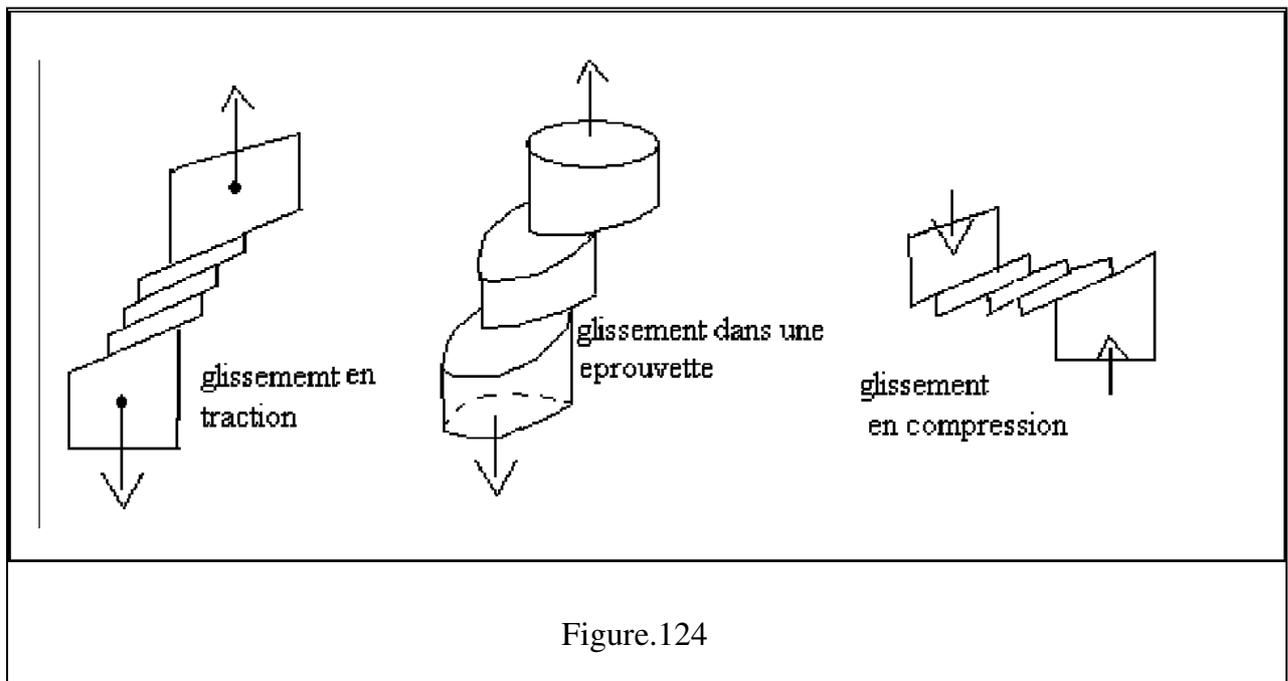
Les valeurs indiquées sur le tableau ci-dessous, sont données pour un acier au carbone non allié.

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	

8. ELASTICITE

8.1. 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.124). 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.125).



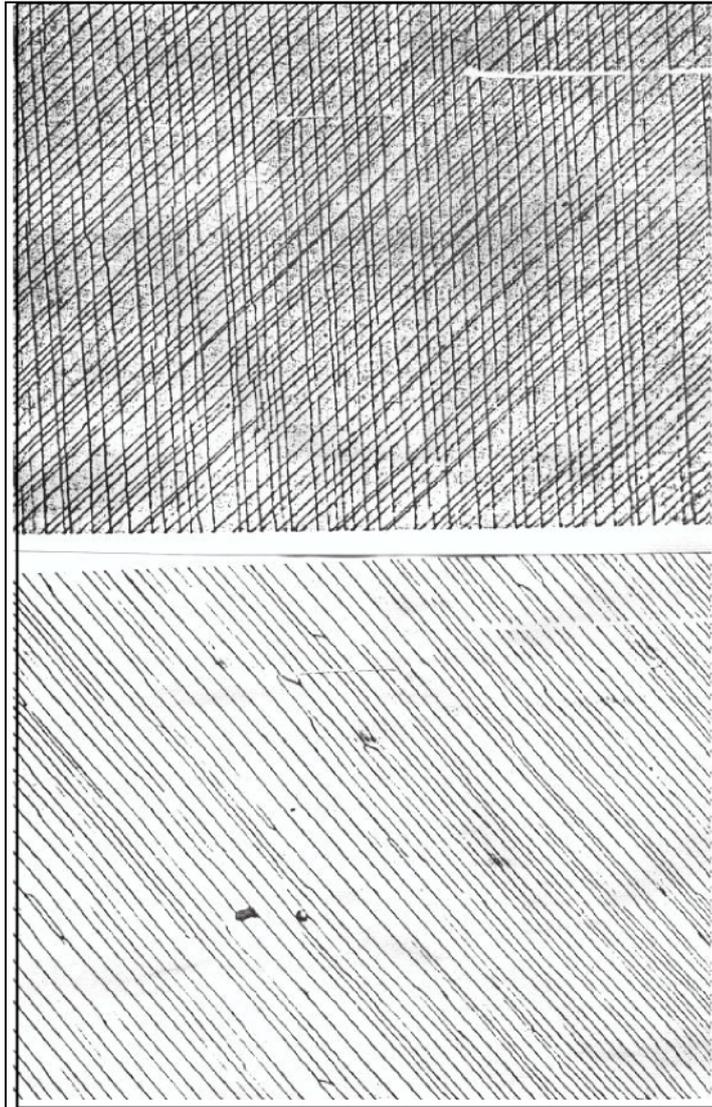


Figure. 125 Lignes de glissement dans l'aluminium
micrographie optique ($\times 150$).

8.2 Aspects micrographiques de la déformation plastique

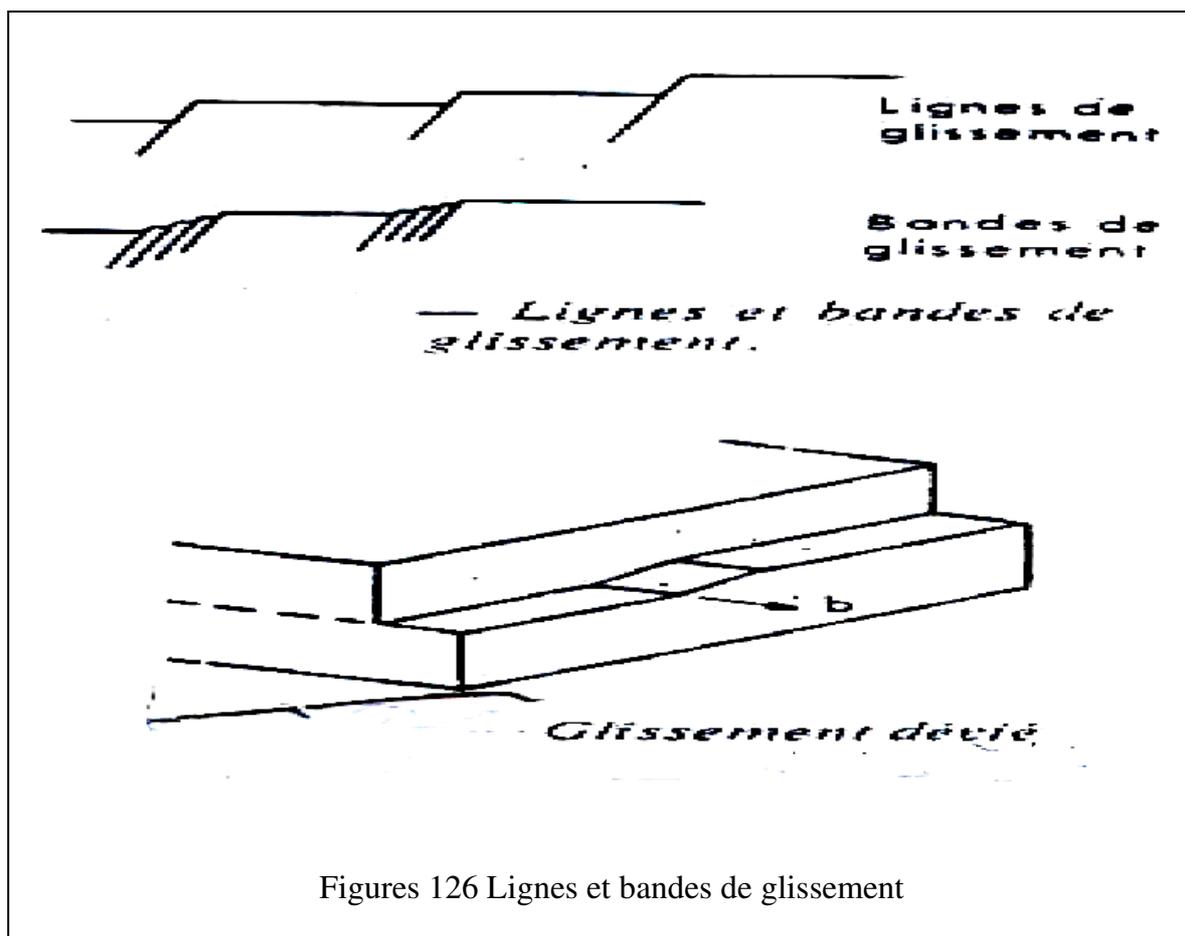
8.2.1 Glissement

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

8.2.1.1 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. 126). 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 Å. 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.126.



Figures 126 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 alignées 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.

