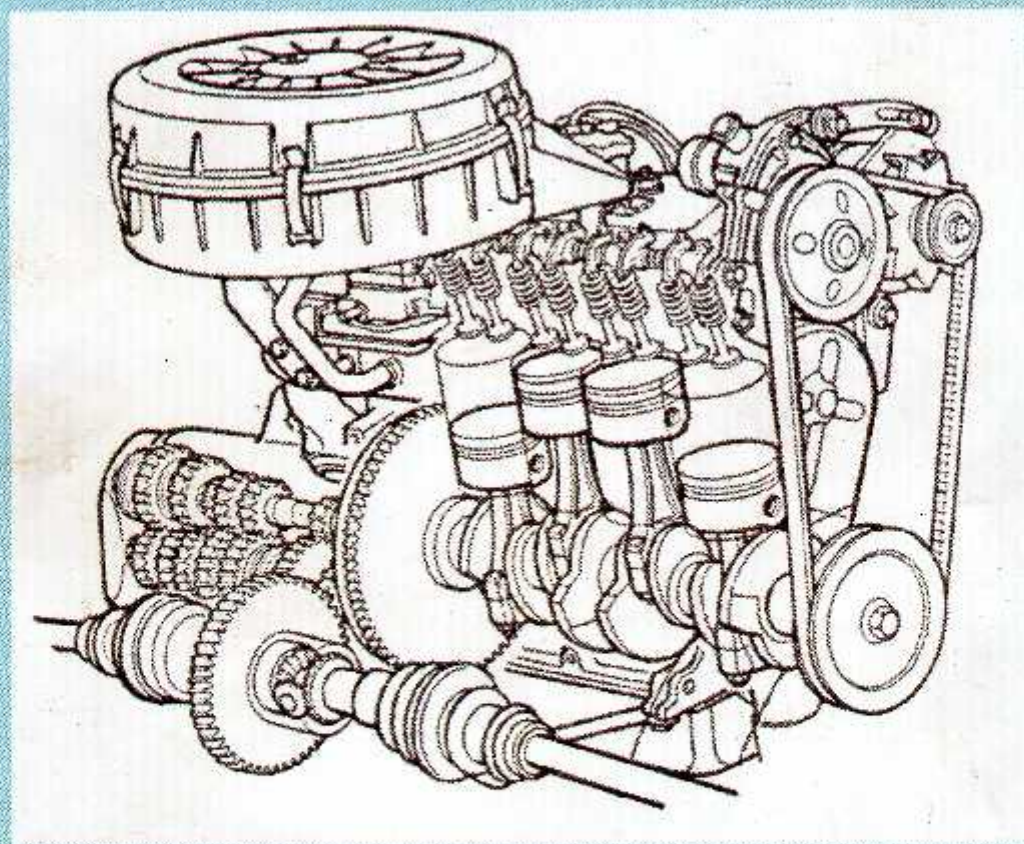


**S.BENSAADA
D.FELIACHI**

TECHNOLOGIE

PREMIERE PARTIE



Office Des Publications Universitaires

TABLE DES MATIERES

| | Page |
|---|-----------|
| 1. Notions de cristallographie | 1 |
| 1.1. Corps cristallins et corps amorphes | 2 |
| 1.2. Propriétés des corps cristallins | 3 |
| 1.3. Structure réticulaire | 5 |
| 1.4. Systèmes cristallins (les 14 réseaux de Bravais) | 8 |
| 1.5. Densité du réseau | 13 |
| 1.6. Notions des plans ou faces cristallographiques | 14 |
| 1.7. Indices de direction | 16 |
| 2. Elaboration des métaux ferreux | 17 |
| 2.1. Elaboration des métaux ferreux (fonte et acier) | 17 |
| 2.1.1. Elaboration de la fonte | 19 |
| 2.1.2. Matières premières | 19 |
| 2.1.2.1. Le minerai de fer | 19 |
| 2.1.2.2. Le coke | 20 |
| 2.1.2.3. Les fondants | 20 |
| 2.1.3. Le haut-fourneau | 21 |
| 2.1.4. Flux de matière dans une usine métallurgique | 24 |
| 2.1.5. Processus métallurgique dans un haut-fourneau | 24 |
| 2.1.6. les fontes du haut-fourneau | 27 |
| 2.1.7. Formation du laitier | 28 |
| 2.2. Elaboration de l'acier | 28 |
| 2.2.1. Processus de l'élaboration de l'acier | 29 |
| 2.2.2. Composition chimique de l'acier | 31 |
| 2.2.2.1. Influence des éléments chimiques sur les propriétés de l'acier | 31 |
| 2.2.3. Périodes de la marche d'une opération d'affinage | 36 |
| 2.2.3.1. Décarburation | 36 |
| 2.2.3.2. Déphosphoration | 37 |
| 2.2.3.3. Désulfuration | 37 |
| 2.2.3.4. Désoxydation du bain métallique | 38 |
| 2.2.3.5. Elimination du manganèse et du silicium | 38 |
| 2.2.3.6. Rôle de la scorie lors de l'élaboration de l'acier | 39 |
| 2.3. Procédés d'élaboration de l'acier | 39 |
| 2.3.1. Procédés par soufflage | 39 |
| 2.3.1.1. Convertisseurs Bessmer et Thomas | 39 |
| 2.3.1.2. Caractéristiques du procédé Bessmer | 40 |
| 2.3.1.3. Caractéristiques du procédé Thomas | 43 |
| 2.4. Convertisseur à oxygène | 47 |
| 2.4.1. Convertisseur à oxygène LD et LDAC | 48 |
| 2.4.1.1. Construction du convertisseur | 48 |
| 2.4.1.2. Matières premières | 49 |
| 2.4.1.3. Marche de l'opération | 50 |
| 2.4.1.4. Réactions d'oxydation | 50 |

| | |
|--|-----------|
