

7. CLASSIFICATION DES ACIERS ET DES FONTES

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

7.1. Classification des aciers

7.1.1. Aciers de construction

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

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

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

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

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

a. Les aciers calmés :

Ils sont obtenus par désoxygénation complète du métal dans le four puis dans une poche de coulée. Ces aciers contiennent une quantité minimale de protoxyde de fer en assurant ainsi une solidification « calme » du métal dans la lingotière, qui s'accompagne de diminution de volume. A la partie supérieure du lingot solidifié, se forme une retassure et une porosité dues au retrait éliminées par chauffage lors du laminage.

b. Les aciers effervescent :

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

c. Les aciers semi-calmés :

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

7.1.1.2. Aciers de construction ordinaires (aciers courants)

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

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

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

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

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

7.1.1.3. Aciers de construction de qualité

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

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

Les aciers à teneur moyenne en carbone ($0,3$ à $0,5$ %), s'emploient après une normalisation, une amélioration et une trempe superficielle pour des pièces très variées dans la construction mécanique (vilebrequins, bielles, pignons, tiges, etc.). A l'état normalisé, la résistance de ces aciers est plus grande que celle des aciers à bas carbone, alors que la

plasticité est plus basse. A l'état recuit, ces aciers se prêtent bien à l'usinage. L'acier à 0,45 % C est souvent utilisé pour les roues dentées et les arbres.

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

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

7.1.2. Aciers de décolletage

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

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

Exemples :

- Acier à 0,12 % C, $R = 420 \text{ N/mm}^2$, $HB = 160$, $A = 22 \%$.
- Acier à 0,40 % C, $R = 600 \text{ N/mm}^2$, $HB = 207$, $A = 14 \%$.

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

Les aciers de décolletage étirés à froid (écrouis) ont une résistance assez élevée (jusqu'à 800 N/mm^2), l'emploi de ces aciers est destiné à la fabrication de vis, de boulons, d'écrous, ainsi qu'aux pièces fortement sollicitées.

7.1.3. Aciers d'amélioration

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

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

7.1.3.1. Aciers alliés au chrome

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

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

7.1.3.2. Aciers alliés au chrome-manganèse.

L'addition combinée de chrome (0,9 à 1,2 %) et du manganèse (0,9 à 1,2) % permet d'accroître suffisamment la résistance et la pénétration de trempe. Ces aciers s'emploient pour des pièces de sections variant de 20 à 40 mm. L'addition supplémentaire de titane à l'acier, abaisse son aptitude à la surchauffe.

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

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

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

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

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

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

7.1.3.4. Aciers alliés au chrome-nickel

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

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

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

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

7.1.4. Aciers de cémentation

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

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

7.1.4.1. Aciers alliés au chrome

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

- R = (700 à 800) N/mm².
- Re = (500 à 650) N/mm².
- A = (11 à 12) %.
- K = (60 à 70) J/cm².

7.1.4.2. Aciers alliés au chrome-vanadium

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

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

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

7.1.4.3. Aciers alliés au chrome-nickel

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

Ces aciers sont employés pour les grosses pièces supportant, en service, des charges dynamiques importantes. Ils sont peu susceptibles de surchauffe en cémentation prolongée et n'ont pas de tendance à la sursaturation en carbone de la couche superficielle. L'addition de tungstène ou de molybdène aux aciers au chrome-nickel, accroît la stabilité de l'austénite surfusionnée et par conséquent, la pénétration de trempe.

7.1.4.4. Aciers alliés au chrome-manganèse

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

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

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

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

7.1.5. Aciers de nitruration

Appliquée à un acier non allié, la nitruration ne donne qu'un durcissement faible et la pénétration de l'azote en profondeur fragilise les pièces. Par contre, il suffit d'introduire une faible quantité d'aluminium (1 à 2) % ou éventuellement d'autres éléments d'alliage, tels que le chrome, pour que la consolidation en surface s'intensifie sans affecter le cœur. L'addition d'une certaine quantité de molybdène, assure le maintien prolongé à 550°C et ne change pas la résilience (pas de fragilisation).

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

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

7.1.6. Aciers pour constructions soudées

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

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

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

7.1.7. Aciers à ressorts

Les aciers à ressorts doivent répondre aux exigences suivantes :

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

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

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

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

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

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

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

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

7.1.8. Aciers à roulements

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

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

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

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

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

7.1.9. Aciers à haute résistance (Maraging)

Les exigences de ces aciers sont les suivantes :

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

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

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

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

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

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

7.1.10. Aciers à haute tenue à l'usure

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

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

7.1.10.1. Aciers austénitiques au manganèse

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

Ces aciers n'ont pas une dureté particulièrement élevée, mais ils possèdent une aptitude remarquable à s'écrouir sous l'effet de faibles déformations plastiques. Ils ont de ce fait, une très bonne tenue au frottement, convenablement traités, ils sont très peu fragiles. Leur haute aptitude à s'écrouir, les empêche d'être usinables et ils ne peuvent être mis en forme que par moulage et rectification. Après coulée, ils sont constitués d'austénite et de carbure en excès (Fe, Mn)₃C, qui se précipite aux joints de grains en altérant la résistance et la ductilité.

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

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

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

7.1.10.2. Aciers martensitiques au chrome

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

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

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

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

7.1.11 Aciers résistant à chaud

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

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

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

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

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

7.1.11.1. Aciers perlitiques

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

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

7.1.11.2. Aciers martensitiques résistant à chaud

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

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

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

7.1.11.3 Aciers austénitiques résistant à chaud

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

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

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

7.1.11.4. Austénites complexes

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

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

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

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

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

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

7.1.12.1. Aciers inoxydables au chrome

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

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

Malgré sa faible teneur en carbone, l'acier Z3 C13 prend partiellement par la trempe, une structure martensitique. L'acier est inoxydable, grâce à la présence d'aluminium (0,2 %). Ces deux nuances sont soudables. La tenue à la corrosion des aciers à 13% Cr est meilleur, mais à condition que tout le chrome soit à l'état de solution solide. Dans ce cas, il forme à la surface une couche protectrice dense de type Cr_2O_3 .