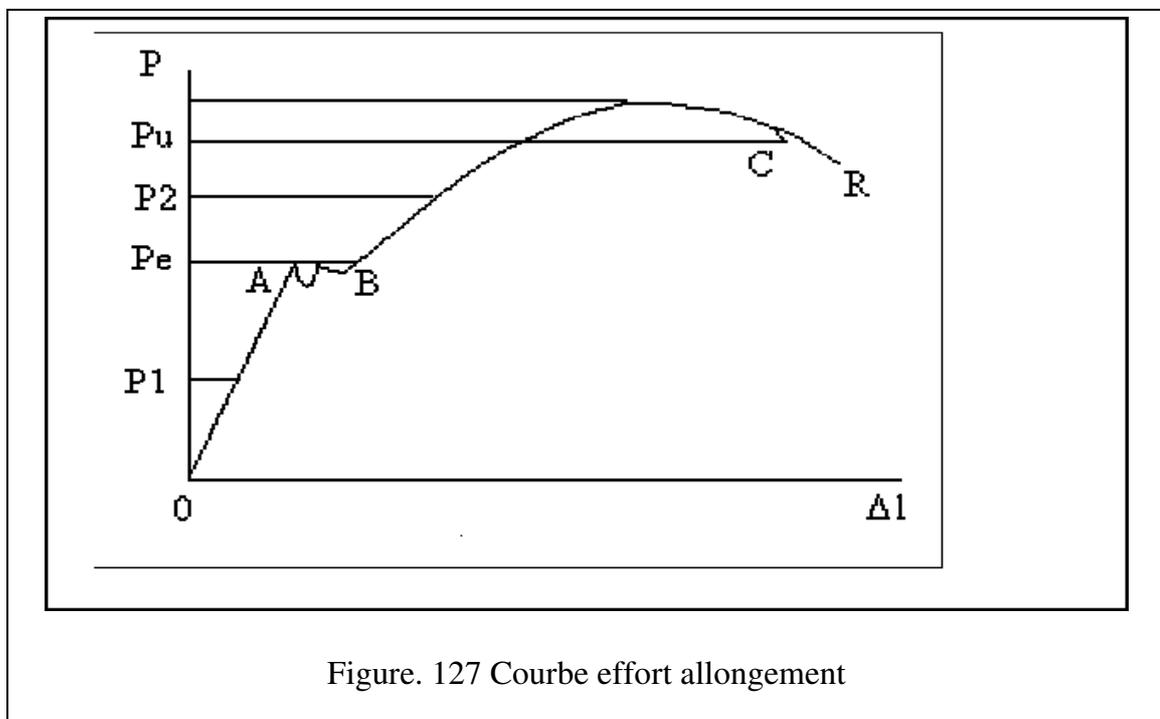
8.3. Polycristaux

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

8.3.1. 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.127)



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.

Tang β = E.

$\delta = \varepsilon \times E$.

E : module d'élasticité.

ε : Allongement e x.100%

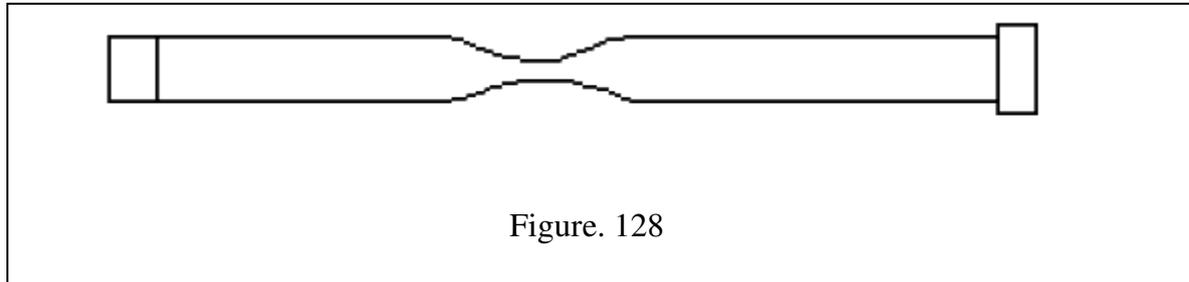
σ_e : contrainte limitée d'élasticité.

Les contraintes inférieures à σ_e produisent pratiquement que des déformations élastiques. La limite élastique $\sigma_{0.2}$ 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 $\sigma_{0.2}$, 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 σ_r , donc: $\sigma_r = F_{max} / A_0$ (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:

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

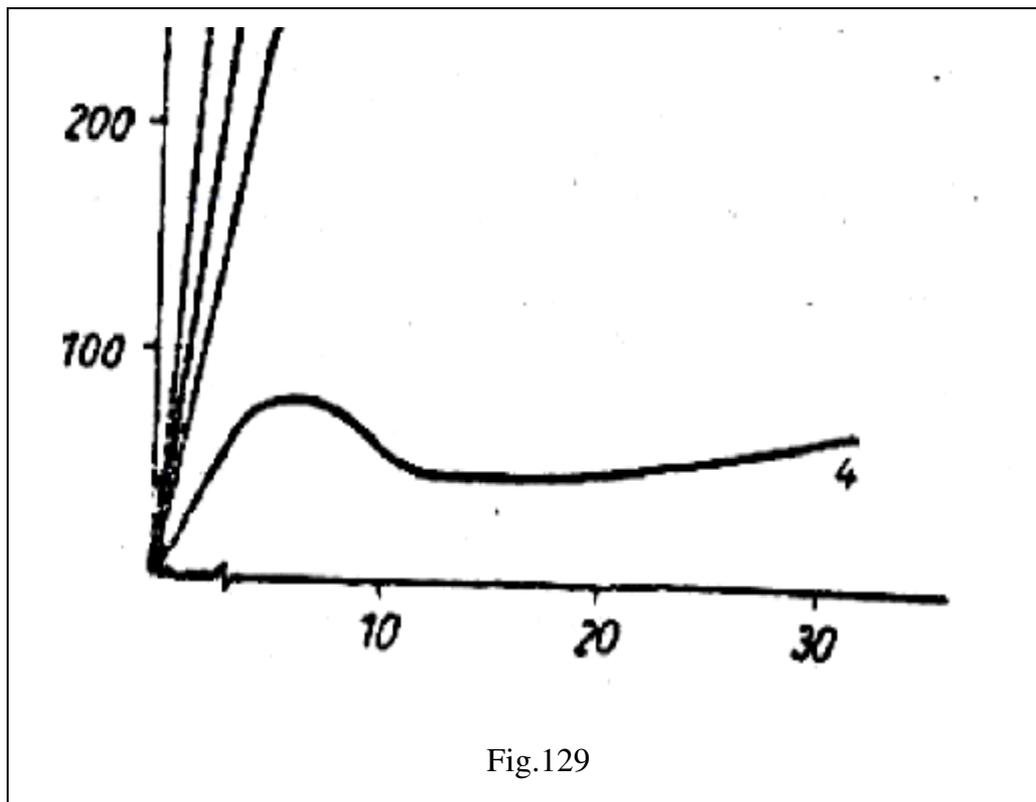
Dans le cas des métaux plastiques, une fois les contraintes atteignent la valeur de rupture, la déformation se concentre en un secteur déterminé de l'éprouvette où apparaît un rétrécissement de la section appelée Striction (fig. 128).



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

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

Les diagrammes contraintes- allongements diffèrent d'un métal à un autre (fig.129).



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

8.4 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 .

8.4.1 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 $\Delta r / r_0 = -\nu \varepsilon$ ou 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. 130): 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:

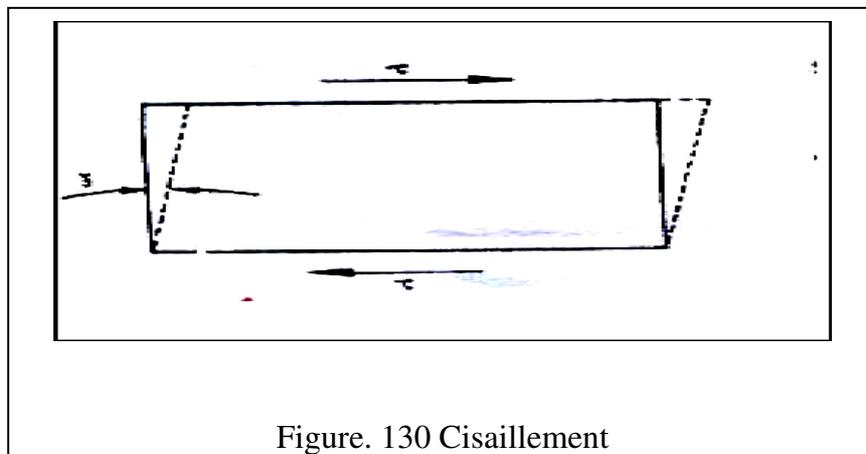
$$\tau = \gamma \mu$$

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.



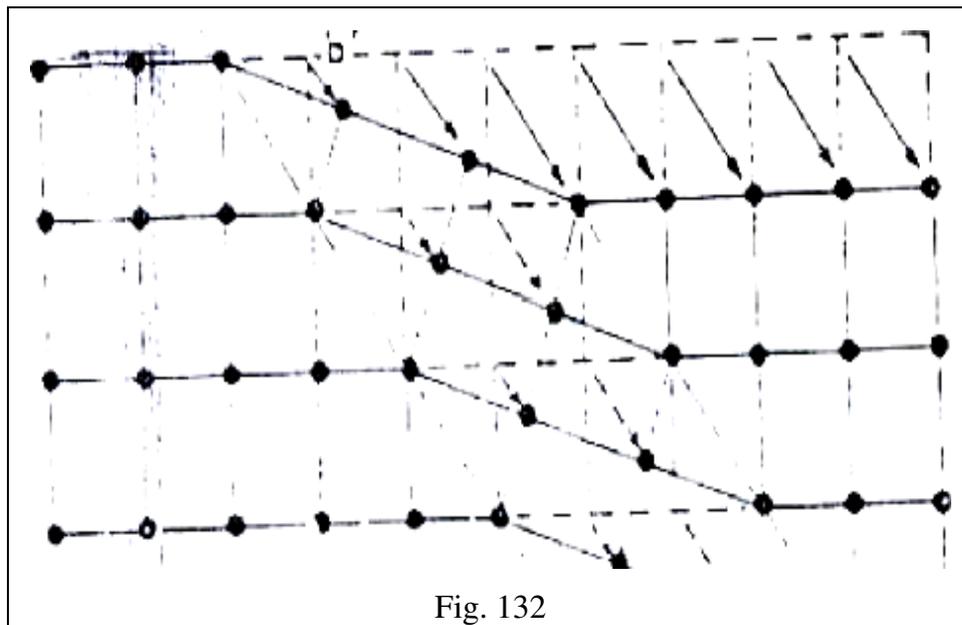
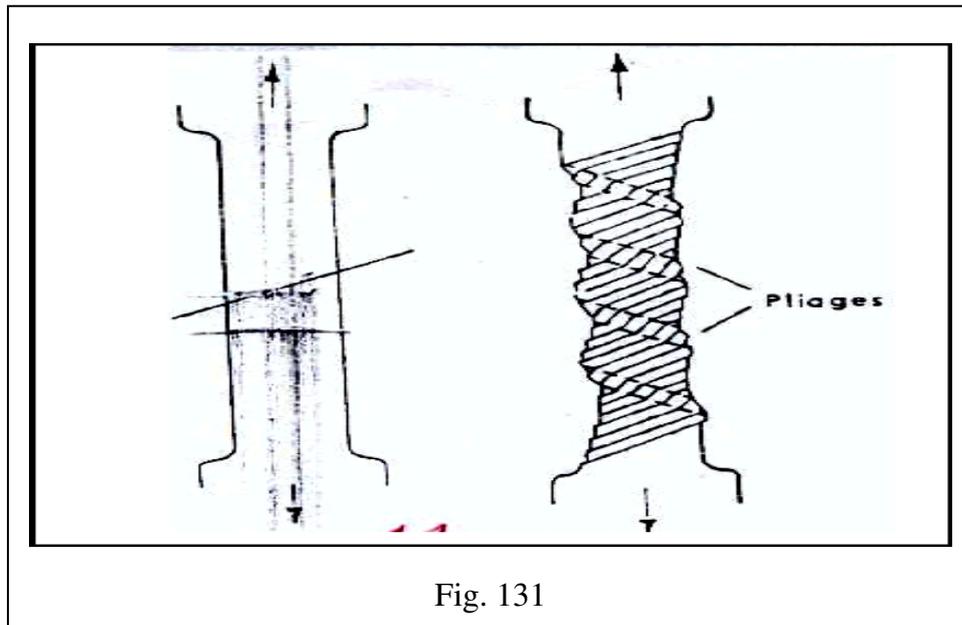
Où ξ est un facteur de l'ordre de l'unité et τ une contrainte qui est sensiblement nulle pour les cristaux CFC.