| 2.4.2. Procédé de Kaldo | 51 |
| 2.4.3. Les aciers à oxygène | 52 |
| 2.5. Le procédé Martin | 52 |
| 2.5.1. Types du procédé Martin | 53 |
| 2.5.2. Marche générale de l'opération dans le four Martin | 54 |
| 2.5.3. Affinage du bain métallique | 55 |
| 2.5.4. Les aciers Martin | 56 |
| 2.6. Le four électrique | 56 |
| 2.6.1. Types de fours électriques | 56 |
| 2.6.2. Le four Heroult | 57 |
| 2.6.3. Principales matières premières du four électrique | 59 |
| 2.6.4. Marche d'une opération dans le four électrique | 60 |
| 2.6.5. Classification des aciers selon le procédé d'affinage et le pourcentage de carbone | 60 |
| 2.7. Coulée de l'acier | 61 |
| 2.7.1. Coulée en lingotières | 62 |
| 2.7.2. La coulée continué | 64 |
| 2.8. Différents types de coulées selon le degré de désoxydation | 66 |
| 2.8.1. La coulée calmée (acier calmé) | 66 |
| 2.8.2. La coulée effervescente (acier effervescent) | 67 |
| 2.8.3. La coulée semi-calmée (acier semi-calmé) | 68 |
| 2.9. Coulée sous vide | 68 |
| 2.10 Défauts des lingots | 69 |
| 2.10.1. Hétérogénéité chimique ou ségrégation | 69 |
| 2.10.2. Retassures | 70 |
| 2.10.3. Soufflures | 71 |
| 2.10.4. Criques et tapures | 71 |
| 3. Etablissement des diagrammes d'équilibre | 72 |
| 3.1. Phases dans les alliages | 72 |
| 3.2. Règle des phases ou loi de Gibbs | 73 |
| 3.3. Cristallisation des matériaux métalliques | 74 |
| 3.3.1. Cristallisation d'un métal pur | 75 |
| 3.3.2. Cristallisation d'un alliage | 77 |
| 3.4. Diagramme de phase d'une substance pure | 78 |
| 3.5. Diagrammes d'équilibre | 78 |
| 3.5.1. Principaux types de diagrammes d'équilibre du système binaire | 80 |
| 3.5.1.1. Diagramme d'équilibre d'un système avec miscibilité totale des composants à l'état solide et liquide | 80 |
| 3.5.1.2. Diagramme d'équilibre d'un système avec miscibilité totale des composants à l'état liquide et non miscibilité à l'état solide. | 82 |
| 3.5.1.3. Diagramme d'équilibre d'un système avec miscibilité complète des composants à l'état liquide et miscibilité partielle à l'état solide | 85 |
| 3.5.1.4. Diagramme d'équilibre d'un système avec phases inter- métalliques | 88 |

