Code : MS128655

Sciences et Technologies

MÉTALLURGIE

Étude des propriétés, de la transformation et des applications des métaux.

3 année



3 année

Mécanique Générale



TABLE DES MATIÈRES

PRÉLIMINAIRES **1**

Objectifs Pédagogiques du Cours 1

- 1. Objectifs cognitifs et théoriques 1
- 2. Objectifs pratiques et méthodologiques 1
- 3. Objectifs comportementaux et transversaux 1

Approche Didactique et Méthodologique 2

- 1. Du Phénomène Observable au Modèle Scientifique 2
- 2. Une Structuration en Spirale et Contextualisée 2

Contexte Industriel et Applications 2

- 1. Positionnement de la discipline 2
- 2. Ancrage dans les applications 2

PARTIE I : MICROSTRUCTURE ET DIAGRAMME D'ÉQUILIBRE DES ACIERS **4**

a. L'acier, un matériau omniprésent 4

b. Au cœur du métal : la microstructure 4

c. La carte du forgeron : le diagramme Fer-Carbone 4

d. De la théorie à l'atelier : maîtriser les propriétés 4

CHAPITRE 1 : LES TRANSFORMATIONS DU FER ET DE SES ALLIAGES **5**

1.1. États Allotropiques du Fer et Points de Transformation 5

- a. L'étrange flexibilité du fer 5
- A. L'Allotropie du Fer Pur 5
- B. Les Points de Transformation (Points Critiques) 5

FIGURE 1 : RÉF. IMG (0054-0137-0123) **8**

Courbe de refroidissement du fer pur montrant ses transformations allotropiques. 8

- Scénarios et Exercices 8
- Une leçon de forge à Mbandaka 8

1.2. Constituants Microscopiques et Influence du Refroidissement 10

- a. Le secret du forgeron 10
- A. Les Constituants Fondamentaux de l'Acier 10
- B. Les Agrégats : L'union fait la force 10

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

FIGURE 2 : RÉF. IMG (2317-0558-8508) **13**

Comparaison des microstructures de l'acier après refroidissement de l'austénite 13

- C. La Vitesse de Refroidissement : Le Chef d'Orchestre 13

FIGURE 3 : RÉF. IMG (2328-3317-2589) **16**

Diagramme TTT (Temps-Température-Transformation) d'un acier eutectoïde 16

- Scénarios et Exercices 16
- Anecdote : Les rails du Matadi-Kinshasa 16

CHAPITRE 2 : LECTURE ET INTERPRÉTATION DU DIAGRAMME FER-CARBONE **19**

2.1. Construction du Diagramme et Point Eutectoïde 19

- a. La carte au trésor du métallurgiste 19
- A. Les Axes du Diagramme : Température et Carbone 19
- B. Les Zones et les Phases 19

FIGURE 4 : RÉF. IMG (5520-3402-9538) **21**

Le diagramme d'équilibre Fer-Carbone simplifié pour les aciers 21

- C. Le Point Eutectoïde : Une Transformation Unique 21

FIGURE 5 : RÉF. IMG (6968-8203-9958) **24**

Zoom sur le point eutectoïde à 0,77% de carbone et 727°C 24

- Scénarios et Exercices 24
- Une anecdote de Mbandaka 24

2.2. Analyse des Aciers Hypo-eutectoïdes 26

- a. Le secret de l'acier doux 26
- A. Refroidissement et apparition de la ferrite 26

FIGURE 6 : RÉF. IMG (3338-7235-2097) **29**

Microstructure d'un acier hypo-eutectoïde après refroidissement lent depuis l 29

- B. Influence de la teneur en carbone 29

2.3. Analyse des Aciers Hyper-eutectoïdes 31

- a. L'acier qui se durcit avant l'heure 31
- A. La Naissance de la Cémentite Pro-eutectoïde 31

FIGURE 7 : RÉF. IMG (0879-8204-6632) **34**

Microstructure d'un acier hyper-eutectoïde montrant cémentite et perlite 34

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- B. Propriétés et Fragilité Intrinsèque.....34

PARTIE II : LES TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS.....37

a. Le paradoxe de l'acier brut.....37

b. La définition du traitement thermique.....37

c. La vitesse de refroidissement : la clé de la transformation.....37

d. Un arsenal de procédés pour des propriétés ciblées.....37

CHAPITRE 3 : PRINCIPES ET TECHNOLOGIES DES TRAITEMENTS THERMIQUES.....38

3.1. Principes et Cycles des Traitements Thermiques.....38

- a. Introduction : la science du forgeron.....38
- A. Les trois phases d'un cycle thermique.....38
- B. Le diagramme Temps-Température-Transformation (TTT).....38
- C. SCÉNARIOS ET EXERCICES.....39

3.2. Équipements et Contrôle des Températures (Pyrométrie).....41

- a. L'œil, un pyromètre bien imprécis.....41
- A. Les Fours de Traitement Thermique.....41
- B. Les Instruments de Mesure : La Pyrométrie.....41

FIGURE 8 : RÉF. IMG (9845-0220-4759).....44

Comparaison visuelle d'un thermocouple et d'un pyromètre optique en action.....44

- Anecdote : La leçon du vieux forgeron de Boma.....44

CHAPITRE 4 : LA TREMPE – DURCISSEMENT DES ACIERS.....47

4.1. Formation de la Martensite et Austénitisation.....47

- a. Le secret du forgeron.....47
- A. L'Austénitisation : La Préparation au Combat.....47
- B. La Martensite : La Transformation Brutale.....47

4.2. Milieux de Trempe et Notion de Trempabilité.....50

- a. La sagesse du forgeron.....50
- A. Les Milieux de Trempe : La Course contre la Chaleur.....50

FIGURE 9 : RÉF. IMG (3540-3590-6716).....52

Courbes de refroidissement pour l'eau, l'huile et l'air.....52

- B. La Trempabilité : Une Question de Génétique de l'Acier.....52

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

FIGURE 10 : RÉF. IMG (1198-9046-9892) **55**

Comparaison de la trempabilité entre un acier au carbone et un acier allié 55

- L'énigme du mécanicien de Kisangani 55

CHAPITRE 5 : LE REVENU – RÉGLAGE DE LA DURETÉ ET DE LA TÉNACITÉ **58**

5.1. Nécessité et Principe du Revenu 58

- a. Le compromis indispensable en mécanique 58
- A. Le Paradoxe de la Trempe : Dureté contre Fragilité 58

FIGURE 11 : RÉF. IMG (4153-5066-6245) **60**

Microstructure de l'acier après trempe montrant les aiguilles de martensite 60

- B. Le Principe du Revenu : Un Chauffage Contrôlé 60

FIGURE 12 : RÉF. IMG (7865-6115-9714) **63**

Diagramme Température-Dureté illustrant l'effet du revenu sur un acier au car 63

- b. L'anecdote : Le coupe-coupe de Papa Landu 63

5.2. Influence de la Température et Pratique du Revenu 65

- a. Le secret du forgeron 65
- A. Les Couleurs de Revenu : Le Thermomètre Visuel 65