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

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

7.1.12.2. Aciers inoxydables au chrome-nickel

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

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

Des nuances voisines à celles mentionnées dans le tableau, teneurs en carbone plus élevée, permettent d'améliorer la coulabilité en moulage. Les teneurs en nickel peuvent être abaissées en raison de l'influence gammagène du carbone. Les aciers inoxydables au chrome-nickel coûtent très chers. C'est pourquoi, on a recours à des aciers moins coûteux dans lesquels le nickel est remplacé par le manganèse. Ces aciers servent dans la fabrication des appareils travaillant dans des milieux faiblement corrosifs.

Par trempe (1050°C), les aciers au Cr-Ni-Mn, acquièrent une structure austénitique. Dans le domaine de déformation, ils subissent, d'une part, un fort durcissement, et d'autre part, une transformation partielle en martensite.

Les tableaux suivants résument différentes nuances d'aciers inoxydables ferritiques, austénitiques et martensitiques ainsi que leurs domaines d'applications.

a. Aciers inoxydables ferritiques :

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

b. Aciers inoxydables austénitiques :

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

c. Aciers inoxydables martensitiques :

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

7.2. Aciers à outils

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

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

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

On distingue actuellement quatre classes d'aciers à outils :

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

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

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

7.2.1. Aciers à outils de la classe 1

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

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

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

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

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

Les aciers au carbone présentent les avantages suivants :

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

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

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

Recuit : recuit d'adoucissement, E : eau, H : huile

7.2.2. Aciers à outils de la classe 2

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

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

7.2.2.1. Aciers au manganèse et au manganèse-vanadium

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

7.2.2.2. Aciers au chrome

La composition moyenne comporte les additions suivantes : (1 à 2,1) % C, (0,2 à 1,3) % Cr, (0 à 0,25) % V. Les aciers à faible teneur en chrome présentent une faible trempabilité et

sont employés pour de petits outils à fabriquer en grande série (mèches, tarauds, ...), et pour des pièces demandant une bonne tenue au choc ou à la flexion (extracteurs, butées, ...).

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

7.2.2.3. Aciers au chrome-molybdène

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

7.2.2.4. Aciers au chrome-tungstène

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

7.2.2.5. Aciers au nickel-chrome

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

7.2.3. Aciers à outils de la classe 3

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

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

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

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

La nuance au Cr-W, repérée sous le numéro 1 dans le tableau précédent, possède une grande résistance à l'état traité, une haute limite de fatigue notamment aux chocs répétés et une bonne stabilité au revenu jusqu'à 500°C. On l'emploie comme outillage travaillant aux

chocs à des températures moyennes : poinçons de perçage, lames de cisailles à chaud, petites matrices diverses.

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

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

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

7.2.4. Aciers à outils de la classe 4

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

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

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

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

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

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

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

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

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

7.2.4.1. Aciers rapides courants

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

7.2.4.2. Aciers rapides au tungstène-molybdène

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

7.2.4.3. Aciers extra-rapides

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

7.2.4.4. Aciers rapides spéciaux au cobalt

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

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

7.2.4.5. Aciers rapides à haute teneur en vanadium

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

7.2.4.6. Aciers au molybdène-cobalt

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

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

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

a. Aciers rapides au tungstène :

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

a. Aciers rapides au molybdène :

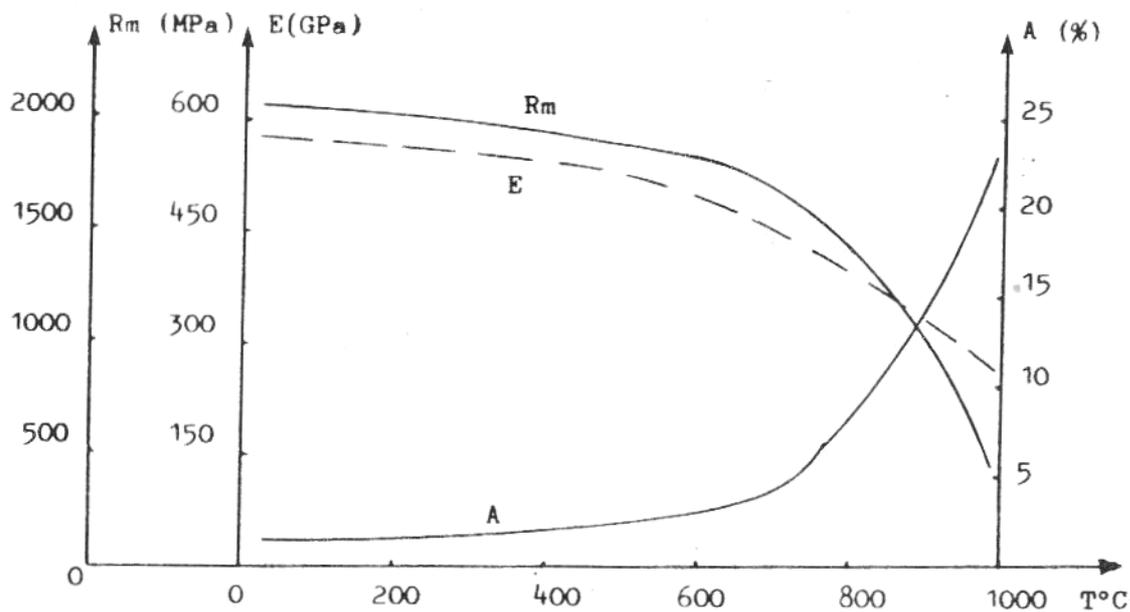
Analyse		HB état recuit	Rm (dan/mm ²)	Applications	Matériaux
Elément	%				
C	1,2	235	90	Outils soumis à des contraintes élevées, dégrossissage et finition sur tours.	Aciers austénitiques et alliages de grande résistance.
W	9,5	-	-		
Mo	4,0	277	95		
V	3,5				
Co	10,5				
C	0,8	235	90	Scies à métaux, scies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

7.2.5. Carbures métalliques à outils

On appelle carbures métalliques, les alliages constitués de tungstène et de titane, alliés au cobalt. Les carbures de tungstène WC et de titane TiC, très durs et fragiles sont agglomérés par une phase ductile de cobalt.