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. 131 et 132). 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.



8.5. Durcissement par précipitation discontinue

8.5.1. 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.133).

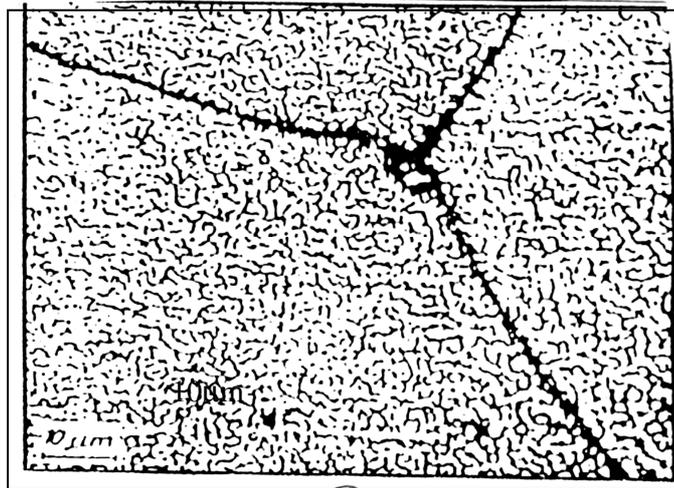


Figure 133. Précipitation continue dans l'alliage Cu-3%Ti

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 134 représente la précipitation discontinue dans l'alliage Cu-3%Ti.

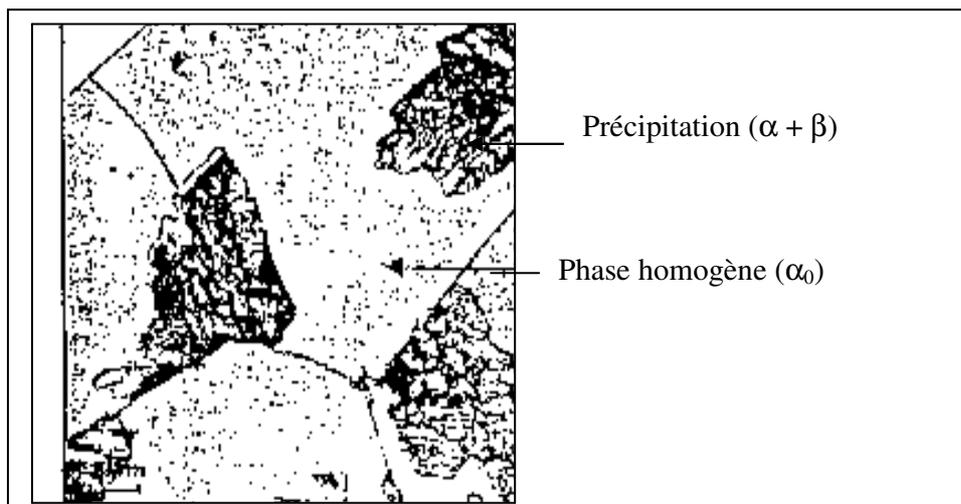
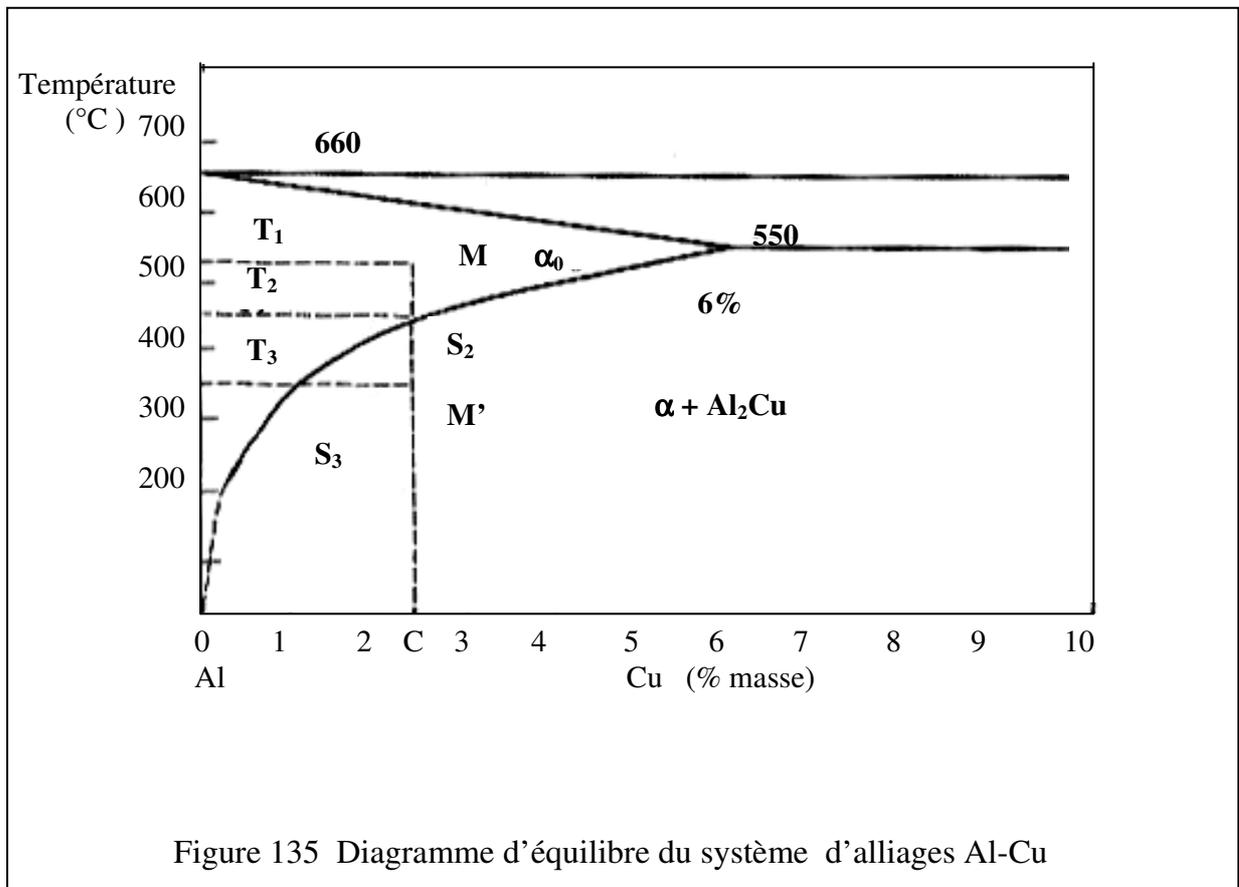


Figure 134. Précipitation discontinue dans l'alliage Cu-3%Ti

8.5.2. Types de précipitation

Le phénomène de précipitation peut-être illustré par l'exemple de la solution solide Alimunium-Cuivre (fig.135).



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 T_1 (point M) dont l'état d'équilibre correspond à un système monophasé, si cet alliage est soumis à un refroidissement rapide de T_1 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 T_3 (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 T_1 à T_2 il n'y a aucune transformation, l'alliage reste homogène, au dessous de T_2 il y a transformation à l'état solide avec apparition d'une nouvelle phase β (Al_2Cu 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.