FIGURE 13 : RÉF. IMG (0883-4873-4482) **68**

Échelle des couleurs de revenu et applications d'outils correspondantes 68

- B. Les Trois Catégories de Revenu 68

CHAPITRE 6 : LE RECUIT – ADOUCISSEMENT ET RÉGÉNÉRATION DE LA STRUCTURE **71**

6.1. Objectifs du Recuit : Améliorer l'Usinabilité et Supprimer les Tensions 71

- a. Le paradoxe de l'acier fort mais fragile 71
- A. Adoucir pour mieux usiner : l'objectif d'usinabilité 71

FIGURE 14 : RÉF. IMG (2538-7879-9384) **73**

Microstructure de l'acier avant et après un traitement de recuit d'adoucissement 73

- B. Relaxer l'acier : l'élimination des tensions internes 73

6.2. Le Recuit de Recristallisation (Régénération) 76

- a. Le paradoxe du métal fatigué 76
- A. Le principe de la régénération 76
- B. Les étapes du mécanisme 76

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

FIGURE 15 : RÉF. IMG (6792-4658-8566) **79**

Évolution de la structure des grains durant le recuit de recristallisation 79

- Scénarios et Exercices 79
- a. Le fil de fer de l'artisan du Kwilu 79

6.3. Le Recuit d'Adoucissement (Globulisation) 81

- a. Le paradoxe de l'acier dur 81
- A. Objectif et Principe de la Globulisation 81
- B. Le Cycle Thermique de la Globulisation 82

6.4. Le Recuit de Normalisation 84

- a. Rétablir l'ordre dans le métal 84
- A. Principe et Objectifs 84
- B. Le Cycle Thermique Détaillé 84

FIGURE 16 : RÉF. IMG (3825-6622-9710) **86**

Cycle thermique du recuit de normalisation pour un acier au carbone 86

- Scénarios et Exercices 86

PARTIE III : ACIERS SPÉCIAUX ET TRAITEMENTS DE SURFACE **89**

a. Le constat : les limites de l'acier ordinaire 89

b. La solution : les éléments d'addition 89

c. L'alternative : le traitement de surface 89

d. L'objectif : adapter le métal à sa mission 89

CHAPITRE 7 : INFLUENCE DES ÉLÉMENTS D'ALLIAGE **90**

7.1. Rôle Fondamental des Éléments d'Addition dans les Aciers 90

- a. De l'impureté subie à l'alliage maîtrisé 90
- A. Pourquoi modifier la recette de base ? 90

FIGURE 17 : RÉF. IMG (7656-7324-8815) **92**

Impact microscopique des éléments d'alliage sur la structure cristalline de l 92

- B. Les éléments stars et leurs super-pouvoirs 92

FIGURE 18 : RÉF. IMG (3822-9754-2947) **95**

Diagramme comparatif des propriétés d'aciers alliés pour des applications ind 95

- Anecdote : La leçon du vieux forgeron de Mbandaka 95

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

7.2. Éléments Gammagènes (Nickel, Manganèse).....97
- a. Les architectes de l'acier.....97
- A. Le Nickel (Ni) : Le garant de la ténacité.....98

FIGURE 19 : RÉF. IMG (9318-6639-3185).....100

Diagramme Fer-Carbone modifié par un élément gammagène comme le nickel.....100
- B. Le Manganèse (Mn) : L'allié à double visage.....100

7.3. Éléments Alphagènes et Carburigènes (Chrome, Molybdène, Vanadium).....102
- a. Les alliages, une recette de cuisine pour le métal.....102
- A. Les stabilisateurs de structure (Alphagènes).....103
- B. Les créateurs de dureté (Carburigènes).....103

FIGURE 20 : RÉF. IMG (7811-4025-0338).....105

Structure d'un acier allié montrant la matrice et les carbures.....105
- C. Portrait des trois éléments clés.....105

7.4. Effet sur la Température de Trempe et la Trempabilité.....107
- a. Le secret du forgeron moderne.....107
- A. Impact sur la Température de Trempe.....108
- B. Influence sur la Trempabilité : le vrai pouvoir des alliages.....108

FIGURE 21 : RÉF. IMG (6375-5102-2295).....110

Courbes TTT comparant un acier au carbone et un acier allié.....110
- C. Le rôle de chaque élément.....110

CHAPITRE 8 : LES GRANDES FAMILLES D'ACIERS SPÉCIAUX.....113

8.1. Les Aciers de Construction Alliés (au Cr-Mo, Ni-Cr).....113
- a. L'acier face à ses limites.....113
- A. Les aciers au Chrome-Molybdène (Cr-Mo).....113

FIGURE 22 : RÉF. IMG (5810-4261-1651).....115

Structure micrographique d'un acier allié montrant sa résistance interne.....115
- B. Les aciers au Nickel-Chrome (Ni-Cr).....115

FIGURE 23 : RÉF. IMG (1079-4485-1699).....117

Vilebrequin en acier Nickel-Chrome soumis à de fortes contraintes mécaniques.....117
- b. Anecdote : La panne du camion grumier dans le Kwilu.....117

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

8.2. Les Aciers à Outils (Aciers rapides au Tungstène)....119
- a. Le secret des outils qui ne plient jamais....119
- A. Composition chimique : La recette des champions....119

FIGURE 24 : RÉF. IMG (9902-0619-5030)....122

Micrographie d'un acier rapide montrant les carbures dans la matrice....122
- B. Propriétés et Désignation....122

8.3. Les Aciers Inoxydables (au Chrome-Nickel)....125
- a. Le paradoxe de la marmite brillante....125
- A. La Formule de l'Invincibilité : Chrome + Nickel....125
- B. Propriétés et Désignation des Aciers Austénitiques....126

FIGURE 25 : RÉF. IMG (5057-4272-9190)....128

Applications courantes des aciers inoxydables au chrome-nickel dans le monde....128
- Scénarios et Exercices....128

8.4. Applications Industrielles et Désignation Normalisée....130
- a. L'alphabet du technicien....130
- A. La logique derrière la désignation....130
- B. Des codes pour chaque mission....131

FIGURE 26 : RÉF. IMG (9285-9790-8707)....133

Désignation normalisée d'un acier de construction commun....133
- Anecdote de l'atelier....133

CHAPITRE 9 : LES TRAITEMENTS THERMOCHIMIQUES DE SURFACE....136

9.1. Principe : Modifier la Composition Chimique de la Surface....136
- a. L'armure chimique de l'acier....136
- A. Le Principe Fondamental : La Diffusion....136

FIGURE 27 : RÉF. IMG (4736-2122-9222)....138

Coupe schématique d'une pièce d'acier après un traitement thermochimique de s....138
- B. Les Objectifs Visés....138

9.2. La Cémentation : Enrichissement en Carbone....140
- a. Le durcissement par la peau....140
- A. Le principe : Une diffusion de carbone....140
- B. Les trois voies de la cémentation....141