Les carbures métalliques contiennent en général (85 à 36) % WC, (6 à 60) % TiC et (3 à 25) % Co. La dureté et la tenue à l'usure des carbures métalliques restent importantes jusqu'à 800°C. Ils permettent de travailler avec une arête tranchante échauffée jusqu'à des températures plus élevées que dans le cas des aciers à outils, (fig. 139), ce qui veut dire qu'ils peuvent être utilisés à des vitesses de coupe plus grandes.

Les alliages au titane-tungstène s'emploient essentiellement pour l'usage des aciers au carbone et alliés. Ils sont élaborés sous forme de plaquettes fixées aux supports, généralement en acier ordinaire, non pas par fusion, mais par frittage. A cet effet, les poudres TiC et WC, finement broyées (1 à 3) μm et mélangées à du cobalt pulvérisé dans des proportions bien définies, sont compactées puis elles sont frittées vers 1500°C.



Variation Rm, E, A = f(T) de la nuance WC + 6,5 % Co.

(fig.139)

7.3. Aciers et alliages spéciaux

Cette partie du chapitre est consacrée à quelques aciers et alliages ayant des propriétés physiques particulières et dont les caractéristiques mécaniques présentent un intérêt secondaire.

7.3.1. Aciers et alliages à aimants

On distingue trois groupes d'aciers et alliages : durs, doux et amagnétique.

7.3.1.1. Aciers et alliages magnétiques durs

L'énergie nécessaire pour inverser l'aimantation d'un matériau ferromagnétique est proportionnelle au produit de l'induction rémanente B_r et la force coercitive H_c . Dans les métaux ferromagnétiques, la grandeur B_r est définie par la saturation magnétique, par

conséquent, pour accroître l'énergie magnétique, il faut augmenter H_c . Pour augmenter la force coercitive, il faut que la structure de l'alliage comporte des défauts de structure (lacunes, dislocations, blocs, ...), qui constituent une distorsion du réseau cristallin.

Pour la fabrication des aimants, on utilise les aciers à haut carbone, environ 1 % C, additionnés de chrome, de tungstène, de cobalt, ... Ces aciers se prêtent bien à l'usinage et au corroyage, mais possèdent une énergie magnétique relativement faible. Ainsi, on les utilise pour les aimants peu importants. Les alliages les plus importants dans l'industrie des aimants sont ceux à base des éléments de transition Fe, Co et Ni, additionnés également de Cu, Al, Co, Ti, Nb, pour augmenter la force coercitive. Ces alliages sont durs et fragiles, donc ils ne se déforment pas. Les aimants s'obtiennent selon la forme par moulage, suivi de rectification.

Pour obtenir des propriétés magnétiques élevées de ces alliages, on procède au chauffage vers 1200 à 1300°C, puis d'une trempe à une vitesse propre pour chaque type d'alliage, suivie d'un revenu vers 550 à 650°C.

7.3.1.2. Aciers magnétiques doux

Ces aciers sont employés dans le domaine de l'électrotechnique. Les aciers à faible teneur en carbone (0,05 à 0,005) %, et contenant du silicium (0,8 à 4,8) %, sont très employés pour les tôles magnétiques. Ils doivent avoir :

- Une faible force coercitive H_c .
- Une haute perméabilité magnétique.
- Des pertes par hystérésis très faibles.

Pour avoir ces caractéristiques, le matériau ferromagnétique doit avoir une structure homogène (solution solide ou métal pur), et doit être purifié des impuretés et des inclusions telles que la cémentite, l'oxygène et le soufre. Le matériau doit être complètement recristallisé (vers 1200°C), afin d'éviter les effets de l'écroutissage (forte réduction du paramètre μ et accroissement de H_c).

Le silicium forme avec le fer une solution solide, ce qui permet d'augmenter la résistance électrique, et donc de diminuer les pertes de courants tourbillonnaires. De plus, le silicium augmente la perméabilité magnétique, abaisse quelque peu la force coercitive et les pertes par hystérésis.

L'estampage à froid, la coupe, l'enroulement des noyaux à tôles dégradent les propriétés magnétiques des aciers, c'est pour cela, qu'il est recommandé d'appliquer un recuit entre 750 et 790°C. L'acier pour transformateur est livré sous forme de bandes et tôles laminées à froid, et ayant une texture magnétique orientée.

a. Permaloy :

Ce sont les alliages à permittivité initiale et à permittivité maximale élevées, permettant d'obtenir une induction magnétique importante et de faibles champs. Les permalloys sont à base de nickel (40 à 80) %, et contiennent souvent du molybdène et du chrome.

b. Ferrites :

Les ferrites sont des oxydes complexes de fer et de métaux bivalents de types $n\text{Mo}.m\text{Fe}_2\text{O}_3$ (où M est un métal bivalent) obtenus par agglomération de poudres. Leurs caractéristiques sont essentiellement la résistivité élevée (10^3 à 10^7) Ωcm et la magnétisation de saturation relativement faible.

Les ferrites s'emploient dans le cas des hautes fréquences et des hyperfréquences lorsque l'utilisation des ferromagnétiques devient impossible par les grandes pertes en énergie électromagnétique. Elles servent en radio-électronique et en radiotechnique pour la fabrication des antennes à tiges magnétiques, des noyaux des amplificateurs, etc. Les ferrites en $\text{MgO-MnO-Fe}_2\text{O}_3$ servent de mémoires d'ordinateurs.