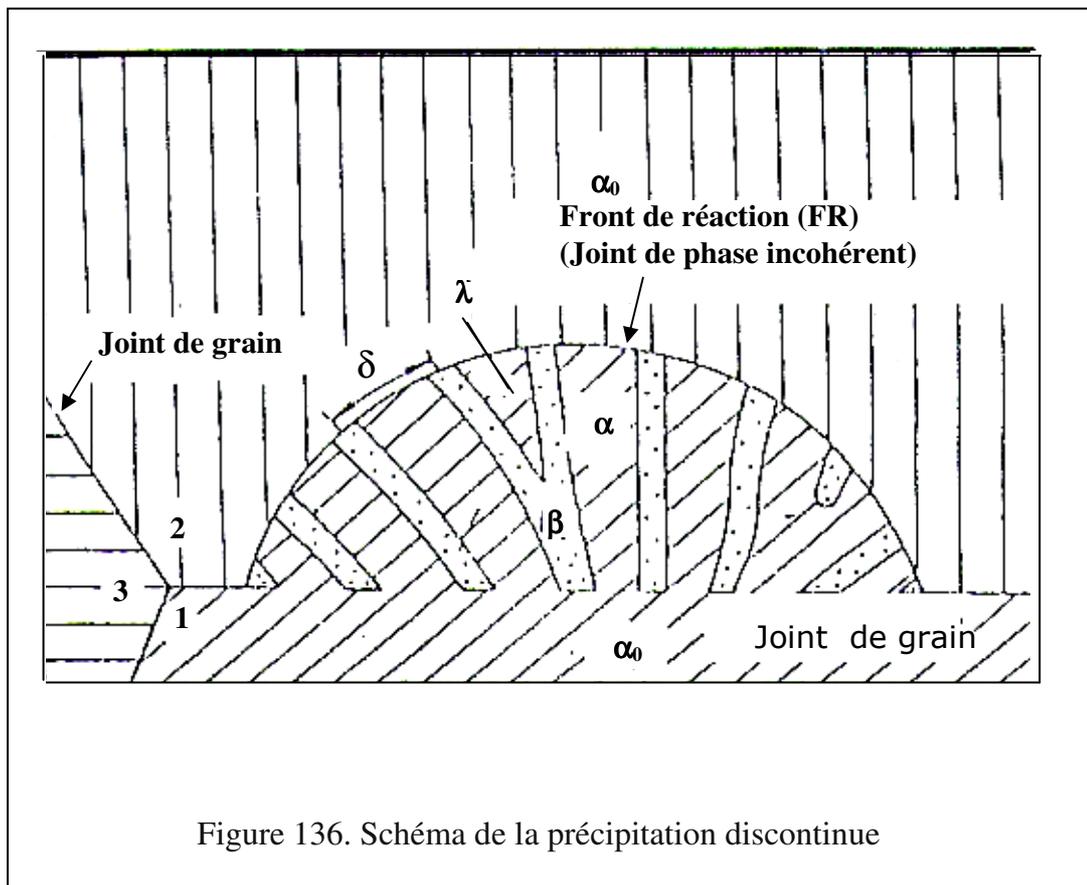
La seconde connue sous le nom de précipitation discontinue ou encore connue auparavant sous l'appellation « le phénomène énigme », car ce n'est qu'en 1949 que Geisler donna des références concernant cette dernière, elle est appelée aussi transformation cellulaire, allusion faite à la morphologie du produit 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 appauvrit 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.136).



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 136 indique une particularité de la précipitation discontinue où la matrice (α) vidée de la cellule de précipitation a 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 137 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 .

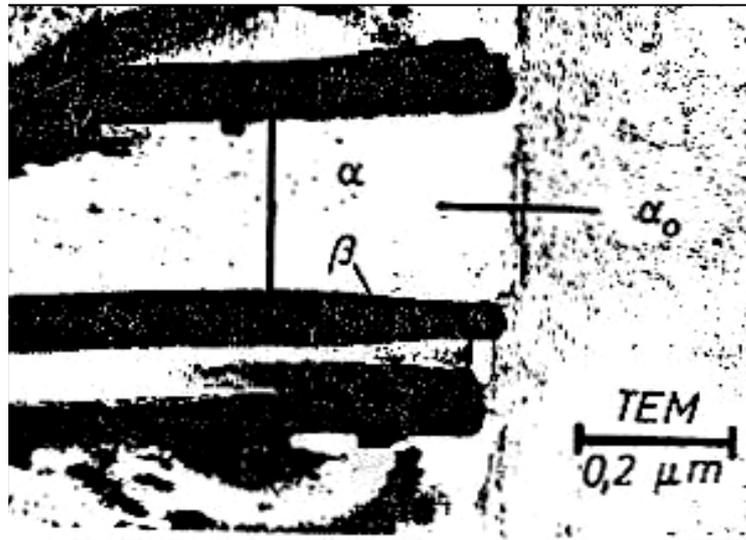


Figure 137. Précipitation discontinue dans l'alliage Mg-8At%Al

9. RESISTANCE DES MATERIAUX

9.1. 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.

9.2. 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.

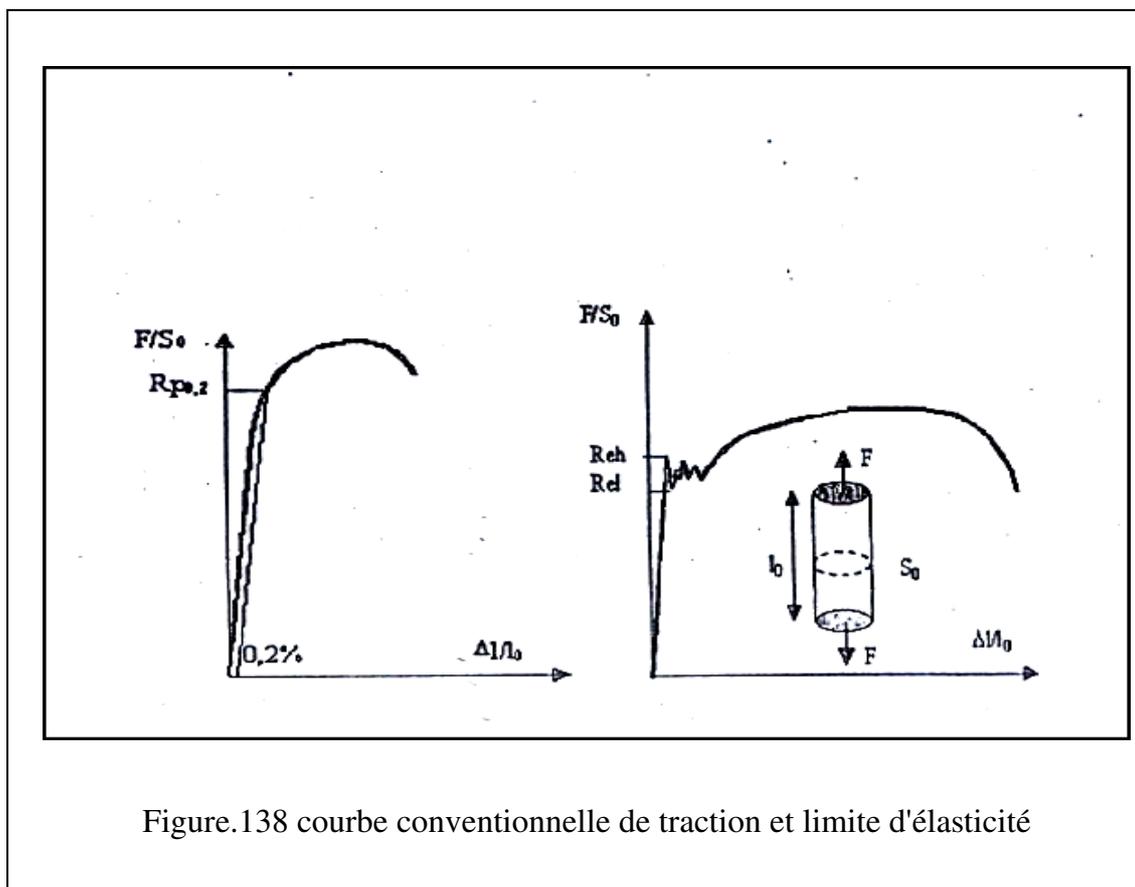
9.3. La limite d'élasticité en traction

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 polycristallins 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 138 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.

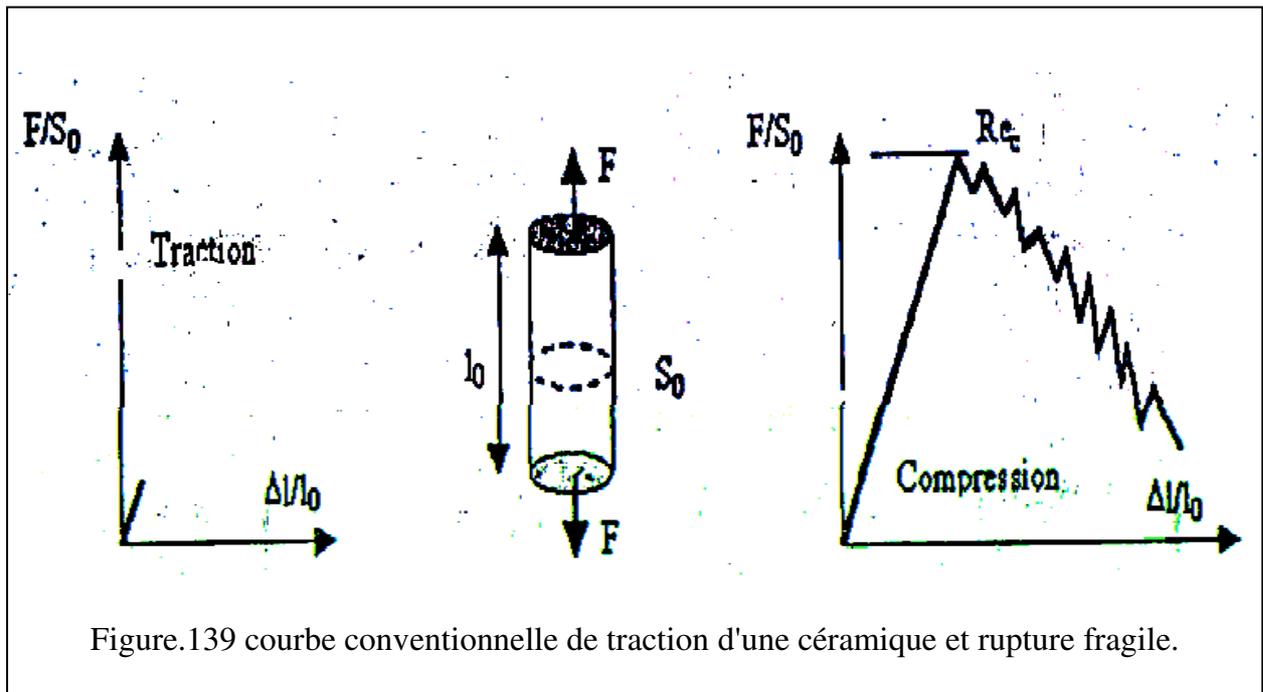


Figure.139 courbe conventionnelle de traction d'une céramique et rupture fragile.

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.