FIGURE 28 : RÉF. IMG (9741-2960-6159)..... 143

Coupe d'un axe en acier cémenté montrant la couche durcie..... 143

- Le secret du vieux soudeur de Boma..... 143

9.3. La Nitruration : Enrichissement en Azote..... 145

- a. Une peau dure comme le roc..... 145
- A. Le principe de la diffusion d'azote..... 145
- B. Avantages et applications..... 146

9.4. Applications : Durcissement Superficiel des Pièces (Pignons, Arbres)..... 148

- Un jour..... 148
- A. Le Principe "Cœur Tendre, Peau Dure"..... 148

FIGURE 29 : RÉF. IMG (9836-8681-8789)..... 150

Coupe transversale d'une dent de pignon après traitement thermochimique..... 150

- B. Choix du Traitement selon l'Application..... 150

FIGURE 30 : RÉF. IMG (0834-7421-2791)..... 153

Exemples de pièces mécaniques nécessitant un durcissement de surface..... 153

- L'anecdote de l'ingénieur de la mine..... 153

PARTIE IV : MÉTALLURGIE DES MÉTAUX ET ALLIAGES NON FERREUX..... 156

a. Au-delà du fer et de l'acier..... 156

b. L'aluminium : la force de la légèreté..... 156

c. Le cuivre : le sang du monde électrique..... 156

d. Les alliages spécialisés : le bronze et le laiton..... 156

CHAPITRE 10 : LA MÉTALLURGIE DU CUIVRE ET DE SES ALLIAGES..... 157

10.1. Le Cuivre en RDC : Minerais et Procédés d'Extraction (Katanga)..... 157

- a. Le trésor du Katanga..... 157
- A. Les Principaux Minerais de Cuivre..... 157

FIGURE 31 : RÉF. IMG (6004-0494-8187)..... 159

Minerais de cuivre oxydés typiques du Katanga..... 159

- B. Les Procédés d'Extraction..... 159

FIGURE 32 : RÉF. IMG (3279-5189-8590)..... 162

Principe de la cellule d'affinage électrolytique du cuivre..... 162

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- C. Le Cuivre Congolais sur le Marché.....162

10.2. Le Raffinage Électrolytique du Cuivre.....164

- a. L'art de la purification électrique.....164
- A. Le principe de la cellule électrolytique.....165

FIGURE 33 : RÉF. IMG (8110-5186-5066).....167

Schéma d'une cellule de raffinage électrolytique du cuivre.....167

- B. Les réactions aux électrodes.....167

FIGURE 34 : RÉF. IMG (6457-9646-2284).....170

Comparaison visuelle entre une anode brute et une cathode pure.....170

- L'héritage des boues anodiques.....170

10.3. Les Laitons (Alliages Cuivre-Zinc) : Propriétés et Utilisations.....172

- a. Le mariage du cuivre et du zinc.....172
- A. Classification des Laitons selon la teneur en Zinc.....172

FIGURE 35 : RÉF. IMG (4002-1727-8148).....175

Diagramme d'équilibre Cuivre-Zinc, la carte d'identité des laitons.....175

- B. Propriétés et Applications Générales.....175

FIGURE 36 : RÉF. IMG (7507-0410-1588).....178

Applications concrètes du laiton dans la vie quotidienne congolaise.....178

- SCÉNARIOS ET EXERCICES.....178

10.4. Les Bronzes (Alliages Cuivre-Étain) : Propriétés et Utilisations.....180

- a. L'alliage qui a nommé un âge de l'humanité.....180
- A. Définition et Composition Fondamentale.....180
- B. Propriétés Notables et Classification.....181

FIGURE 37 : RÉF. IMG (1967-1919-2741).....183

Exemples d'applications industrielles et artistiques du bronze.....183

- C. Applications Courantes en Mécanique Générale.....183

CHAPITRE 11 : LA MÉTALLURGIE DE L'ALUMINIUM ET DE SES ALLIAGES.....186

11.1. Principe d'Élaboration de l'Aluminium par Électrolyse.....186

- a. L'aluminium, ce métal si commun et pourtant si complexe.....186
- A. Le Défi de l'Alumine () et la Solution de la Cryolite.....186

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- B. Le Procédé Hall-Héroult : L'Électrolyse Igne.....186

FIGURE 38 : RÉF. IMG (0471-1948-2952).....189

Schéma simplifié d'une cuve d'électrolyse pour la production d'aluminium.....189

- Anecdote : La puissance d'Inga au service du métal.....189

11.2. Propriétés de l'Aluminium : Légèreté et Conductivité.....191

- a. La légèreté, un trésor pour l'aviation.....191
- A. La légèreté : une masse volumique avantageuse.....191

FIGURE 39 : RÉF. IMG (3345-9126-7738).....194

Comparaison visuelle des densités de l'acier et de l'aluminium.....194

- B. Les conductivités : un double talent.....194

FIGURE 40 : RÉF. IMG (4045-6851-6785).....197

Ligne électrique haute tension avec des câbles en aluminium.....197

- Une histoire de marmite à Goma.....197

11.3. Les Alliages d'Aluminium de Fonderie (Alpax).....199

- a. Une invention qui change la donne.....199
- A. Composition et structure de l'Alpax.....199

FIGURE 41 : RÉF. IMG (6538-3614-1476).....202

Diagramme d'équilibre binaire des alliages Aluminium-Silicium (Al-Si).....202

- B. Propriétés et applications courantes.....202

FIGURE 42 : RÉF. IMG (5667-3435-6922).....205

Micrographie d'un alliage Alpax montrant la structure eutectique fine.....205

- Anecdote : Le secret du vieux soudeur de Boma.....205

11.4. Les Alliages d'Aluminium de Corroyage (Duralumin).....207

- a. De l'âge du bronze à l'âge de l'aluminium.....207
- A. Composition et Désignation.....207
- B. Le Principe du Durcissement Structural.....208

FIGURE 43 : RÉF. IMG (4608-5087-9752).....210

Diagramme simplifié du durcissement structural d'un alliage d'aluminium-cuivre.....210

- C. Applications Courantes.....210

CHAPITRE 12 : AUTRES MÉTAUX ET ALLIAGES D'USAGE COURANT.....213

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

12.1. La Métallurgie de l'Étain et ses Applications (Soudure)....213
- a. De l'Âge du Bronze au circuit imprimé....213
- A. L'Étain (Sn) : Du Minerai au Métal....213

FIGURE 44 : RÉF. IMG (0313-5910-4997)....215

De la cassitérite brute au lingot d'étain purifié par réduction....215
- B. La Soudure Tendre : Le Rôle Central de l'Étain....215

FIGURE 45 : RÉF. IMG (9891-1915-2740)....218

Gros plan sur un fer à souder réalisant une soudure électronique....218
- Scénarios et Exercices....218
- Une simple soudure à Mbuji-Mayi....218

12.2. La Métallurgie du Zinc (Galvanisation) et du Plomb....220
- a. Introduction : Deux métaux, deux destins....220
- A. Le Zinc et le principe de la galvanisation....220