7.3.2. Aciers et alliages pour éléments chauffants

La présence d'une solution solide dans un alliage favorise l'obtention d'une haute résistance électrique. Les aciers et alliages prévus comme éléments chauffants, doivent posséder une bonne tenue à l'oxydation à chaud et une résistance suffisante au chauffage pour pouvoir conserver en service leurs formes.

On emploie, le plus souvent, les aciers au chrome-aluminium à basse teneur en carbone de type ferritique (fechral et chromal). Plus la teneur en chrome et en aluminium est élevée, meilleures sont les caractéristiques des éléments de chauffage. Les aciers au Cr-Al sont peu plastiques, ainsi pour en faire des éléments, le métal doit être chauffé vers 200 à 350°C, suivant les dimensions des pièces.

Nous avons déjà noté que les alliages au nickel ont une haute résistance électrique par formation de solution solide. Parmi ces alliages, il y a essentiellement les alliages au nickel-chrome, appelés "nichromes". Pour réduire le prix des nichromes et conserver ou améliorer les caractéristiques de résistance, une partie du nickel est remplacée par du fer, ces alliages s'appellent "ferronichromes" et sont utilisés à 950 ou 1000°C. Les nichromes sont employés aussi bien pour la fabrication des ustensiles de ménage, que des éléments de chauffage des fours électriques

7.3.3. Alliages aux propriétés dilatométriques

Ce sont des alliages à base de Fe-Ni, très employés dans la construction mécanique et surtout dans la construction des appareils. Le coefficient de dilatation " α " entre -100°C et +100°C, diminue brusquement lorsque la teneur en nickel augmente jusqu'à 36 % et il s'accroît par la suite, si la teneur continue à augmenter. Ce comportement est largement exploité en technique.

Ainsi les éléments des machines et des appareils devant conserver des dimensions constantes entre -100 et +100°C se font en alliages austénitiques (% C < 0,05 et 36 % Ni), appelés "elvar". Ces alliages, dont le coefficient de dilatation $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ est constant dans l'intervalle de température (-50 à +100)°C, sont utilisés comme étalons de longueur en métrologie, comme pièce dans certains appareils de mesures géodésiques.

7.3.4. Aciers et alliages aux propriétés élastiques particulières

Les éléments élastiques des appareils et de mécanismes, doivent être constitués par des matériaux ayant :

- De hautes propriétés élastiques.
- Une bonne plasticité.
- Un module élastique constant dans une large gamme de température.
- Une bonne résistance à la corrosion.
- Etc.

Les matériaux les plus utilisés sont les métaux non-ferreux (laitons, bronzes, ...) et les alliages austénitiques au Fe-Cr-Ni et au Co-Cr-Ni.

Pour la fabrication des éléments élastiques, très sensibles, concernant les appareils de précision, (membranes, soufflets, spiraux de montre, etc.), on utilise les alliages "elvar" au Ni-Cr-Ti à durcissement structural, et dont les propriétés mécaniques moyennes sont :

- Après trempe à 950°C à l'eau :
 - $R_m = 700 \text{ N/mm}^2$.
 - $A = 50 \%$.
- Après vieillissement à 700°C :
 - $R_m = 1250 \text{ N/mm}^2$.
 - $R_c = 800 \text{ N/mm}^2$.
 - $A = 20 \%$.

7.4. Classification des fontes

Les alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2,14 % s'appellent fontes. Outre ces deux éléments, elles contiennent essentiellement du Si, Mn, P, S, dans le cas des fontes non alliées et de plus du chrome, du molybdène, de l'aluminium, etc., dans le cas des fontes alliées.

Dans une fonte, le carbone peut se présenter sous deux formes :

- Cémentite : l'aspect de la cassure est clair d'où l'appellation de fonte blanche.
- Graphite : l'aspect de la cassure est gris d'où l'appellation de fonte grise.

Par rapport aux aciers, les fontes ont des propriétés mécaniques relativement médiocres et sont souvent utilisées en fonderie à cause :

- De leur température de solidification relativement basse.
- De leur intervalle de solidification réduit.
- De leur très faible retrait lors de la solidification.
- De leur difficulté d'usinage.

D'après la forme du graphite et les conditions de sa formation, les fontes sont classées de la façon suivante :

- Fonte blanche.
- Fonte grise.
- Fonte à graphite sphéroïdal.
- Fonte malléable.

Le tableau ci-dessous indique certaines nuances de ces fontes.

Variété	Nuance	R mini (daN/mm ²)	Re (daN/mm ²)	A (%)	Dureté (HB)
Fonte grise de moulage (A.32.101)	Ft 10	10	0,8 à 0,9 R	0,5 à 1	150 à 300
	Ft 15	15			
	Ft 20	20			
	Ft 25	25			
	Ft 30	30			
	Ft 35	35			
	Ft 40	40			
<p>Propriétés : matériau économique, se moulant bien, résistant à la compression, peu oxydable, s'usinant bien, de faible coefficient de frottement, mais cassant. Emplois : pièces moulées courantes, bâtis, carters, organes de transmission, cylindres, pistons, coulisseaux, vannes, etc. Ft 30 à 40 : fonte à haute résistance, s'usinant plus difficilement.</p>					
Fonte malléable (A .32.701, 702, 703)	MB 35-7	35	22	7	≥ 150
	MB 40-10	40	25	10	
	MN 32-8	32	21	8	
	MN 35-10	35	23	10	
	MN 38-18	38	25	18	
	MP 50-5	50	33	5	170 à 30
	MP 60-3	60	40	3	200 à 245
	MP 70-2	70	50	2	240 à 285
<p>Propriétés : bonne résistance mécanique, malléable, soudable (pour MB seulement), se moulant bien. Emplois : pièces de formes complexes, de forgeage impossible, exemples : quincaillerie, machines agricoles.</p>					
Ît, E ² Fonte à graphite sphéroïdal	FGS 800-2	80	48	2	248 à 352
	FGS 700-2	70	42	2	229 à 302
	FGS 600-3	60	37	3	192 à 269
	FGS 500-7	50	32	7	170 à 241
	FGS 400-12	40	25	12	≤ 201
	FGS 370-17	37	23	17	≤ 179
<p>Propriétés : bonne résistance mécanique, se moulant bien, s'usinant facilement, malléable après recuit de stabilisation, trempe possible. Emplois : les mêmes emplois que la fonte grise, mais pièces plus résistantes et plus légères. Exemples : cylindres de laminoirs, vilebrequins, pompes, etc.</p>					