| | |
|--|------------|
| 4. Diagramme fer-Carbone | 89 |
| 4.1. Le fer et ses caractéristiques | 89 |
| 4.2. Le carbone et ses caractéristiques | 91 |
| 4.3. Diagramme d'équilibre : fer-cémentite | 92 |
| 4.3.1. Les points caractéristiques du diagramme | 93 |
| 4.3.2. Définitions des constituants micrographiques | 96 |
| 4.3.2.1. Le carbone | 96 |
| 4.3.2.2. La ferrite | 96 |
| 4.3.2.3. L'austénite | 96 |
| 4.3.2.4. La cémentite | 96 |
| 4.3.2.5. La perlite | 97 |
| 4.3.2.6. La troostite | 97 |
| 4.3.2.7. La bainite | 97 |
| 4.3.2.8. La sorbite | 97 |
| 4.3.2.9. La martensite | 98 |
| 4.3.2.10. Le lédéburite I | 98 |
| 4.3.2.11. Le lédéburite II | 98 |
| 4.4. Malléabilisation par décarburation (fonte malléable à cœur blanc) | 100 |
| 4.5. Les transformations | 101 |
| 4.5.1. Transformation péritectique | 101 |
| 4.5.2. Transformation eutectique | 101 |
| 4.5.3. Transformation eutectoïde | 101 |
| 4.6. Solidification et transformation des aciers et fontes | 101 |
| 4.6.1. Aciers hypoeutectiques | 102 |
| 4.6.2. Aciers eutectoïdes | 105 |
| 4.6.3. Aciers hypereutectoïdes | 107 |
| 4.6.4. Fontes hypoeutectiques | 109 |
| 4.6.5. Fontes eutectiques | 111 |
| 4.6.6. Fontes hypercutectiques | 111 |
| 4.7. Détermination de la position des composants de la structure | 112 |
| 4.8. Diagramme d'équilibre fer-graphite | 117 |
| 4.9. Influence des éléments chimiques sur les propriétés de l'acier | 119 |
| 4.9.1. Influence des éléments chimiques constants | 119 |
| 4.9.2. Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de l'acier | 122 |
| 4.10. Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de la fonte | 124 |
| 5. Traitements thermiques des aciers | 125 |
| 5.1. Définitions et procédés des traitements thermiques | 125 |
| 5.1.1. Chauffage des pièces | 126 |
| 5.1.2. Conditions de chauffage des pièces en traitements thermiques | 128 |
| 5.1.3. Types de fours et leurs atmosphères | 129 |
| 5.1.4. Refroidissement des pièces | 130 |
| 5.2. Transformations isothermes | 131 |
| 5.2.1. Transformation perlitique | 133 |
| 5.2.2. Transformation intermédiaire (bainitique) | 134 |