FIGURE 46 : RÉF. IMG (8001-5677-7815)....223

Schéma du procédé de galvanisation à chaud d'une pièce d'acier....223
- B. Le Plomb, un métal dense aux usages spécifiques....223

12.3. Les Alliages Antifriction (Régules) pour Paliers Lisses....225
- a. Le paradoxe du frottement....225
- A. Définition et Structure Hétérogène....225

FIGURE 47 : RÉF. IMG (2233-8521-3424)....228

Structure microscopique d'un régule avec matrice tendre et cristaux durs....228
- B. Classification et Propriétés....228

12.4. Notions sur le Titane et les Superalliages....231
- a. Des métaux venus des étoiles ?....231
- A. Le Titane (Ti) : Le compromis idéal....231
- B. Les Superalliages : Les maîtres du feu....231

FIGURE 48 : RÉF. IMG (8565-1856-6079)....234

Coupe d'une aube de turbine en superalliage pour moteur d'avion....234
- C. Récapitulatif des applications....234

ANNEXES....237

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Diagramme Fer-Carbone Simplifié.....237
- A. Définition et Axes du Diagramme.....237
- B. Phases et Constituants Fondamentaux.....237
- C. Points et Lignes de Transformations Invariantes.....238
- D. Lignes Critiques du Diagramme.....239
- E. Classification des Aciers et Fontes (à l'équilibre).....239

Guide des Traitements Thermiques.....240
- A. Principes Fondamentaux et Rôle du Diagramme Fer-Carbone.....240
- B. Les Traitements Thermiques Massiques.....241
- C. Les Traitements de Surface.....242

Tableau de Désignation des Matériaux.....243
- A. Principes de la Désignation Normalisée.....243
- B. La Norme Européenne (EN 10027) pour les Aciers.....243
- C. Désignation des Fontes (EN 1560).....245

PRÉLIMINAIRES

Objectifs Pédagogiques du Cours

1. Objectifs cognitifs et théoriques

L'acquisition des savoirs fondamentaux en métallurgie structure la première compétence visée. Au terme de ce cours, l'apprenant doit être capable de : - Différencier la structure et les propriétés des métaux ferreux, non ferreux et de leurs principaux alliages. - Expliquer les mécanismes et les effets des traitements thermiques (trempe, revenu, recuit) sur la microstructure des aciers. - Interpréter les informations essentielles d'un diagramme d'équilibre, spécifiquement le diagramme fer-carbone. - Identifier les principaux modes de dégradation des matériaux métalliques, notamment la corrosion.

2. Objectifs pratiques et méthodologiques

Au-delà des savoirs, le développement de compétences pratiques constitue un axe central. L'élève doit pouvoir transférer ses connaissances théoriques en gestes techniques et en procédures logiques. Les capacités attendues sont : - Sélectionner un matériau métallique approprié pour une application mécanique donnée, en justifiant son choix par des arguments techniques. - Analyser une cause probable de rupture d'une pièce mécanique simple en se basant sur les principes de la science des matériaux. - Mettre en relation les désignations normalisées des matériaux avec leurs caractéristiques et domaines d'emploi.

3. Objectifs comportementaux et transversaux

Finalement, la formation vise l'intégration d'un savoir-être professionnel indispensable au métier de mécanicien. L'enseignement de la métallurgie doit cultiver : - La rigueur intellectuelle dans l'analyse et la résolution de problèmes techniques. - La conscience des enjeux de sécurité liés à la manipulation des matériaux et à l'utilisation des équipements (fours, machines d'essai). - Un esprit critique face aux fiches techniques des fournisseurs et aux solutions "universelles".

Approche Didactique et Méthodologique

1. Du Phénomène Observable au Modèle Scientifique

La démarche pédagogique privilégie un ancrage constant dans le réel. Une observation macroscopique, telle la rupture d'une pièce mécanique à Boma ou la corrosion d'une tôle à Matadi, sert de point d'entrée. L'analyse part du visible pour atteindre l'invisible. Ce cheminement hypothético-déductif lie ainsi la théorie abstraite (diagrammes de phase, réseaux cristallins) à ses conséquences pratiques et observables sur le terrain. L'élève apprend à voir la science derrière l'objet.

2. Une Structuration en Spirale et Contextualisée

La progression des savoirs suit un modèle en spirale. Les notions fondamentales, comme la structure des métaux ou leurs propriétés mécaniques, sont introduites, puis réinvesties et complexifiées dans des chapitres ultérieurs traitant des traitements thermiques ou de la science du soudage. Chaque concept théorique est systématiquement contextualisé par une application concrète. L'objectif final est la formation d'un technicien capable de diagnostiquer une défaillance ou de choisir un matériau, que ce soit pour un atelier à Mbuji-Mayi ou un chantier naval sur le fleuve à Kisangani.

Contexte Industriel et Applications

1. Positionnement de la discipline

Toute production mécanique dépend d'une maîtrise rigoureuse des matériaux métalliques. Ce cours ancre les savoirs théoriques fondamentaux dans la réalité industrielle. Il ne s'agit pas d'une exploration purement abstraite des structures cristallines ou des diagrammes de phase. L'objectif pédagogique est de former des techniciens capables de sélectionner un matériau, de justifier ce choix par des arguments scientifiques et de prévoir son comportement en service sous des contraintes mécaniques et environnementales spécifiques. La métallurgie est ici l'outil décisionnel du mécanicien.

2. Ancrage dans les applications

Les applications industrielles dictent l'approche didactique de cet enseignement. De la fabrication de pièces de rechange pour les engins miniers du Katanga à la maintenance des infrastructures hydroélectriques du Kongo Central, la compétence métallurgique est centrale. Chaque chapitre du

programme, des essais mécaniques aux traitements thermiques, trouve sa justification dans une problématique concrète. La durabilité d'un outil de coupe, la résistance à la corrosion d'une structure portuaire ou la soudabilité d'un châssis assemblé à Kisangani sont des exemples directs qui doivent guider l'enseignement.

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Partie I : Microstructure et Diagramme d'Équilibre des Aciers

a. L'acier, un matériau omniprésent

L'acier est le squelette du monde moderne. Une armature de bâtiment à Goma, une lame de machette au Kasaï ou un rail de la SNCC à Lubumbashi partagent une même base : l'alliage de fer et de carbone. Pourtant, leurs propriétés diffèrent radicalement. La clé de ce mystère ne se trouve pas à l'œil nu. Elle est cachée à une échelle infiniment plus petite, au niveau atomique.

b. Au cœur du métal : la microstructure

Chaque métal possède une organisation interne appelée microstructure. Elle est l'assemblage de "grains" cristallins, un peu comme les ingrédients d'un plat de pondu bien préparé à Mbandaka. La taille, la forme et la nature de ces grains dictent le comportement final du matériau. Un acier sera dur, cassant ou au contraire souple et résistant selon l'architecture de sa microstructure.

c. La carte du forgeron : le diagramme Fer-Carbone

Le diagramme d'équilibre fer-carbone est la carte routière du métallurgiste. Ce graphique représente les différentes phases (structures) possibles de l'acier en fonction de deux paramètres cruciaux : la température et le pourcentage de carbone. Savoir lire cette carte permet de prédire avec précision quelle microstructure se formera lors du refroidissement. C'est un outil de prédiction fondamental pour tout mécanicien.

d. De la théorie à l'atelier : maîtriser les propriétés

La maîtrise du diagramme fer-carbone ouvre la porte aux traitements thermiques. La trempe, le recuit ou le revenu ne sont plus des opérations magiques. Elles deviennent des actions contrôlées, basées sur des lois physiques précises. Passer d'une zone du diagramme à une autre, c'est modifier volontairement la microstructure pour obtenir la dureté ou la ténacité requise pour une pièce mécanique spécifique.