7.4.1. Fontes blanches

La majorité du carbone se trouve sous forme de cémentite, ce qui donne à la cassure une couleur claire spécifique, c'est pourquoi elle est dite blanche. Elle est caractérisée par des teneurs en carbone et au silicium relativement faibles et par une teneur élevée en manganèse. Elle est constituée de perlite et de cémentite :

- Fonte hypoeutectique : lédéburite + perlite + cémentite.
- Fonte hypereutectique : lédéburite + cémentite + cémentite primaire.

Ces fontes sont obtenues lorsque le refroidissement est assez rapide et la température de coulée est assez basse. La cémentite n'a pas de temps pour se décomposer et l'on obtient une fonte sans graphite. Ces types de fontes sont obtenues dans le haut fourneau et sont généralement utilisés pour l'élaboration de l'acier ou de la fonte grise.

La fonte blanche présente un retrait élevé, ce qui oblige à prévoir des formes simples des sections uniformes sous angles vifs. Les caractéristiques physiques et mécaniques moyennes des fontes blanches brutes et coulées sont les suivantes :

- Masse volumique : (7,5 à 7,8) g/cm³.
- Coefficient de dilatation à (0 à 300)°C : (9 à 11).10⁻⁶.
- Résistivité électrique : 80 μΩcm.
- Résistance à la corrosion : (200 à 400) N/mm².
- Résistance à la compression : (1500 à 1800) N/mm².
- Module d'élasticité : (168000 à 183000) N/mm².
- Résistance à la flexion : (350 - 750) N/mm².
- Dureté Brinell (350 à 500).
- Retrait de moulage (13 à 21) mm/m.

La fonte blanche est parfois appelée "fonte trempée" car elle présente un état trempé (hors d'équilibre) par rapport à la fonte grise (état stable). La fonte blanche est obtenue par un moulage en coquille métallique entraînant un refroidissement plus rapide. Ainsi, l'extérieur de la pièce est en fonte blanche (12 à 40) mm alors que le cœur est en fonte grise. Ces deux parties sont séparées par une zone mixte en fonte truitée.

Les principaux domaines d'emploi des fontes blanches sont les suivants :

- Galets de dressage, cylindres de broyage, boulets.
- Blindage des broyeurs, pièces de pompes, de ventilateurs.
- Cames, poussoirs, guides.
- Rouleaux pour le travail des métaux, du caoutchouc et des matières plastiques.

Pour obtenir des pièces en fontes blanche, légèrement plus dure qu'à l'état brut, on utilise des additions modérées de nickel, chrome ou de nickel-chrome. La dureté atteint jusqu'à 600 HB. Si l'emploi des fontes blanches, exige des caractéristiques de résistance à la chaleur et aux corrosions sévères, on ajoute jusqu'à 35 % Cr, (supports des pièces du four de recuit, pièces de moteurs diesel, de chaudières, d'échangeurs).

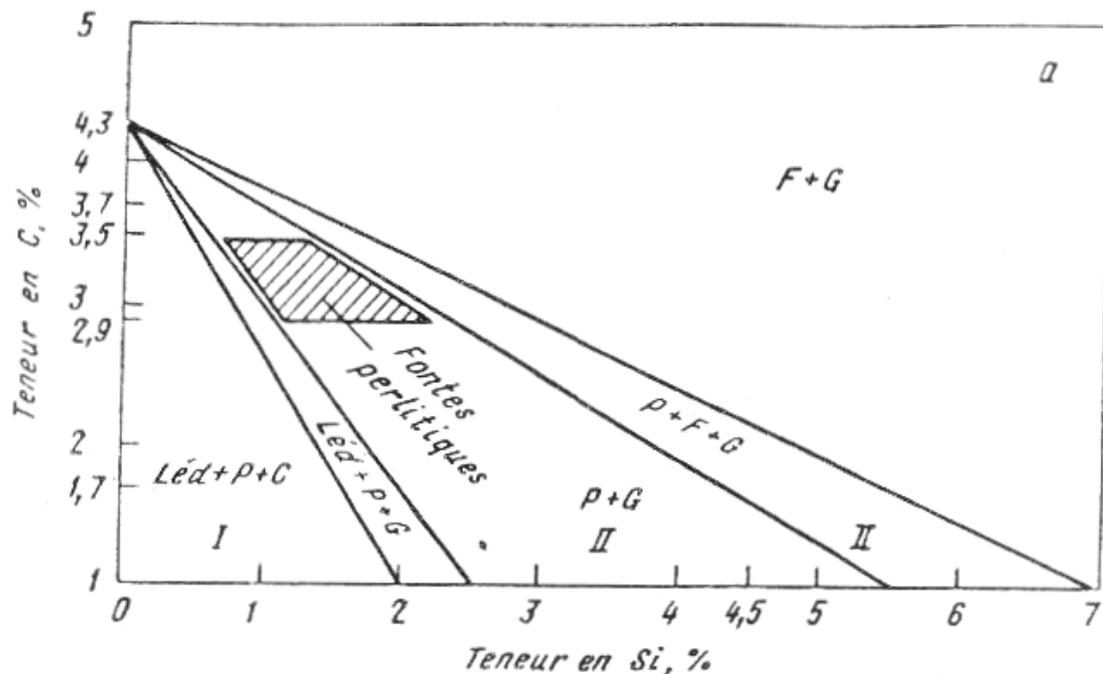
7.4.2. Fontes grises

La dénomination de fonte grise, fait allusion à l'aspect de la cassure grise. Dans ce type de fonte, la majeure quantité du carbone se trouve sous forme de graphite. Au fond, c'est un alliage Fe-C-Si, contenant comme impuretés inévitables du Mn, S et P.