| | |
|---|-----|
| 5.2.3. Transformation martensitique | 135 |
| 5.3. Variation de la grosseur du grain d'austénite en fonction de la température | 136 |
| 5.4. Gammes de traitement thermiques de l'acier | 140 |
| 5.4.1. Le recuit | 140 |
| 5.4.1.1. Recuits du premier genre | 141 |
| 5.4.1.2. Recuit d'homogénéisation (diffusion) | 142 |
| 5.4.1.3. recuit de recristallisation | 143 |
| 5.4.1.4. Recuit de détente (ou de stabilisation, ou de relaxation) | 144 |
| 5.4.1.5. Recuits du deuxième genre | 145 |
| 5.4.1.6. Le recuit complet | 146 |
| 5.4.1.7. Recuit de régénération (affinage structural) | 146 |
| 5.4.1.8. Recuit isotherme | 147 |
| 5.4.1.9. Recuit incomplet (ou coalescence, ou globulisation, ou sphéroïdisation) | 148 |
| 5.4.1.10. Recuit d'adoucissement | 149 |
| 5.4.2. La normalisation | 150 |
| 5.4.3. La trempe | 152 |
| 5.4.3.1. Choix de la température d'austénitisation | 152 |
| 5.4.3.2. choix du temps de maintien (durée de chauffage) | 154 |
| 5.4.3.3. Choix de la vitesse de refroidissement pour la trempe | 154 |
| 5.4.3.4. Choix du milieu de trempe | 155 |
| 5.4.3.5. Trempabilité et pénétration | 156 |
| 5.4.3.6. Essai Jominy | 157 |
| 5.4.3.7. Modalités de la trempe | 159 |
| 5.4.3.8. Trempe superficielle | 163 |
| 5.4.4. Le revenu | 169 |
| 5.5. Défauts des traitements thermiques de l'acier | 174 |
| 5.6. Traitements thermochimiques de l'acier | 174 |
| 5.7. Principaux types de traitements thermochimiques de l'acier | 177 |
| 5.7.1. La cémentation | 177 |
| 5.7.1.1. Mécanisme de la couche cémentée | 178 |
| 5.7.1.2. Cémentation par agent solide (par ciment solide) | 179 |
| 5.7.1.3. Cémentation gazeuse | 180 |
| 5.7.1.4. Cémentation par des agents liquides | 181 |
| 5.7.1.5. Traitement thermique de l'acier après cémentation | 181 |
| 5.7.2. La nitruration | 182 |
| 5.7.2.1. Mécanisme de la formation de la couche nitrurée | 183 |
| 5.7.2.2. La nitruration ionique | 185 |
| 5.7.3. La cyanuration et la carbonitruration | 186 |
| 5.7.3.1. La cyanuration | 186 |
| 5.7.3.2. La carbonitruration | 186 |
| 5.7.4. La métallisation par cémentation | 187 |
| 5.7.4.1. La chromisation | 187 |
| 5.7.4.2. La boruration | 188 |
| 5.7.4.3. La siliciuration | 188 |
| 5.8. Durcissement superficiel par écrouissage | 188 |