Chapitre 1 : Les Transformations du Fer et de ses Alliages

1.1. États Allotropiques du Fer et Points de Transformation

a. L'étrange flexibilité du fer

Un des faits les plus fascinants de la métallurgie concerne le fer. Ce métal, qui paraît si rigide et immuable dans une barre de construction à Mbuji-Mayi, possède en réalité une vie interne secrète. En fonction de la température, ses atomes se réorganisent, un peu comme des soldats qui changent de formation sur un terrain de parade.

Cette capacité d'un solide à changer de structure cristalline sans fondre est l'allotropie. Pour le fer, ce n'est pas une simple curiosité de laboratoire. C'est le fondement même de la fabrication des aciers, des plus doux pour les carrosseries aux plus durs pour les outils coupants du Kwilu.

A. L'Allotropie du Fer Pur

Le fer pur existe sous différentes formes cristallines, ou phases, selon la température. Chaque forme possède des propriétés mécaniques distinctes.

- **Le Fer Alpha (α) ou Ferrite.** Stable de la température ambiante jusqu'à 912°C. Sa structure est Cubique Centrée (CC). Les atomes sont disposés aux sommets d'un cube et un atome se trouve au centre du cube. La ferrite est magnétique.
- **Le Fer Gamma (γ) ou Austénite.** Stable entre 912°C et 1394°C. Sa structure est Cubique à Faces Centrées (CFC). Les atomes sont aux sommets du cube et au centre de chacune des six faces. L'austénite est non magnétique et peut dissoudre beaucoup plus de carbone que la ferrite.
- **Le Fer Delta (δ).** Stable de 1394°C jusqu'à la température de fusion (1538°C). Sa structure redevient Cubique Centrée (CC), identique à celle du fer alpha.

B. Les Points de Transformation (Points Critiques)

Les températures précises où le fer change de structure sont appelées points critiques ou points de transformation. Ils sont notés avec la lettre A.

- **Point A2 (768°C) : Point de Curie.** À cette température, le fer perd son magnétisme. Ceci est une transformation physique, non allotropique. La structure reste Cubique Centrée.
- **Point A3 (912°C) : Transformation Ferrite → Austénite.** Au chauffage, la structure CC du fer alpha devient la structure CFC du fer gamma. Le métal se contracte légèrement.
- **Point A4 (1394°C) : Transformation Austénite → Fer Delta.** Au chauffage, la structure CFC du fer gamma redevient une structure CC (fer delta).

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Figure 1 : Réf. IMG (0054-0137-0123): Courbe de refroidissement du fer pur montrant ses transformations allotropiques.

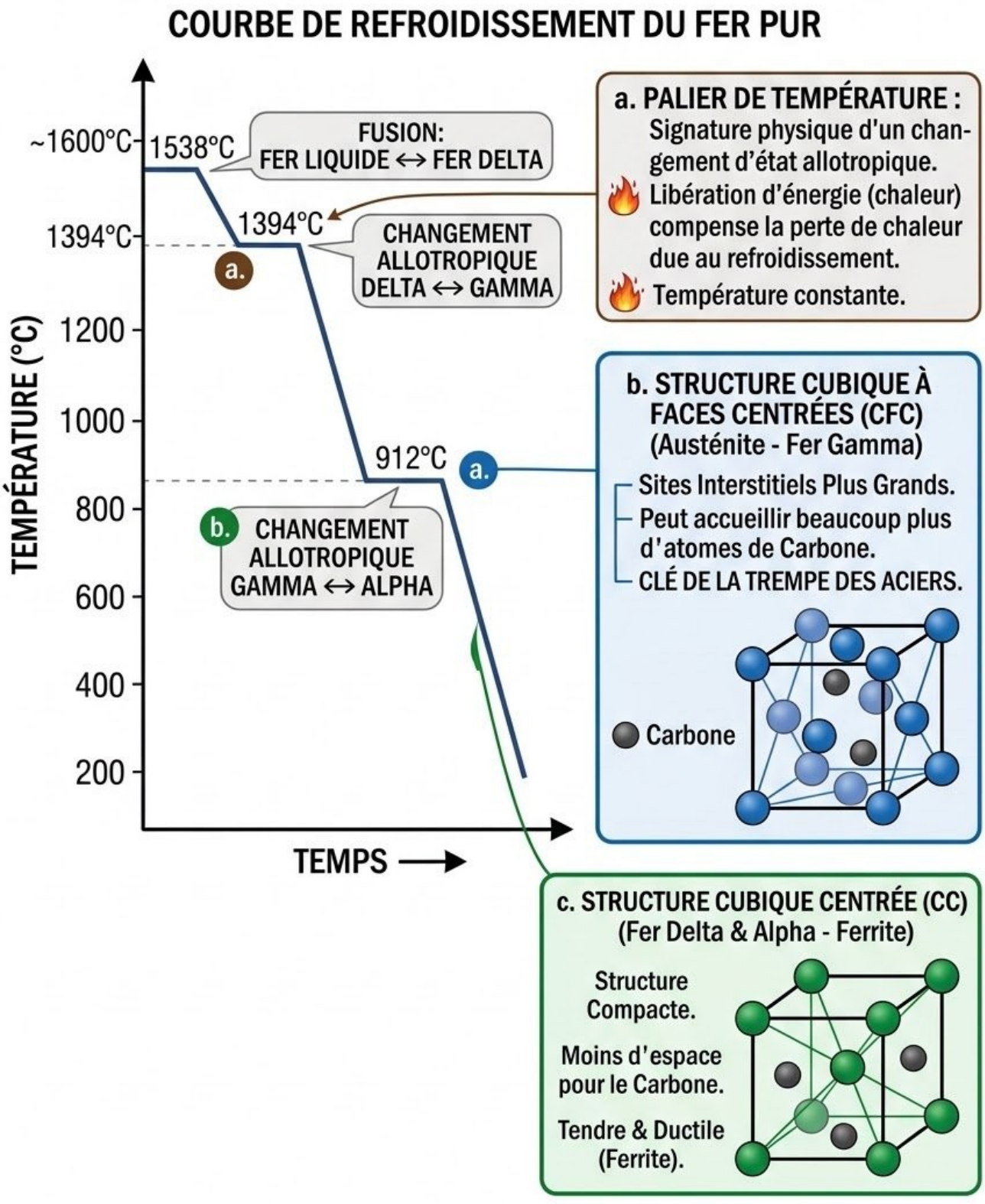


Figure 1 : Réf. IMG (0054-0137-0123)