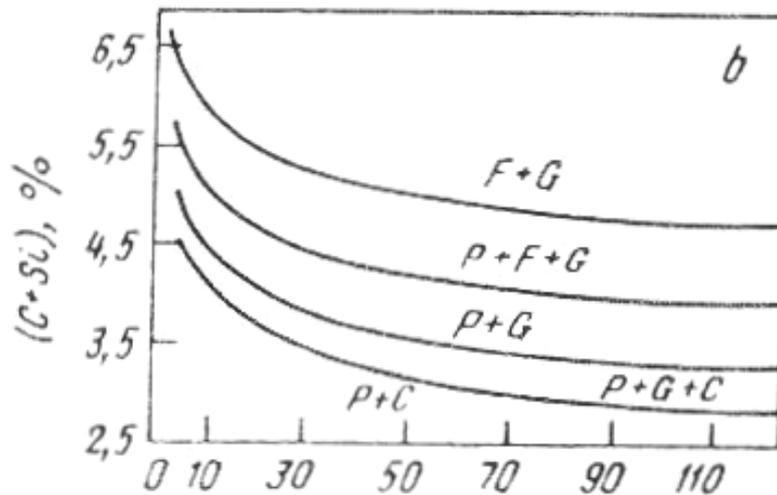
Une coupe métallographique montre que le graphite se présente sous formes de lamelles, ce qui caractérise particulièrement ces fontes, et ce qui détermine leurs propriétés principales. Les plus utilisées sont les fontes hypoeutectiques, titrant de 2,4 à 3,8 % C, plus cette teneur est grande, plus il se forme du graphite et plus les propriétés mécaniques de la fonte sont faibles.

Le silicium dont la teneur dans les fontes grises varie le plus souvent de 1,2 à 3,5 % influe fortement sur leur structure et par suite sur leurs propriétés. L'introduction du silicium diminue la solubilité du carbone dans le fer; il en résulte que le domaine de l'austénite se rétrécit. Le silicium favorise la graphitisation et agit dans le même sens que le ralentissement du refroidissement. En modifiant d'une part la teneur en carbone et de l'autre, la vitesse de refroidissement, on peut obtenir des matrices métalliques à structure différente.

Le diagramme structural des fontes, traduisant la structure des pièces moulées aux parois de 50 mm d'épaisseur en fonction de la teneur en silicium et carbone est représenté sur la figure 140 b, ci-dessous. La teneur en carbone étant donnée, plus le titre de silicium est élevé, plus le processus de graphitisation est complet. Plus la teneur en carbone est grande, il faut moins de silicium pour obtenir une structure donnée, (fig. 140 a).



a. Influence de C et Si sur la structure de la fonte
Fontes blanches (I), fontes grises (II) et domaine (F + G)
(fig. 140 a)



b. Influence de la vitesse de refroidissement (de l'épaisseur de la pièce coulée) et de la somme C + Si sur la structure de la fonte.
Fontes blanches (I), fontes grises (II) et domaine (F + G)
(fig. 140 b)

La quantité de carbone liée par la cémentite détermine l'existence des types suivants de fontes et bien sûr selon la teneur en silicium. La structure de ces fontes est donnée par la figure 141.

a. Fonte demi-truitée :

La fonte demi-truitée est celle dont la plus grande partie du carbone ($> 0,8 \%$), se trouve sous forme de Fe_3C , et dont la structure est composée de : lédéburite + perlite + graphite lamellaire.

b. Fonte grise perlitique :

Les 0,7 à 0,8 % C de cette fonte se trouvent sous forme de cémentite qui fait partie de la perlite et dont la structure se compose de : perlite + graphite lamellaire.

c. Fonte grise ferrito-perlitique :

La décomposition de la cémentite eutectoïde détermine pour cette fonte la teneur en carbone lié, qui varie de 0,1 à 0,7 %. La structure étant : perlite + ferrite+ graphite lamellaire

d. Fonte grise ferritique :

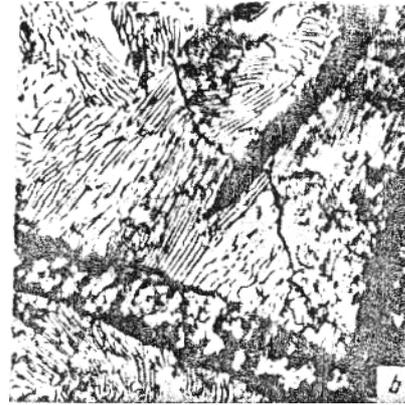
Dans ce cas, tout le carbone se trouve sous forme de graphite et la structure est composée de : ferrite + graphite lamellaire.

La figure 141, ci-dessous, présente des structures de fontes :

- Fontes demi-truitées.
- Fontes perlitiques.
- Fontes ferro-perlitiques.
- Fontes ferritiques.



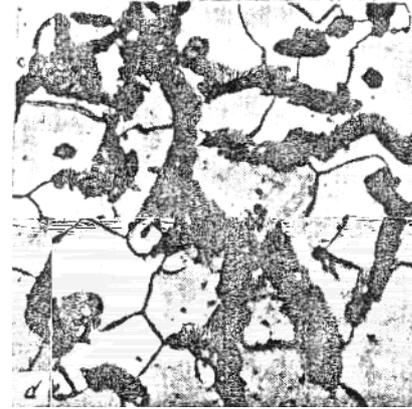
a. Fonte demi-traitée (Iédéburite + perlite + graphite)



b. Fonte perlitique



c. Fonte ferrito-perlitique



d. fonte ferritique

**Microstructure de la fonte grise x 500
(fig. 141)**

Il est évident que pour des teneurs données en carbone et en silicium, la graphitisation est d'autant plus complète que le refroidissement des fontes est plus faible.