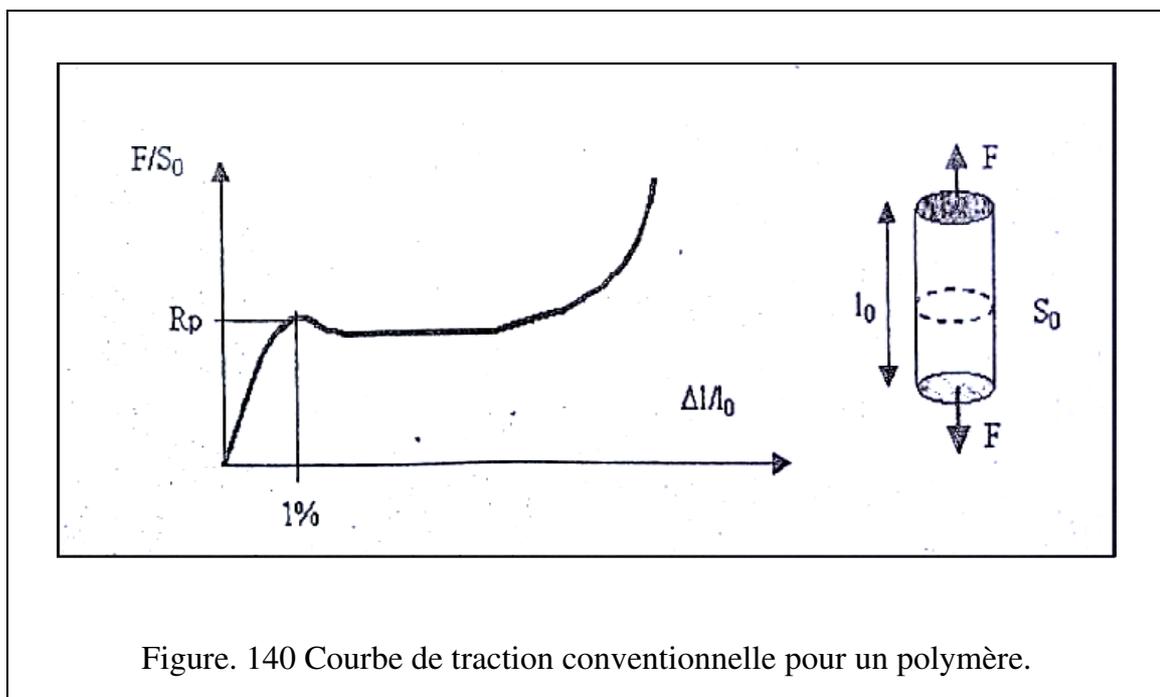


Figure. 140 Courbe de traction conventionnelle pour un polymère.

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%.

9.3.1. 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.

9.4. 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.

9.5. La dureté

Pour les métaux

La dureté caractérise la résistance que présente le matériau à la pénétration d'un pénétrateur sur lequel on exerce un effort. Au cours de l'essai de dureté, l'effort appliqué sur pénétrateur 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 pénétrateur I 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 le pénétrateur après décharge provient de la déformation plastique occasionnée par l'état de contrainte local créée par la charge appliquée sur le pénétrateur . 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'écoulement 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 que 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'écoulement reliant la dureté de Brinell et la résistance à la traction: $HB = 3 R_m$.

9.6. 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_{Ic} 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.

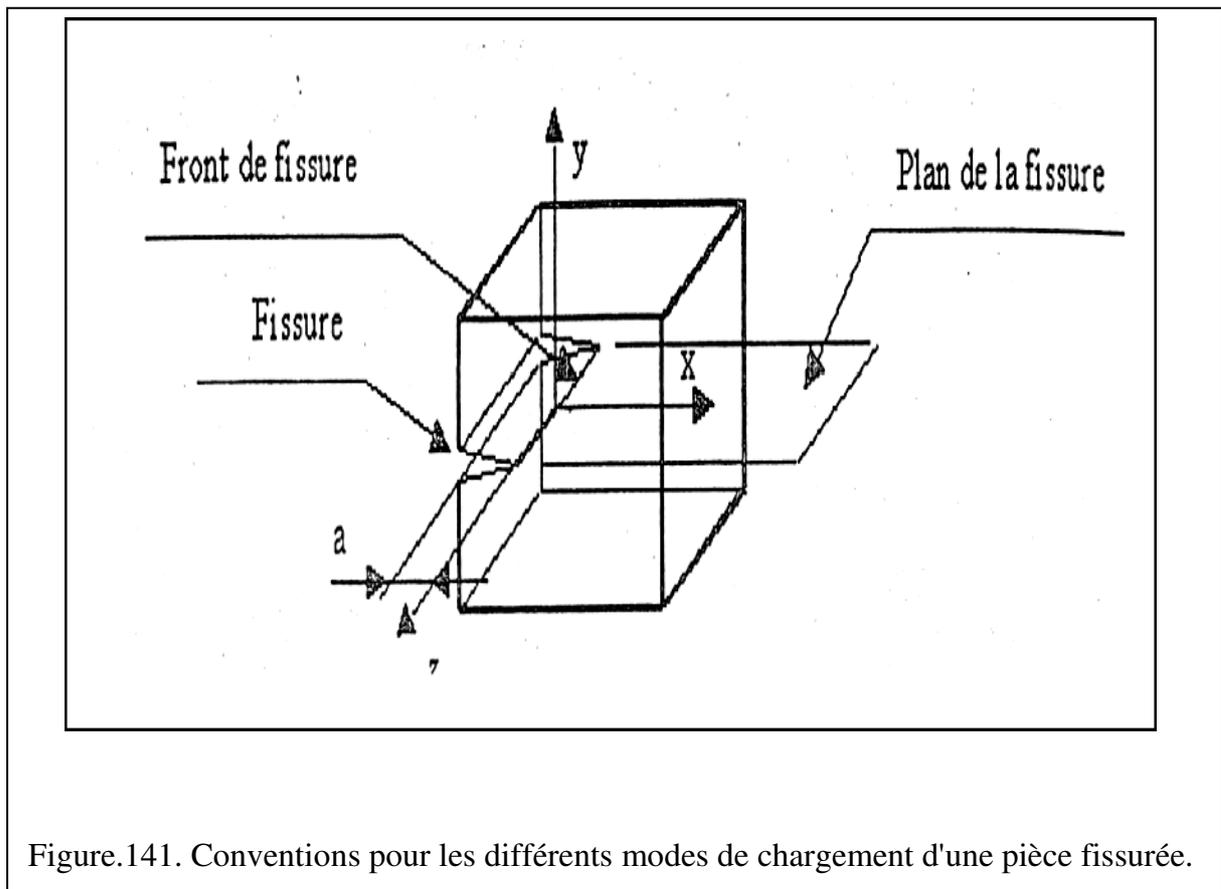


Figure.141. Conventions pour les différents modes de chargement d'une pièce fissurée.

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 s'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.

9.7. 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.

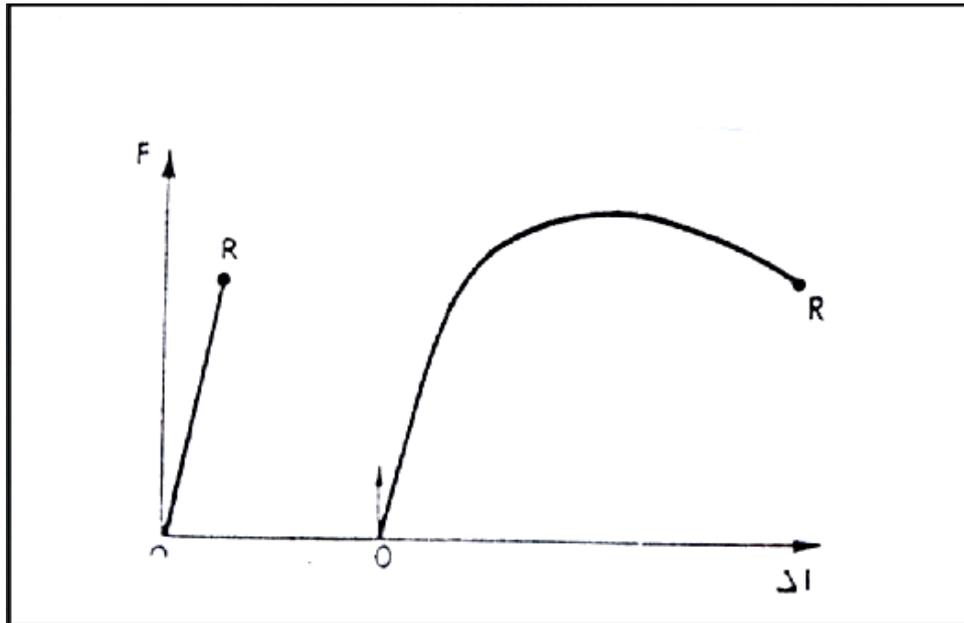


Figure. 142 rupture ductile (à droite); et rupture fragile (à gauche)

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 cristallographiques 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. 143). c'est cet examen qui permet de décider du caractère réellement fragile (fig. 144) ou (fig. 145) 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.

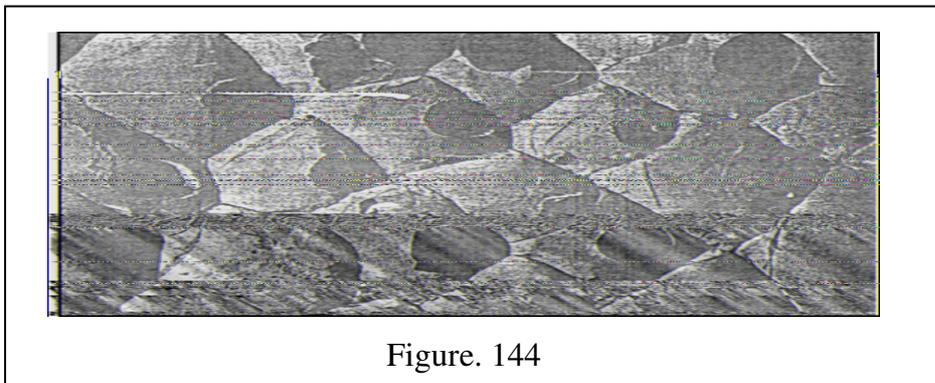
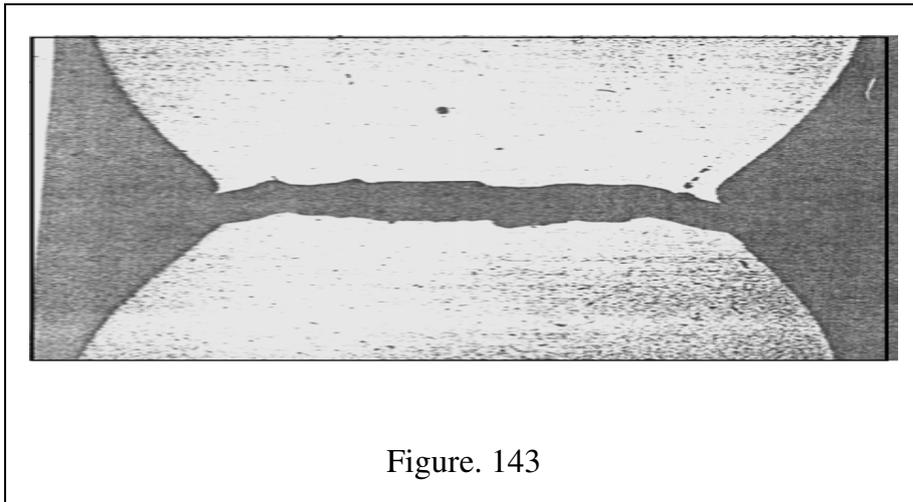