Courbe de refroidissement du fer pur montrant ses transformations allotropiques.

a. La lecture des paliers de température

Un palier sur la courbe indique un dégagement d'énergie à température constante. Pendant le refroidissement, le passage de la structure delta à gamma, puis de gamma à alpha, libère de la chaleur. Cette énergie compense la perte de chaleur due au refroidissement, créant un plateau de température. C'est la signature physique d'un changement d'état allotropique.

b. La structure Cubique à Faces Centrées (CFC)

La phase Austénite (Fer Gamma) possède cette structure CFC. Les espaces entre les atomes (sites interstitiels) y sont plus grands que dans la structure CC. Cela explique pourquoi l'austénite peut accueillir beaucoup plus d'atomes de carbone. C'est la clé de la trempe des aciers.

c. La structure Cubique Centrée (CC)

Le Fer Alpha (ferrite) et le Fer Delta partagent cette structure. Elle est plus compacte et offre moins d'espace pour les atomes de carbone. La ferrite est plus tendre et plus ductile que les autres constituants de l'acier qui apparaîtront avec l'ajout de carbone.

Scénarios et Exercices

Une leçon de forge à Mbandaka

Papa Bolingo, forgeron réputé sur les bords du fleuve Congo, dans la province de l'Équateur, n'a jamais étudié la métallurgie. Pourtant, il connaît les secrets du fer. Pour fabriquer un harpon solide, il plonge un morceau de ferraille dans son brasero. Il observe attentivement la couleur du métal. Il attend qu'il atteigne un rouge cerise si brillant qu'il tire vers l'orangé. "Là, le fer est doux comme la pâte de manioc," dit-il en souriant. "Il écoute le marteau." Sans le savoir, Papa Bolingo attend que le fer se transforme en austénite. À cette température (plus de 912°C), la structure CFC du métal le rend beaucoup plus malléable, lui permettant de le façonner sans qu'il ne se brise. Sa connaissance des couleurs est une lecture directe des points de transformation du métal.

Exercice 1 : Chauffage contrôlé à Kisangani

Énoncé : Un technicien de laboratoire à l'Université de Kisangani (Province Orientale) place un échantillon de fer pur dans un four. Il programme une montée en température de 25°C jusqu'à 1450°C. Décris les transformations de la structure cristalline du fer que le technicien observera.

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : État initial (25°C)** Le fer est à température ambiante. Sa structure est celle du Fer Alpha (ferrite), de type Cubique Centrée (CC). Il est magnétique.
2. **Étape 2 : Passage du Point de Curie (768°C)** À 768°C, le fer perd ses propriétés magnétiques. Sa structure cristalline, cependant, ne change pas. Il reste du Fer Alpha (CC).
3. **Étape 3 : Passage du Point A3 (912°C)** À 912°C, la première transformation allotropique a lieu. La structure Cubique Centrée (CC) se réorganise en une structure Cubique à Faces Centrées (CFC). Le fer devient du Fer Gamma (austénite).
4. **Étape 4 : Passage du Point A4 (1394°C)** À 1394°C, une seconde transformation allotropique se produit. La structure Cubique à Faces Centrées (CFC) de l'austénite redevient une structure Cubique Centrée (CC). Le fer devient du Fer Delta.

Exercice 2 : Le secret de la machette de Matadi

Énoncé : Un artisan de Matadi (Kongo Central) fabrique une machette. Il chauffe la lame d'acier au rouge vif (environ 950°C) avant de la marteler pour lui donner sa forme finale. Explique, en utilisant le concept d'allotropie, pourquoi cette étape de chauffage est essentielle.

Résolution pas-à-pas :

1. **Étape 1 : Identifier la phase du métal à 950°C** La température de 950°C est supérieure au point de transformation A3 (912°C). Le fer contenu dans l'acier se trouve donc sous sa forme allotropique Gamma (γ), appelée austénite.
2. **Étape 2 : Décrire les propriétés de l'austénite** La structure de l'austénite est Cubique à Faces Centrées (CFC). Cette phase est connue pour être significativement plus ductile et malléable à chaud que la ferrite (stable à température ambiante).

3. **Étape 3 : Conclure sur l'avantage pratique** En chauffant l'acier dans le domaine de l'austénite, l'artisan le rend plus "mou" et plus facile à déformer. Le martelage demande moins d'effort et le risque de créer des fissures ou des cassures dans le métal est fortement réduit. Le chauffage n'est donc pas juste pour ramollir le métal, mais pour le transformer dans une phase structurellement plus apte au forgeage.

1.2. Constituants Microscopiques et Influence du Refroidissement

a. Le secret du forgeron

Pendant que le forgeron de Mbandaka plonge sa machette rougie dans un bain d'huile, il accomplit sans le savoir un acte de pure métallurgie. Il modifie l'âme même du métal, changeant sa structure à une échelle invisible à l'œil nu. Ce geste, répété depuis des siècles dans le Kwilu ou le Kasaï, est en réalité une science exacte et prédictive.

La vitesse à laquelle l'acier refroidit est la clé qui détermine ses propriétés finales. Une seule et même pièce d'acier, chauffée à la même température, peut devenir dure comme du verre ou douce comme du plomb. Tout dépend du chemin qu'on lui fait prendre pour revenir à la température ambiante.

A. Les Constituants Fondamentaux de l'Acier

Un acier n'est jamais une matière parfaitement homogène à l'échelle microscopique. Il est un assemblage de différents "ingrédients" appelés constituants.

- **La Ferrite (α)** C'est presque du fer pur. Elle est très molle, ductile et magnétique. Elle constitue la "matrice" souple de la plupart des aciers de construction.
- **La Cémentite (Fe_3C)** C'est un carbure de fer, un composé chimique de fer et de carbone. Contrairement à la ferrite, la cémentite est extrêmement dure et fragile. Elle est l'élément qui apporte la dureté à l'acier.

B. Les Agrégats : L'union fait la force

Rarement, la ferrite et la cémentite existent seules. Elles s'organisent en structures mixtes, ou agrégats.

- **La Perlite** Cet agrégat est un mélange très fin de lamelles de ferrite et de cémentite. Imaginez un mille-feuille microscopique. Sa présence donne à l'acier un bon équilibre entre la ténacité (résistance aux chocs) et la dureté. La perlite se forme lors d'un refroidissement lent, comme à l'air libre.