La taille et la répartition de inclusions de graphite jouent un rôle important dans la résistance des fontes grises. Plus la taille et la quantité de ces inclusions sont faibles, plus la résistance est élevée. D'une manière générale, les lamelles de graphite diminuent la résistance à la rupture et tout particulièrement la plasticité de la fonte grise ($A < 0,5 \%$).

Les discontinuités produites par les lamelles de graphite dans le métal de base, rendent la fonte peu sensible aux concentrateurs de contraintes (entailles, défauts de surface, gorge, etc.). Le graphite a une action lubrifiante qui améliore la tenue à l'usure et les propriétés antifrictions de la fonte.

Il est commode de caractériser la vitesse de refroidissement d'après l'épaisseur des parois des pièces à mouler. Plus les parois de ces dernières sont minces, plus le refroidissement est rapide et plus la graphitisation est faible. Par conséquent, pour les pièces à mouler de petites sections, pour lesquelles le refroidissement est rapide, ou pour une fonte à faible teneur en carbone, le titre de silicium doit être augmenté. Par contre, lorsque les pièces à mouler sont épaisses, et par suite leur refroidissement plus lent, la graphitisation est plus complète et la teneur en silicium peut être plus faible.

Le manganèse entrave la graphitisation en rendant plus difficile le dégagement du graphite et accroît l'aptitude de la fonte à la trempe, c'est à dire la constitution surtout dans les couches superficielles de la structure d'une fonte blanche ou truitée.

Le soufre apporte aux éléments qui ralentissent sensiblement la graphitisation sa contribution et provoque le grossissement des lamelles de graphite. C'est une impureté nocive qui altère les propriétés mécaniques et la coulabilité de la fonte (teneur maxi 0,1 à 0,12 %).

Le phosphore n'influe pas sur la graphitisation, sa teneur dans les fontes grises ne doit pas dépasser 0,2 %, mais parfois on admet même 0,4 à 0,5 %. Le phosphore améliore la coulabilité de la fonte par l'intermédiaire de l'eutectique qui s'est formé.

7.4.3. Fontes à graphite sphéroïdal

Comme il a été déjà noté que le graphite lamellaire rend la fonte fragile. Ainsi, pour améliorer la résistance mécanique de la fonte grise, on ajoute des éléments d'addition tels que le Ni, Cr, Mn ou bien on cherche à améliorer l'effet du graphite sphérique. Dans ce cas, la fonte est appelée fonte à graphite sphéroïdal.

La fonte à graphite sphéroïdal s'obtient par addition de magnésium à la fonte liquide. La composition chimique moyenne de cette fonte est comme suit :

- C : (3,2 à 3,6) %.
- Si : (1,8 à 3) %.
- Mn : (0,3 à 0,4) %.
- P \approx 0,05 %.

L'introduction de silicium, jusqu'à 3 % environ, augmente le pouvoir graphitisant de la fonte liquide et celle du magnésium, jusqu'à 0,07 % environ, joue un rôle d'inhibiteur, mais de courte durée, en retardant la formation initiale du graphite.

A l'état brute de la coulée, la fonte à graphite sphéroïdal présente une structure perlitique, ferritique ou à cémentite libre. Elle est caractérisée par une résistance mécanique et une ductilité bien plus grande que celles des fontes grises usuelles. La facilité d'usinage est excellente. C'est en somme, un matériau intermédiaire entre la fonte grise et l'acier moulé. Dans le tableau ci-dessous, nous avons porté à titre de comparaison, quelques caractéristiques mécaniques moyennes des fontes et celles de l'acier doux moulé.

Nuance	Dureté (HB)	Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)
1. Fonte grise lamellaire	200	200	160	-
2. Fonte blanche non alliée	420	300	-	-
3. Fonte malléable ferritique	140	360	120	-
4. Fonte malléable perlitique	200	530	370	6
5. Fonte à graphite sphéroïdal	260	700	500	3
6. Acier doux moulé	135	450	270	18

La fonte à graphite sphéroïdal est très utilisée dans les diverses branches de l'industrie comme :

- Pièces de construction automobiles (vilebrequins, culasses, ...)
- Pièces pour l'industrie lourde (cylindres de laminoirs, pièces pour presses, ...).
- Pièces pour l'industrie chimique et pétrolière (conduite, pompes, valves, ...).

La figure 142 représente la structure micrographique de la fonte à haute résistance à graphite sphéroïdal.



a. Coupe non soumise à l'attaque

b. Fonte perlitique.

c. Fonte ferritique.

Microstructure micrographique de la fonte à haute résistance à graphite sphéroïdal x 250.

(fig. 142)

7.4.4. Fontes malléables

La fonte malléable s'obtient par le maintien prolongé aux températures élevées (recuit) des pièces en fonte blanche. Le recuit produit une graphite nodulaire déchiquetée, qui, par rapport au graphite lamellaire, diminue beaucoup moins la résistance et la plasticité de la matrice métallique.

La matrice métallique d'une fonte malléable est constituée de ferrite (fonte malléable ferritique ou à cœur noir, figure 143 a) et plus rarement, de perlite (fonte malléable perlitique ou à cœur blanc, figure 143 b). La fonte malléable à cœur noir est largement employée dans l'industrie, car elle est la plus plastique.

La composition chimique d'une fonte blanche, prévue pour malléabilisation par recuit, peut varier dans les limites de tolérances suivantes : (2,5 à 3) % C, (0,7 à 1,5) % Si, (0,3 à 1) % Mn, 0,12 % S et $\leq 0,18$ P, en fonction de la structure imposée du métal de base.