| | |
|---|------------|
| 5.8.1. Le grenailage | 189 |
| 5.8.2. Le galetage | 190 |
| 5.8.3. Le brunissage | 190 |
| 5.8.4. Autres procédés de durcissement | 190 |
| 5.8.4.1. Durcissement par introduction d'atomes étrangers | 190 |
| 5.8.4.2. Durcissement par transformation ordre-désordre | 190 |
| 5.8.4.3. Durcissement par pression | 190 |
| 5.8.4.4. Durcissement structural ou par précipitation | 190 |
| 6. Désignation normalisée des aciers et des fontes | 191 |
| 6.1. Désignation des aciers | 191 |
| 6.1.1. Désignation des aciers ordinaires sans traitement thermique | 191 |
| 6.1.2. Désignation des aciers pour traitements thermiques | 192 |
| 6.1.3. Désignation des aciers alliés | 194 |
| 6.1.3.1. Désignation des aciers faiblement alliés | 195 |
| 6.1.3.2. Désignation des aciers fortement alliés | 196 |
| 6.2. Désignation normalisée des fontes selon AFNOR | 196 |
| 6.2.1. Désignation des fontes non alliées | 197 |
| 6.2.2. désignation des fontes alliées | 198 |
| 6.2.3. Désignation des fontes malléables | 199 |
| 7. Classification des aciers et des fontes | 200 |
| 7.1. Classification des aciers | 200 |
| 7.1.1. Aciers de construction | 200 |
| 7.1.1.1. Aciers de construction d'usage général (aciers au carbone) | 200 |
| 7.1.1.2. Aciers de construction ordinaires (aciers courants) | 201 |
| 7.1.1.3. Aciers de construction de qualité | 201 |
| 7.1.2. Aciers de décolletage | 202 |
| 7.1.3. Aciers d'amélioration | 202 |
| 7.1.3.1. Aciers alliés au chrome | 203 |
| 7.1.3.2. Aciers alliés au chrome-manganèse | 203 |
| 7.1.3.3. Aciers alliés au chrome-silicium-manganèse (Chromansil) | 203 |
| 7.1.3.4. Aciers alliés au chrome-nickel | 203 |
| 7.1.4. Aciers de cémentation | 204 |
| 7.1.4.1. Aciers alliés au chrome | 204 |
| 7.1.4.2. Aciers alliés au chrome-vanadium | 204 |
| 7.1.4.3. Aciers alliés au chrome-nickel | 205 |
| 7.1.4.4. Aciers alliés au chrome-manganèse | 205 |
| 7.1.5. Aciers de nitruration | 206 |
| 7.1.6. Aciers pour constructions soudées | 206 |
| 7.1.7. Aciers à ressorts | 207 |
| 7.1.8. Aciers à roulement | 208 |
| 7.1.9. Aciers à haute résistance | 208 |
| 7.1.10. Aciers à haute tenue à l'usure | 209 |
| 7.1.10.1. Aciers austénitiques au manganèse | 209 |
| 7.1.10.2. Aciers martensitiques au chrome | 210 |

| | |
|--|------------|
| 7.1.11. Aciers résistant à chaud | 210 |
| 7.1.11.1. Aciers perlitiques | 211 |
| 7.1.11.2. Aciers martensitiques résistant à chaud | 211 |
| 7.1.11.3. Aciers austénitiques résistant à chaud | 211 |
| 7.1.11.4. Austénites complexes | 211 |
| 7.1.12. Aciers à haute tenue à la corrosion (aciers inoxydables) | 212 |
| 7.1.12.1. Aciers inoxydables au chrome | 212 |
| 7.1.12.2. Aciers inoxydables au chrome-nickel | 213 |
| 7.2. Aciers à outils | 214 |
| 7.2.1. Aciers à outils de la classe 1 | 215 |
| 7.2.2. Aciers à outils de la classe 2 | 216 |
| 7.2.2.1. Aciers au manganèse et au manganèse-vanadium | 216 |
| 7.2.2.2. Aciers au chrome | 216 |
| 7.2.2.3. Aciers au chrome-molybdène | 217 |
| 7.2.2.4. Aciers au chrome-tungstène | 217 |
| 7.2.2.5. Aciers au nickel-chrome | 217 |
| 7.2.3. Aciers à outils de la classe 3 | 217 |
| 7.2.4. Aciers à outils de la classe 4 | 218 |
| 7.2.4.1. Aciers rapides courants | 219 |
| 7.2.4.2. Aciers rapides au tungstène-molybdène | 219 |
| 7.2.4.3. Aciers extra-rapides | 219 |
| 7.2.4.4. Aciers rapides spéciaux au cobalt | 219 |
| 7.2.4.5. Aciers rapides à haute teneur en vanadium | 219 |
| 7.2.4.6. Aciers au molybdène-cobalt | 219 |
| 7.2.5. Carbures métalliques à outils | 220 |
| 7.3. Aciers et alliages spéciaux | 221 |
| 7.3.1. Aciers et alliages à aimants | 221 |
| 7.3.1.1. Aciers et alliages magnétiques durs | 221 |
| 7.3.1.2. Aciers magnétiques doux | 222 |
| 7.3.2. Aciers et alliages pour éléments chauffants | 223 |
| 7.3.3. Alliages aux propriétés dilatométriques | 223 |
| 7.3.4. Aciers et alliages aux propriétés élastiques particulières | 224 |
| 7.4. Classification des fontes | 224 |
| 7.4.1. Fontes blanches | 226 |
| 7.4.2. Fontes grises | 227 |
| 7.4.3. Fontes à graphite sphéroïdal | 230 |
| 7.4.4. Fontes malléables | 231 |
| 7.4.4.1. Malléabilisation par graphitisation (fonte malléable à cœur noir) | 232 |
| 7.4.4.2. Malléabilisation par décarburation (fonte malléable à cœur blanc) | 233 |
| 8. Métaux et alliages non ferreux | 234 |
| 8.1. L'aluminium et ses alliages | 234 |
| 8.2. Elaboration de l'aluminium | 234 |
| 8.3. Caractéristiques de l'aluminium | 237 |