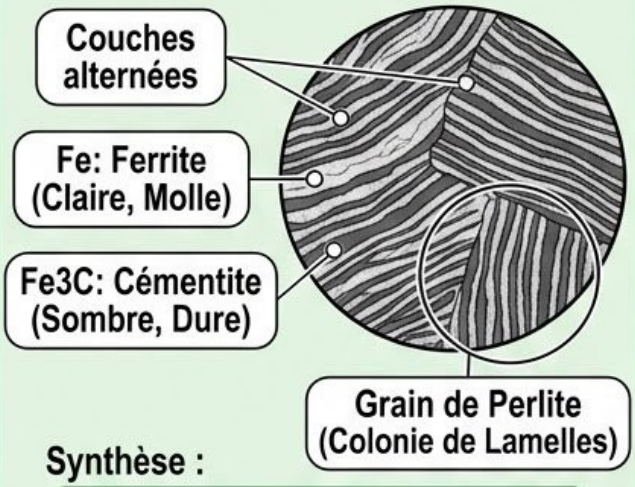
MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

Figure 2 : Réf. IMG (2317-0558-8508)

Comparaison des microstructures de l'acier après refroidissement de l'austénite

A. Refroidissement Lent
(Formation de Perlite)

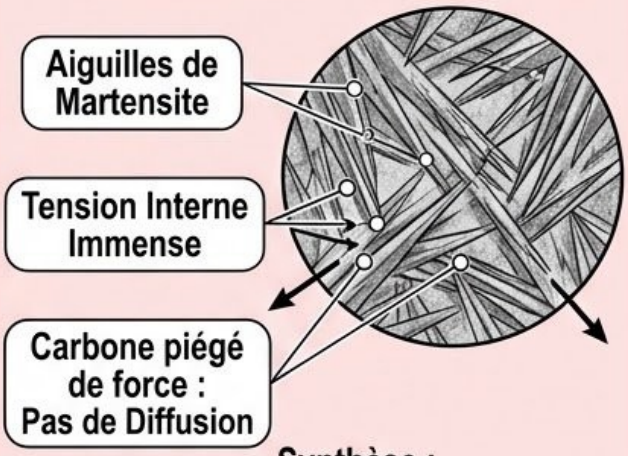
Austénite → LENT → Perlite



Synthèse :
- DIFFUSION du Carbone possible
- Organisation Lamellaire

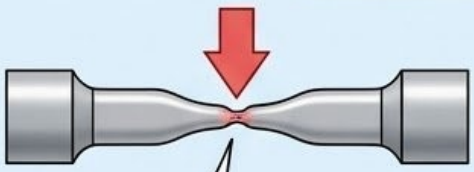
B. Refroidissement Très Rapide
(Trempe - Formation de Martensite)

Austénite → TRÈS RAPIDE → Martensite



Synthèse :
- Structure Aciculaire
- Structure “Hors d’Équilibre”

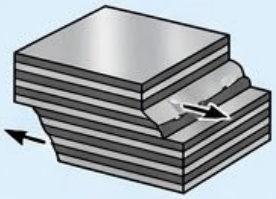
C. Conséquence Mécanique Directe



Acier Perlitique se déforme avant rupture



Acier Martensitique casse sans prévenir



Glissement des lamelles → DUCTILITÉ





Structure figée → EXTRÊME DURETÉ & GRANDE FRAGILITÉ

Figure 2 : Réf. IMG (2317-0558-8508)

Comparaison des microstructures de l'acier après refroidissement de l'austénite

a. L'organisation lamellaire de la perlite

Sur la gauche, la perlite se révèle. Elle est formée de couches alternées de ferrite (claire, molle) et de cémentite (sombre, dure). Cette structure résulte d'un refroidissement lent qui laisse le temps aux atomes de carbone de diffuser et de s'organiser avec le fer. Chaque "grain" de perlite est une colonie de ces lamelles. Sa formation est un processus contrôlé par la diffusion.

b. La structure aciculaire de la martensite

Sur la droite, la martensite montre une structure en aiguilles (aciculaire). Elle apparaît lors d'un refroidissement très rapide (trempe). Les atomes de carbone n'ont pas le temps de diffuser. Ils sont piégés de force dans le réseau du fer, créant une tension interne immense. Cette structure est dite "hors d'équilibre".

c. La conséquence mécanique directe

La structure en lamelles de la perlite permet un certain glissement, conférant de la ductilité. Au contraire, la structure figée et sursaturée de la martensite bloque tout mouvement. Cela explique son extrême dureté et sa grande fragilité. Un acier perlitique se déforme avant de rompre. Un acier martensitique casse sans prévenir.

C. La Vitesse de Refroidissement : Le Chef d'Orchestre

La nature du constituant final dépend entièrement du temps que l'on donne au métal pour se transformer.

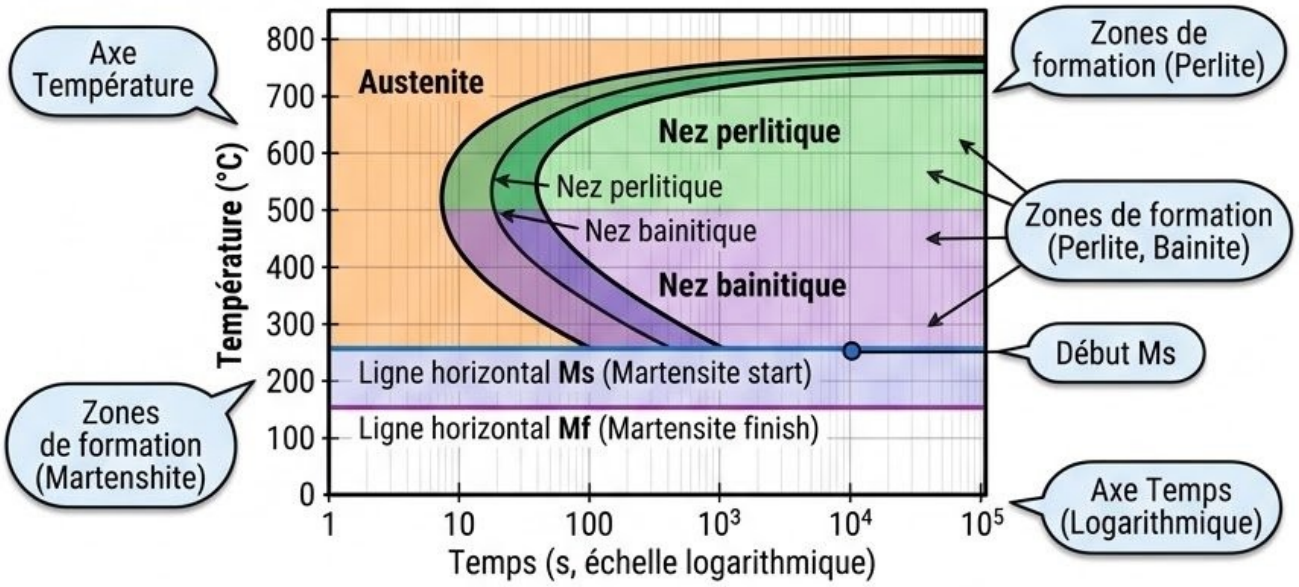
- **Refroidissement Lent (ex: dans un four éteint)** Le carbone a tout le temps de migrer pour former de la perlite. Le métal obtenu est relativement doux et usinable.
- **Refroidissement Modéré (ex: à l'air calme)** La transformation produit encore de la perlite, mais potentiellement plus fine, rendant l'acier légèrement plus résistant.