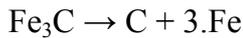
La teneur de la fonte en carbone et en silicium est réduite. Un plus faible titre de carbone améliore la plasticité du fait de la diminution de la quantité de graphite qui se dégage au recuit, alors que la teneur en silicium élimine la précipitation éventuelle au refroidissement du graphite lamellaire dans la structure des moulages.

L'épaisseur de la section des pièces coulées ne doit pas dépasser 40 à 50 mm. Lorsqu'elle est plus grande, l'âme de la pièce peut devenir le siège de formation du graphite lamellaire qui rend la fonte inapte au recuit.

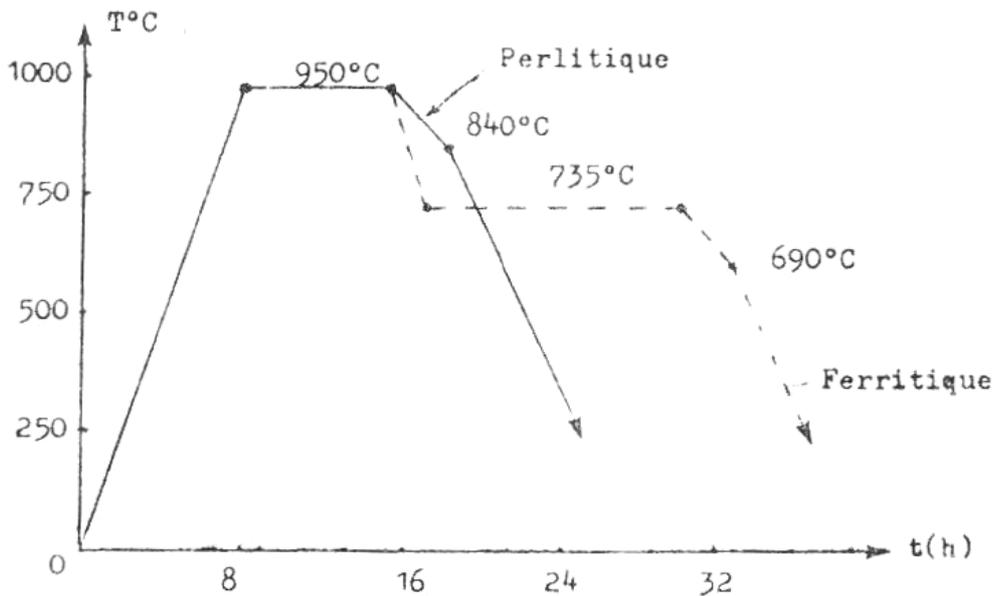
Il existe deux procédés pour malléabiliser les fontes. Ces deux procédés s'appliquent à des pièces de formes définitives compliquées et qui seraient difficiles à obtenir en acier (par coulée ou par forgeage). La matière à traiter, est la fonte blanche et le produit obtenu est doux et tenace. Le premier procédé, étant de loin, le plus employé.

7.4.4.1. Malléabilisation par graphitisation (fonte malléable à cœur noir)

L'opération consiste à placer les pièces en fonte blanche dans des caisses, souvent remplies de sable et chauffées jusqu' environ 950°C, avec un maintien suffisant : c'est la graphitisation primaire qui correspond à la décomposition de la cémentite contenue dans le lédéburite (A + Cm), et l'établissement d'un équilibre stable (austénite + graphite).



Le produit de la décomposition est du graphite nodulaire déchiqueté. A partir de 950°C, on peut obtenir deux types de fontes malléables.



(fig. 143 a)

a. Fonte malléable ferritique :

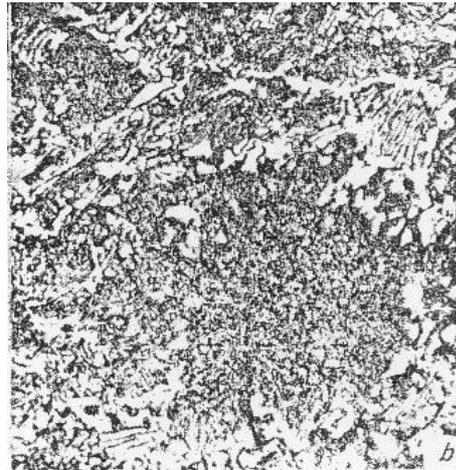
On refroidit les pièces jusqu'à environ 735°C pendant 12 heures pour avoir un graphite secondaire : l'austénite se décompose en ferrite et graphite. A partir de 690°C, les pièces peuvent être refroidies à l'air.

b. Fonte malléable perlitique :

La nature de la fonte est la même, mais le mode de refroidissement est différent. La décomposition de la cémentite est suivie d'un refroidissement à l'air à partir de 840°C, on obtient ainsi une matrice entièrement perlitique pour des pièces minces (perlite + graphite).



a. Fonte ferritique.



b. Fonte perlitique

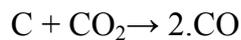
**Microstructure de la fonte malléable x 500
(fig. 143 b)**

7.4.4.2. Malléabilisation par décarburation (fonte malléable à cœur blanc)

Si dans le cas précédent de la malléabilisation par graphitisation, on procède par un traitement thermique, dans ce cas de malléabilisation par décarburation, on procède par un traitement mixte thermo-chimique. Il consiste à chauffer la fonte à 960°C, durant (50 à 100) heures dans un milieu oxydant constitué de minerai de fer, de manière à éliminer le carbone de la fonte sous forme de gaz.

L'oxydation du carbone se déroule comme suit :

- L'oxygène ambiant de la caisse réagit avec le carbone de la surface des pièces en donnant les gaz CO et CO₂.
- L'oxyde de carbone réagit avec le minerai de fer en donnant du CO₂.
- Le gaz CO₂ formé, agit sur le carbone de la fonte suivant la réaction :



Ainsi, l'oxydation porte sur le carbone de l'austénite de la surface de la pièce et le carbone diffuse du centre vers la périphérie pour remplacer le carbone oxydé, et la cémentite entre en solution.