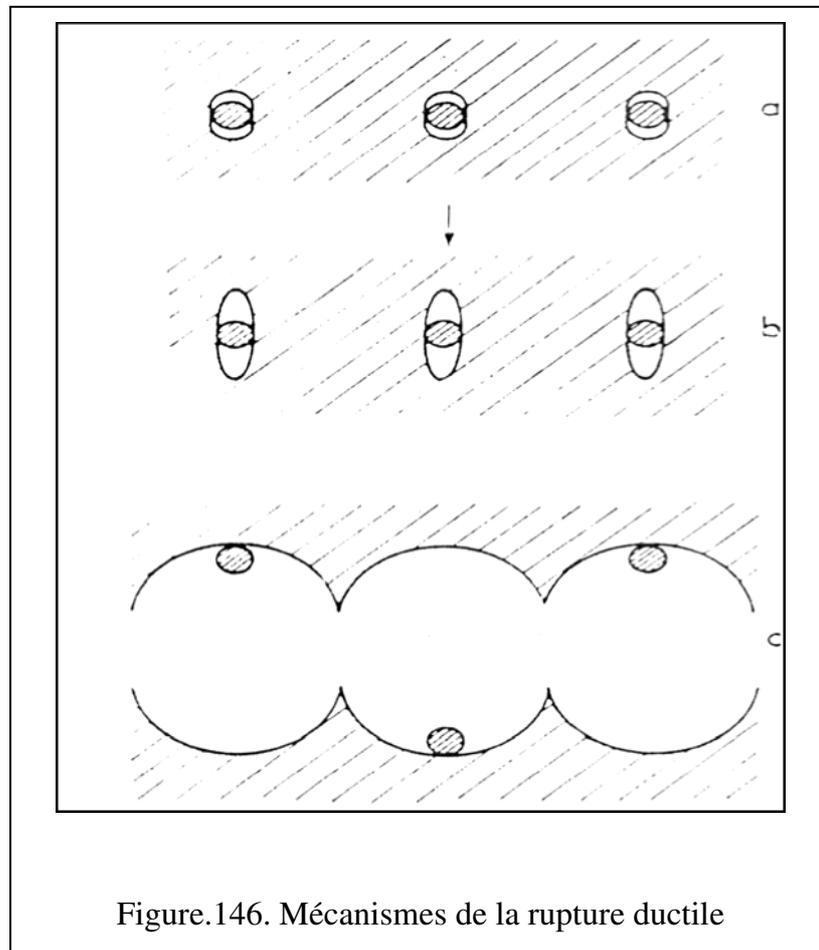
Figure. 145

9.7.1. 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. 146).
- 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.



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.

9.7.2 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.147) 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

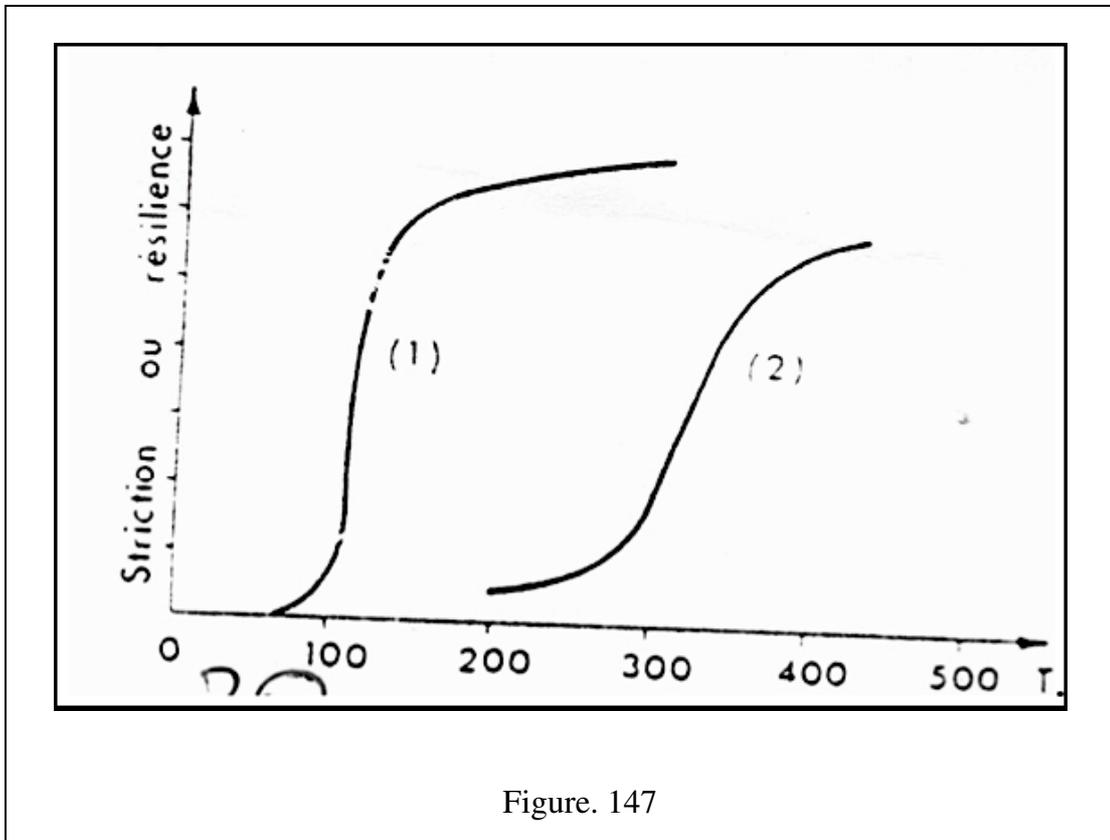


Figure. 147

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, $a=3A$, 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.

9.8. 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.

9.8.1 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

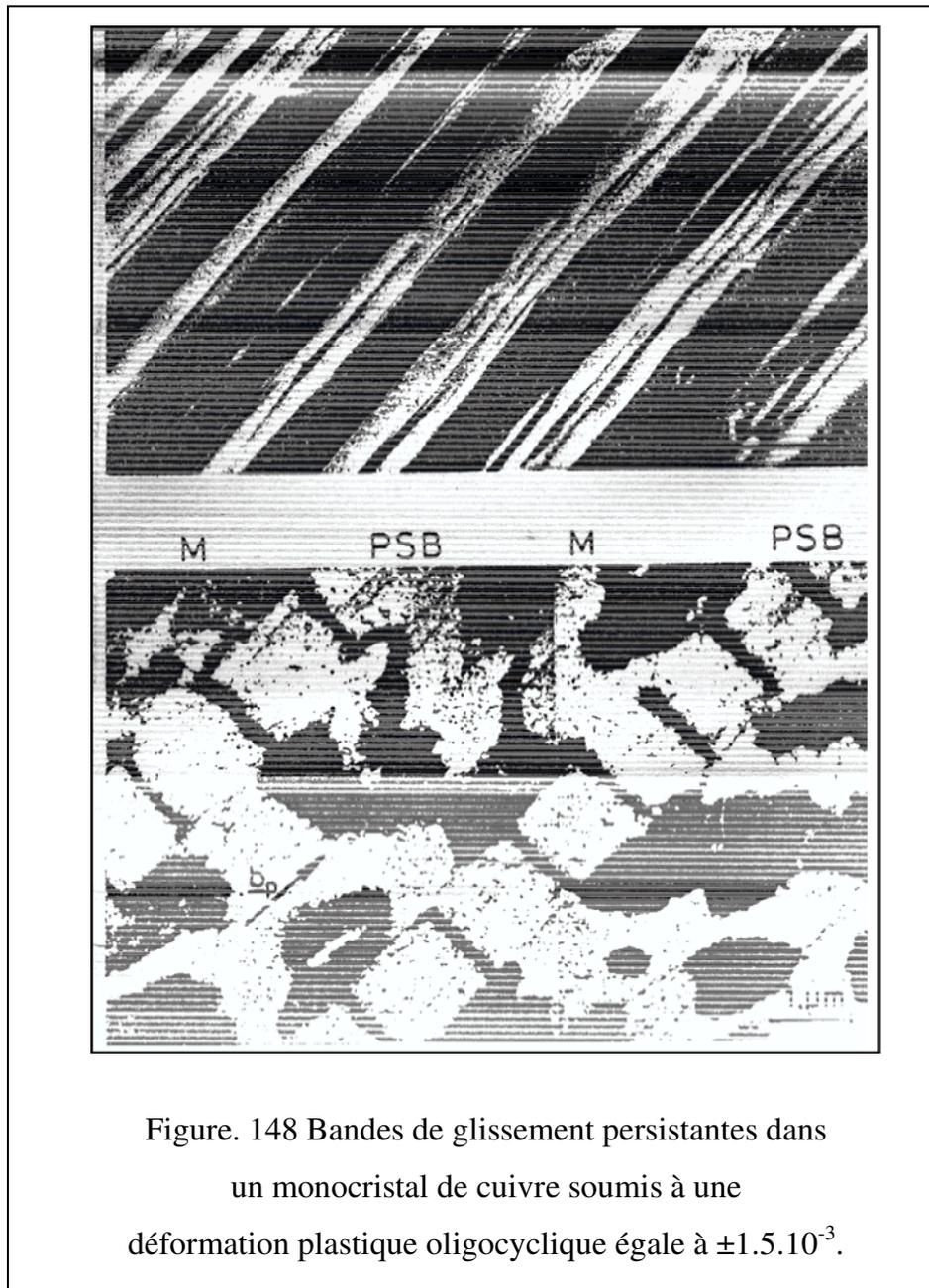
La rupture ne se produit pas avant un nombre donné de cycles, 10^7 ou plus; les microfissures ne peuvent pas se former, ou encore ne peuvent pas atteindre un stade de développement critique. Pour certains métaux comme l'aluminium le passage entre les domaines de fatigue et de sécurité est très progressif, 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.