- **Refroidissement Rapide (Trempe à l'eau ou à l'huile)** La chute de température est si brutale que la diffusion du carbone est impossible. La structure se fige et forme un nouveau constituant : la **martensite**. La martensite est extrêmement dure mais aussi très fragile.
- **Refroidissement Intermédiaire** Une vitesse contrôlée peut produire un autre constituant, la **bainite**, dont la dureté est intermédiaire entre celle de la perlite et de la martensite.

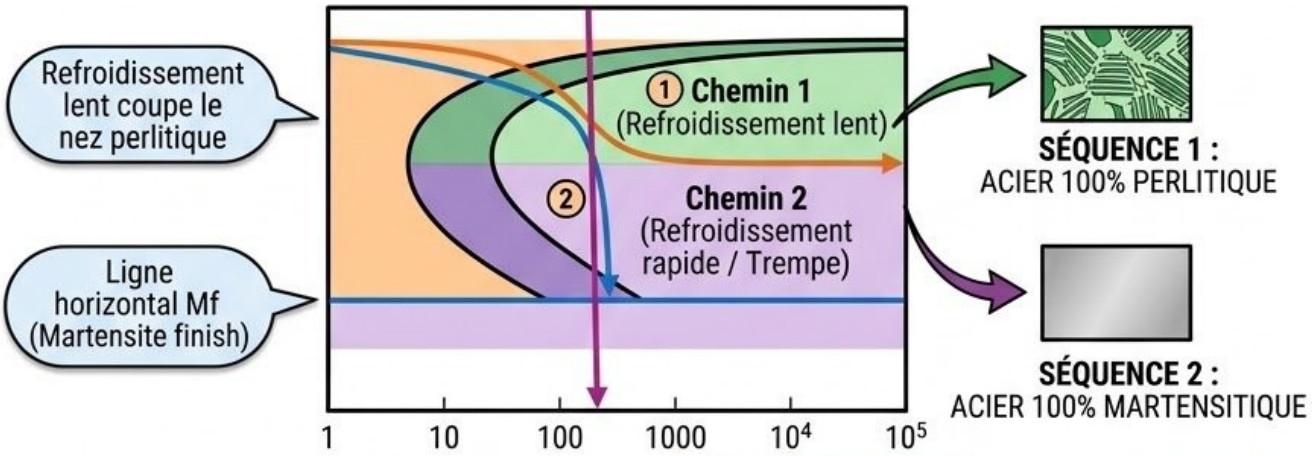
Figure 3 : Réf. IMG (2328-3317-2589)

Diagramme TTT (Temps-Température-Transformation) d'un acier eutectoïde

a. Lecture du diagramme TTT



b. Les chemins de refroidissement



c. La transformation sans diffusion

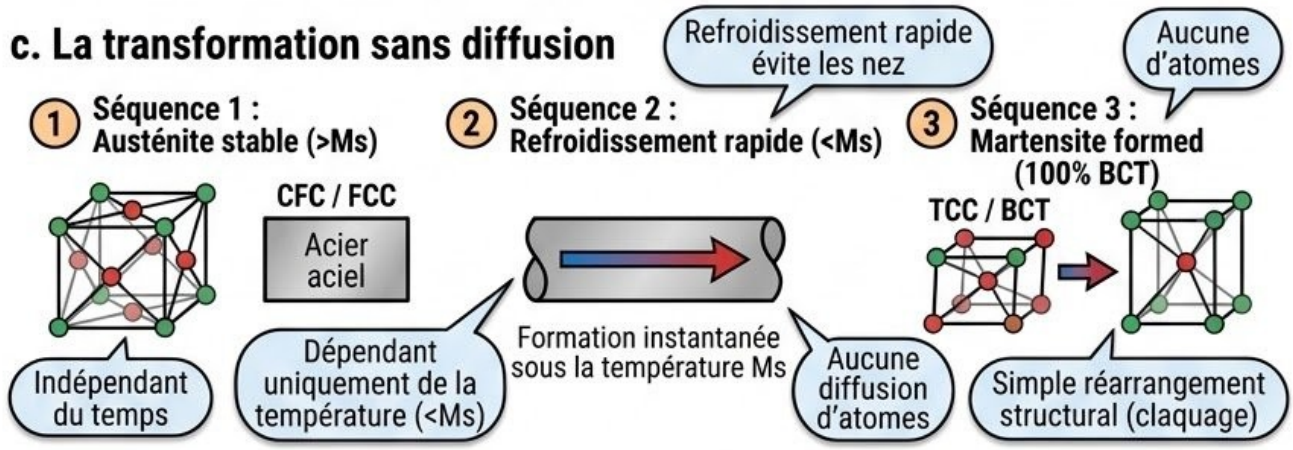


Figure 3 : Réf. IMG (2328-3317-2589)

Diagramme TTT (Temps-Température-Transformation) d'un acier eutectoïde

a. Lecture du diagramme TTT

Ce diagramme est la carte d'identité d'un acier. L'axe vertical indique la température. L'axe horizontal, logarithmique, représente le temps. Les courbes en "C" (nez de transformation) délimitent les zones où la perlite et la bainite commencent et finissent de se former. La ligne horizontale M_s indique le début de la formation de la martensite.

b. Les chemins de refroidissement

Une courbe de refroidissement est tracée sur ce diagramme pour prédire la structure finale. Un refroidissement lent (chemin 1) coupe le "nez" perlitique : l'acier sera 100% perlitique. Un refroidissement rapide (chemin 2) évite les nez et atteint la ligne M_s : l'acier sera 100% martensitique.

c. La transformation sans diffusion

La martensite est unique. Sa formation ne dépend pas du temps, seulement de la température. Dès que l'acier refroidit sous la température M_s (Martensite start), la transformation est instantanée. Elle ne nécessite aucune diffusion d'atomes, c'est un simple réarrangement du réseau cristallin, une sorte de "claquage" structural.

■ ■ ■

Scénarios et Exercices

Anecdote : Les rails du Matadi-Kinshasa

Lors de la construction du chemin de fer Matadi-Kinshasa, les ingénieurs firent face à un dilemme métallurgique. Les rails devaient être assez durs pour résister à l'usure causée par le passage des roues des wagons. Cependant, ils devaient aussi être suffisamment tenaces pour ne pas casser sous le poids des lourds convois miniers, surtout avec les variations de température du Kongo Central. Un rail trop dur (martensitique) serait fragile comme du verre. Un rail trop mou (ferritique) s'userait en quelques mois. La solution fut un acier à la microstructure précisément contrôlée, majoritairement perlitique, pour obtenir le meilleur compromis entre résistance à l'usure et ténacité. Ce choix garantit encore aujourd'hui la sécurité de la ligne.