| | |
|--|------------|
| 8.3.1. Caractéristiques physiques | 237 |
| 8.3.2. Caractéristiques mécaniques | 239 |
| 8.3.3. Tenue à la corrosion | 240 |
| 8.4. Alliages de l'aluminium | 241 |
| 8.4.1. Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de l'aluminium | 241 |
| 8.4.2. Traitements thermiques des alliages d'aluminium | 242 |
| 8.4.2.1. Trempe et vieillissement | 242 |
| 8.4.2.2. Recuit des alliages d'aluminium | 246 |
| 8.4.3. Propriétés des alliages d'aluminium | 247 |
| 8.4.4. Classification des alliages d'aluminium | 248 |
| 8.4.4.1. Alliages corroyés avec et sans durcissement structural | 248 |
| 8.5. Alliages d'aluminium de fonderie (moulage) | 258 |
| 8.5.1. Alliages Al-Si | 260 |
| 8.5.2. Alliages Al-Mg | 263 |
| 8.5.3. Alliages Al-Cu | 265 |
| 8.5.4. Alliages Al-Si-Cu | 265 |
| 8.6. Le cuivre et ses alliages | 265 |
| 8.6.1. Procédés d'élaboration et d'affinage du cuivre | 265 |
| 8.6.2. Cuivre pur (non allié) | 268 |
| 8.6.3. Alliages de cuivre | 272 |
| 8.6.3.1. Cuivre faiblement allié | 272 |
| 8.6.3.2. Cuivre fortement allié | 273 |
| 8.6.3.3. Les laitons (Alliages Cu-Zn) | 274 |
| 8.6.3.4. Les laitons spéciaux à composants multiples | 278 |
| 8.6.3.5. Les bronzes (Alliages Cu-Sn) | 281 |
| 8.6.4. les cupro-aluminiums (Cu-Al) | 284 |
| 8.6.5. Les cupro-nickels (Cu-Ni) | 285 |
| 8.6.6. Le Constantin (55 % Cu et 45 % Ni) | 285 |
| 8.6.7. Les maillechorts (Cu-Ni-Zn) | 286 |
| 8.6.8. Les cuproliums (Cu-Si) | 286 |
| 8.6.9. Propriétés et emplois du cuivre et ses alliages | 286 |
| 8.6.9.1. Le cuivre | 286 |
| 8.6.9.2. Les cuivres faiblement alliés | 287 |
| 8.6.9.3. Divers alliages fortement alliés | 287 |
| 8.6.9.4. Les laitons | 287 |
| 8.6.9.5. Les bronzes | 288 |
| 8.6.9.6. Les maillechorts et les cupro-aluminiums | 289 |
| 8.7. Le magnésium et ses alliages | 289 |
| 8.7.1. alliages de magnésium | 290 |
| 8.7.2. Alliages de magnésium de fonderie | 293 |
| 8.7.3. Alliages de magnésium de corroyage | 294 |
| 8.8. Le zinc et ses alliages | 295 |
| 8.8.1. Les alliages de zinc | 296 |