9.8.2. 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. p 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. 148). 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.



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 149 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. 150).

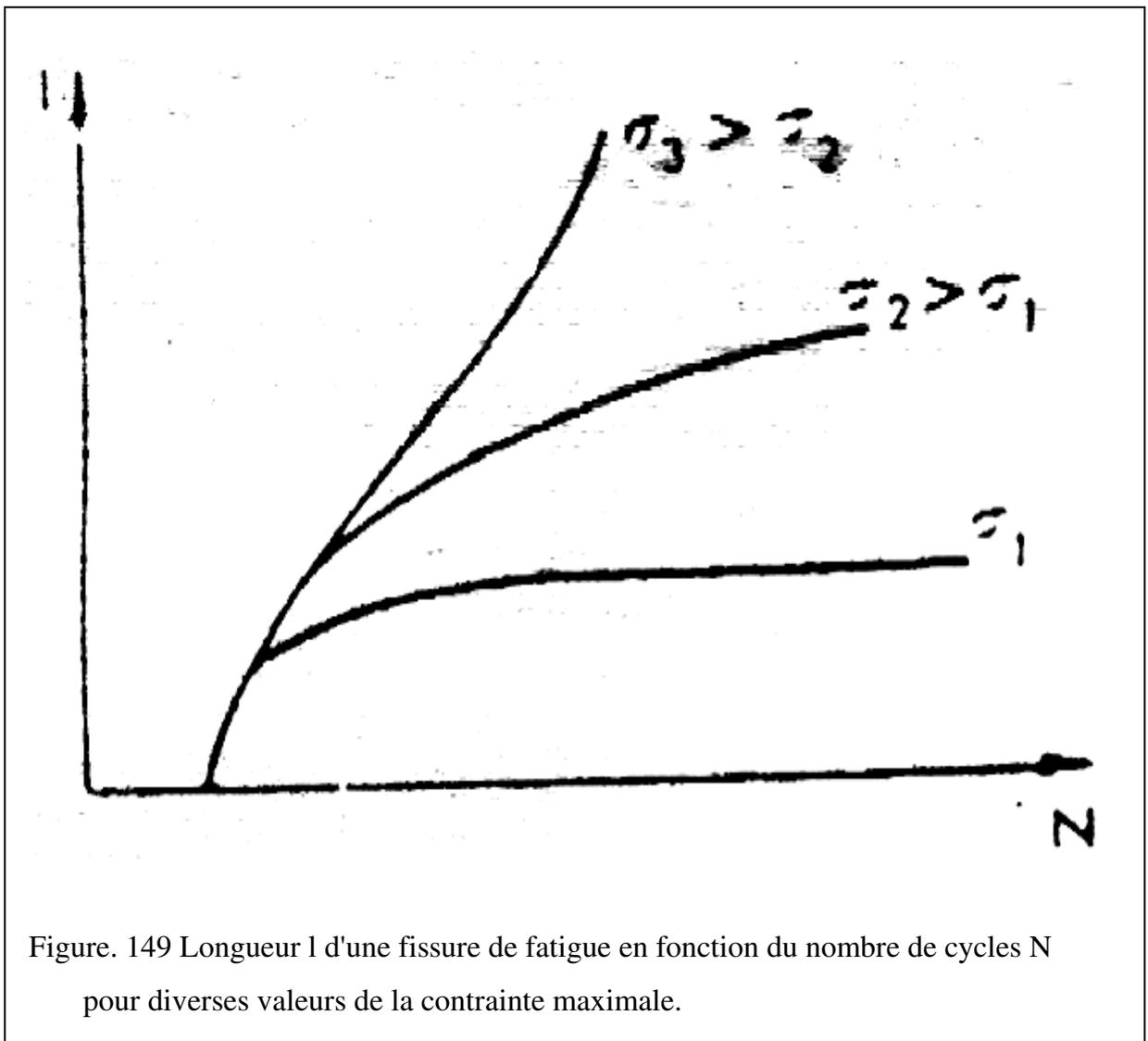


Figure. 149 Longueur l d'une fissure de fatigue en fonction du nombre de cycles N pour diverses valeurs de la contrainte maximale.

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 mono ou 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 décohésion 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.

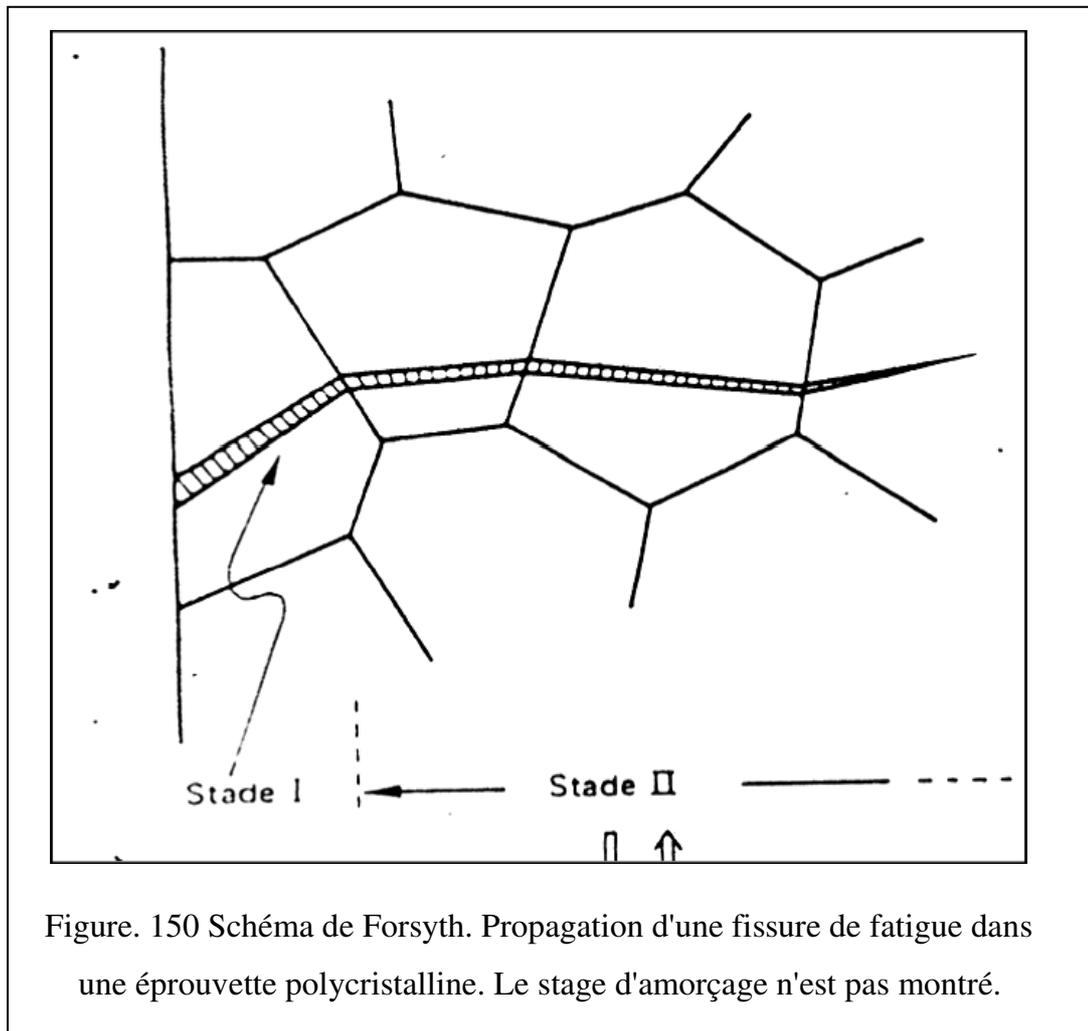
Stade I de la propagation

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 Å 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

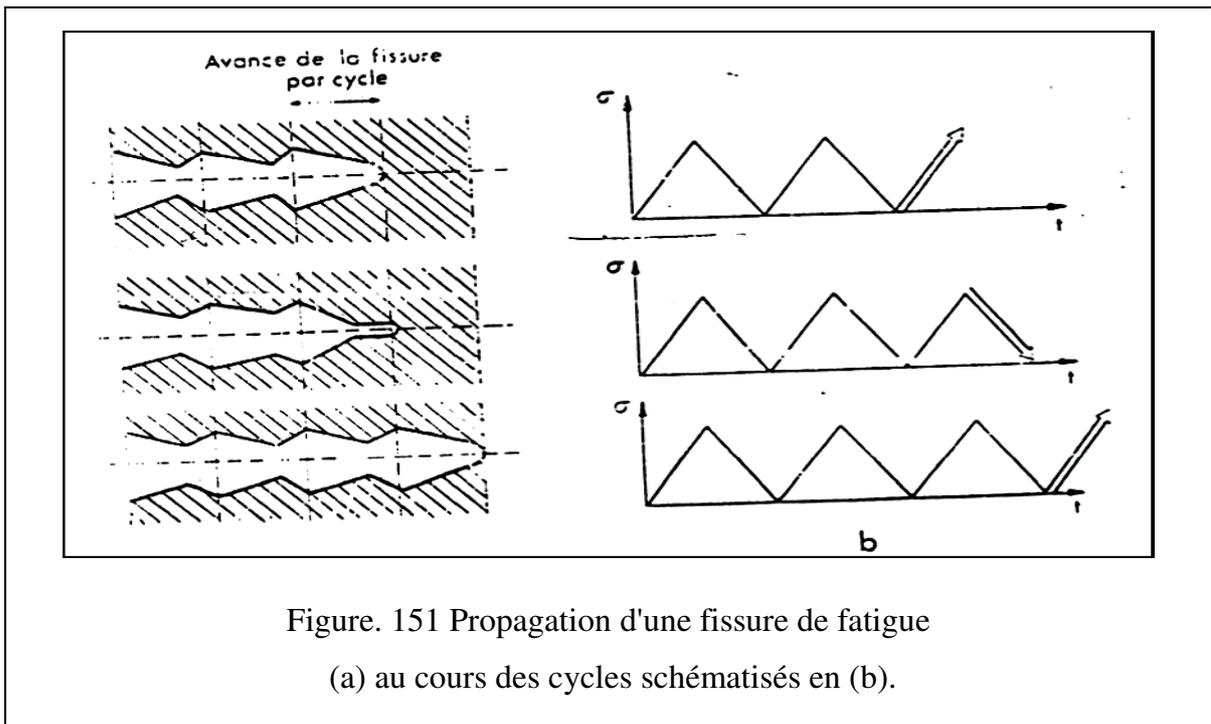
Stade II de propagation

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

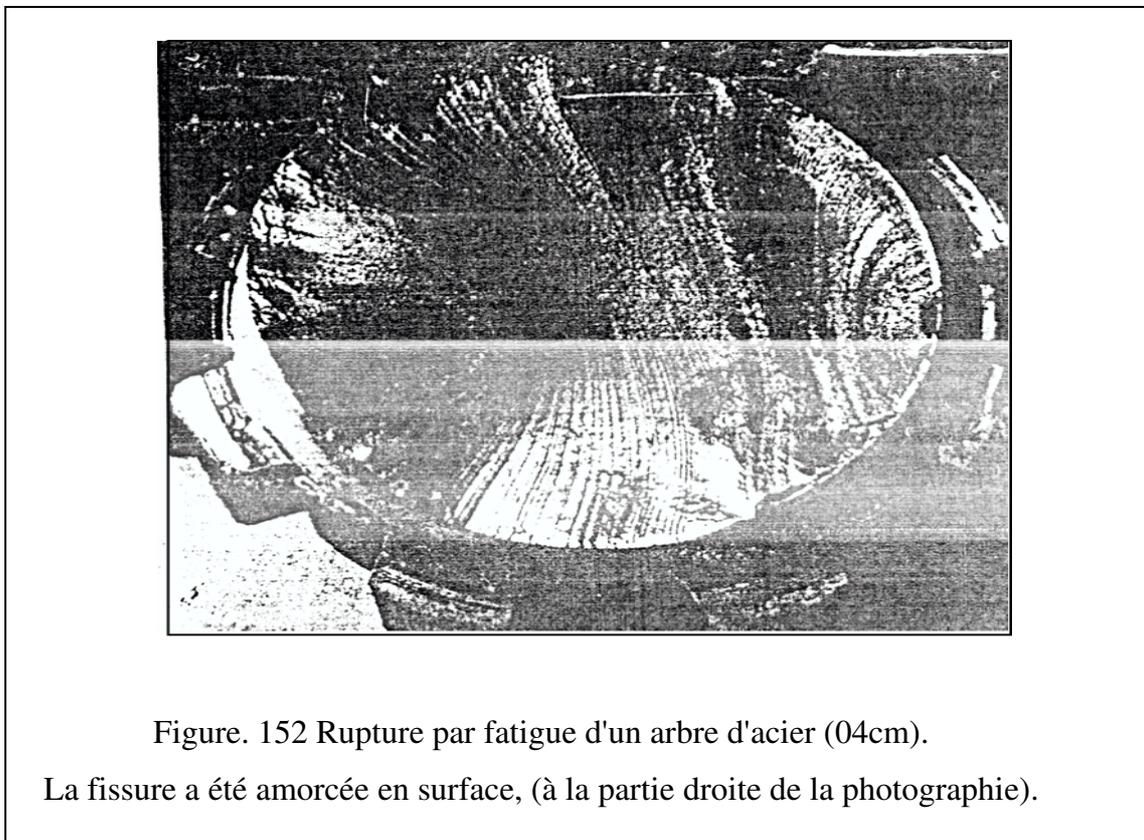
produit à l'ouverture de la fissure. La microscopie électronique a confirmé l'existence de cette double zone plastifiée.



Le mécanisme de progression est schématisé sur la figure 151. 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. 152) 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).



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:



Où K_A 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

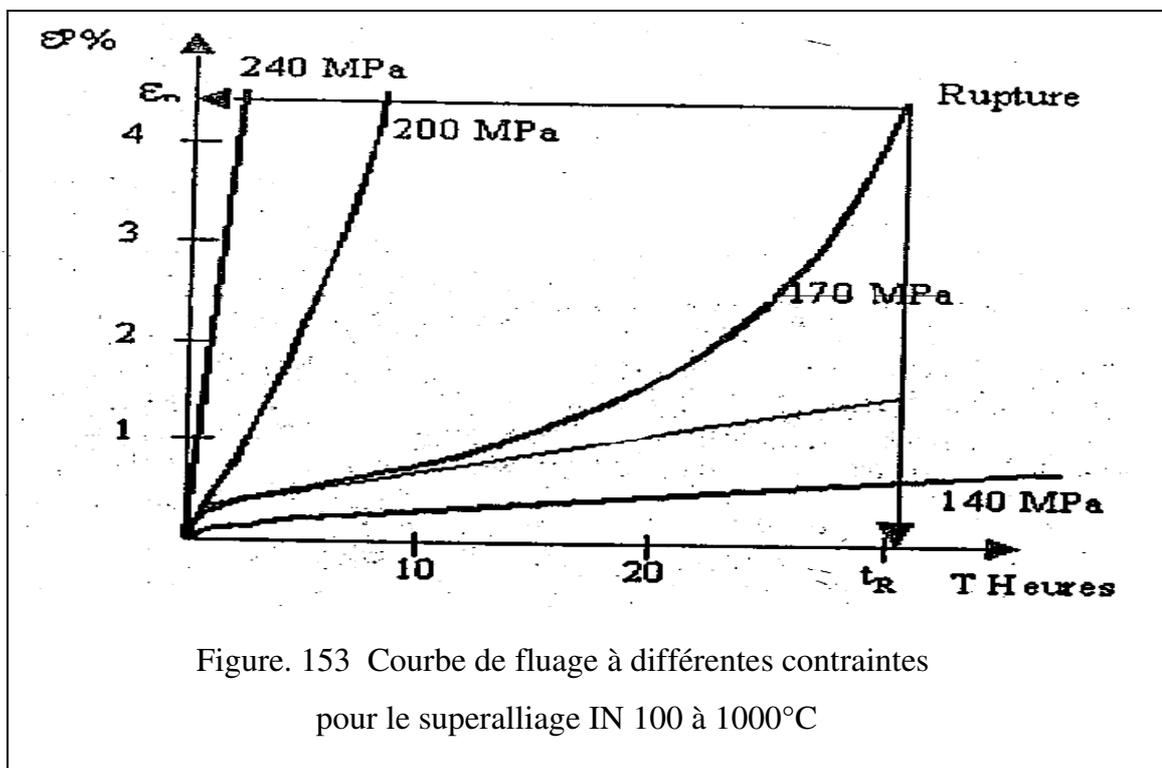
Lorsque la fissure atteint une dimension telle que $K = K_c$.

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 Wöhler 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.

9.9. 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 153 ci-dessous représente l'allure typique d'une courbe de fluage classique.



Ces courbes mettent en évidence trois phases:

- une phase de fluage primaire au cours de laquelle l'écroutissage du matériau engendre une diminution de la vitesse de fluage initialement très grande; cette phase est assez bien représentée par la loi d'Andrade: $E = At I/Q$ 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:

$$E^P = (\sigma / \lambda)^N$$

Où 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 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 définie 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.

BIBLIOGRAPHIE

1. Dessin technique et éléments De construction, J.Duroux, édition André Desvigne, 1982.
2. Dessin industriel, Robert Gautelier, édition société Angalis, 1979.
3. Dessin de construction mécanique, H.Ribérol, édition Delagrave, 1979.
4. Le Dessin technique, deuxième partie, S.Bensaada et D.Feliachi, édition OPU, 1995.
5. Dessin industriel et technologie de construction, 1^{ère} et 2^{ème} partie, A.Cherfia et S.Benisaad, édition OPU, 1995.
6. Dessin industriel (livre 2 et 3), R.Pasquet et P.Burtel, édition hachette, 1951.
7. Cours de dessin, Claude Sirault, édition A. de Boeck, 1977.
8. Einführung in die werkstoffwissenschaft, Prof. Dr. W.Schatt, édition Veb Deutscher Verlag Leipzig, 1973.
9. Werkstoffkunde stahl und eisen I.,Eckstein, édition Veb, Deutscher Verlag Leipzig, 1971.
10. Matériaux, J.Lignon et M.Mijon, édition librairie Delagrave, 1967.
11. Werkstoffkunde stahl und eisen II, Eckstein, édition Veb, Deutscher Verlag Leipzig, 1972.
12. Matériaux, tome 1 et 2, N.Bouaoudja, édition OPU, 1992.
13. Métallographie, Schuman, édition Veb Deutscher Verlag Leipzig, 1975.
14. Métallurgie, élaboration des métaux, C.Chaussin et G.Hilly, édition Dunod Paris, 1972.
15. Métallographie et traitements thermiques des métaux, I.Lakhtine, édition Mir Moscou, 1978.
16. Modellbau fier giesserei, édition Veb Fachbuchverlag Liepzig, 1972.
17. Giessereitechnik, R.Helmut, édition Fur Hochschulwesen Karlmarx Sstadt, 1976.
18. Technologie professionnelle générale, A.Castel et A.Dupont, édition Desfarges Paris, 1980.

19. Cours techniques de soudage, Centre d'étude thermique et électrique, Sud-ouest Bordeaux.
20. Le soudage et le coupage des métaux, V.Rybakov, édition Mir Moscou, 1980.
21. Le soudage, S.Benisaad, édition OPU, 1992.
22. Le soudage oxyacéthylique, C.Leroux et J.Gilles Gingres, édition Guerrin Montréal, 1980.
23. Korrosion und korrosionsschutz, Collectif d'auteurs, édition Veb Deutcher Verlag Leipzig, 1973.
24. Matériaux et Corrosion, édition Masson Paris, 1989.
25. Corrosion et chimie de surface des métaux, Diter Landolt, édition presses polytechniques et universitaires romandes.
26. Corrosion et protection, H.Uhlig, édition Dunod Paris, 1970.

S O M M A I R E

1. Métaux et alliages non ferreux.....	3
2. Corrosion.....	90
3. Moulage.....	172
4. Soudage.....	217
5. Etat de surface.....	296
6. Frottement et Lubrification	306
7. Usure et propriétés des matériaux.....	333
8. Elasticité	370
9. Résistance des matériaux	387