

**OFPPT**

**ROYAUME DU MAROC**

مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل

Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail

*Direction Recherche et Ingénierie de la Formation*

## **RÉSUMÉ THÉORIQUE & GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES**

**MODULE 12 : Matériaux,  
Procédés de mise en forme, Traitements**

**Secteur : FABRICATION MÉCANIQUE**

**Spécialité : T.S.M.F.M.**

**Niveau : TECHNICIEN SPÉCIALISÉ**

## PORTAIL DE LA FORMATION PROFESSIONNELLE AU MAROC

Télécharger tous les modules de toutes les filières de l'OFPPT sur le site dédié à la formation professionnelle au Maroc : [www.marocetude.com](http://www.marocetude.com)

Pour cela visiter notre site [www.marocetude.com](http://www.marocetude.com) et choisissez la rubrique :

### MODULES ISTA



The image shows a screenshot of the website Maroc Etude.Com. At the top, there is a navigation menu with the following items: HOME, LIVRES, **MODULES ISTA**, ANNUAIRE ECOLES, DOCTORAT, LETTRE DE MOTIVATION, NOUS CONTACTER, and SE CONNECTER. Below the menu is the website's logo, "Maroc Etude.Com", and the tagline "Connaissance - Métier - Technique". There are also several utility links: Annonces Google, Emploi Maroc, Messagerie, Telecharger Un Jeu, and Maroc Annonces. A search bar is located on the right side of the header. The main content area features a central advertisement for MacKeeper with a -20% discount. To the left of the ad is a login section with fields for "Identifiant" (containing "sniper") and "Mot de passe", and a "Connexion" button. To the right of the ad is a sidebar with a search bar and a list of links under the heading "Annonces Google": Jeu De Jeux, Jeux Sur Internet, Ecole Ingénieur, Dépanner et configurer votre réseau à domicile (with sub-links for Outil de Diagnostic, WI-FI / Ethernet, Console de jeu, Imprimante, and Messagerie), and Messagerie. At the bottom of the page, there is a quote: "On ne jouit bien que de ce qu'on partage" [Madame de Genlis].

**Document élaboré par :**

*Nom et prénom*  
**FLOREA FLORIAN**

**CDC GM**

**DRIF**

**Révision linguistique**

- 
- 
- 

**Validation**

- ETTAIB Chouaïb
- 
-

## SOMMAIRE

	<i>Page</i>
<i>Présentation du module</i>	
<i>Résumé de théorie</i>	
1. <i>Types de conception</i>	19
2. <i>Classes de matériaux et types de procédés</i>	23
3. <i>Caractéristiques des matériaux</i>	30
4. <i>Propriétés caractérisant un matériau</i>	33
5. <i>Diagramme d'équilibre fer/carbone</i>	51
6. <i>Désignation des fontes</i>	66
7. <i>Désignation des aciers</i>	67
8. <i>Élaboration de l'acier</i>	71
9. <i>La mise en œuvre</i>	80
10. <i>TRAITEMENTS THERMIQUES des aciers</i>	88
11. <i>Choix et utilisation des métaux</i>	93
I. <i>Bibliographie</i>	111

## **MODULE 12 : PARTIE 1:CHOIX ET DESIGNATION DES MATERIAUX**

**Code :**

**Durée : 15 heures**

### **OBJECTIF OPÉRATIONNEL DE PREMIER NIVEAU DE COMPORTEMENT**

#### **COMPORTEMENT ATTENDU**

Pour démontrer sa compétence, le stagiaire doit **choisir et désigner des matériaux selon le besoin** selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent.

#### **CONDITIONS D’EVALUATION**

- Travail individuel.
- À partir :
  - de plan, de croquis ou de directives;
  - de plan de définition des pièces avec des fonctions précises ;
  - d’un cahier des charges ( fonctions et caractéristiques attendues ) ;
  - d’une base de données;
- À l’aide :
  - de normes ;
  - de formulaires, abaques et diagrammes;
  - d’une bibliographie technique de référence ;
  - des catalogues fournisseurs ;

#### **CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE**

- Bonnes connaissances en technologie générale des matériaux ;
- Désignation correcte et respect des normes ;
- Utilisation exacte de la terminologie appropriée ;
- Démarche judicieuse d’approche et d’analyse de problème de choix de matériau;
- Choix méthodique et justifié d’un matériau en fonction des critères techniques et économiques ;
- Souci du rapport qualité / prix
- Analyse de la valeur

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU  
DE COMPORTEMENT ( suite )**

**PRECISIONS SUR LE  
COMPORTEMENT ATTENDU**

**CRITERES PARTICULIERS DE  
PERFORMANCE**

- |  |  |
|--|--|
| A. Désigner des matériaux métalliques ferreux et non ferreux   | - Respect de la normalisation<br>- Utilisation correcte de la terminologie appropriée  |
| B. Choisir un métal ferreux et non ferreux en fonction des besoins et des performances mécaniques utiles en construction de qualité courante                                 | - Justesse d'interprétation du cahier des charges<br>- Choix en fonction des critères techniques et économiques<br>- Analyse de la valeur  |
| C. Choisir le type d'essai mécanique en fonction de l'application envisagée  | - Choix correct d'un type d'essai mécanique en fonction des caractéristiques à vérifier  |
| D. Choisir les traitements thermiques (TT) et mécaniques en fonction des performances recherchées  | - Choix correct du TT et mécanique en fonction des spécifications demandées par le cahier des charges<br>- Bonnes connaissances au niveau des modes opératoires des différentes techniques |
| E. Choisir le brut en fonction des critères techniques et économiques  | - Choix en fonction des critères techniques et économiques<br>- Analyse de la valeur<br>- Dialoguer correctement avec un spécialiste   |
| F. Choisir un matériau de synthèse en fonction de son utilisation et des performances mécaniques utiles en construction de qualité courante et dialoguer avec un spécialiste | - Choix en fonction des critères techniques et économiques<br>- Analyse de la valeur<br>- Dialoguer correctement avec un spécialiste   |

## OBJECTIFS OPERATIONNELS DE SECOND NIVEAU

**Le stagiaire doit maîtriser les savoirs, savoir-faire, savoir-percevoir ou savoir-être juges préalables aux apprentissages directement requis pour l'atteinte de l'objectif opérationnel de premier niveau, tels que :**

**Avant d'apprendre à désigner correctement les matériaux métalliques ferreux et non ferreux (A) :**

1. Connaître les principaux modes d'élaboration des métaux et alliages métalliques

**Avant d'apprendre à choisir un métal ferreux et non ferreux en fonction des besoins et des performances mécaniques utiles en construction de qualité courante (B) :**

2. Définir les critères de choix et l'emploi économique des matériaux métalliques
3. Connaître les formes standards commercialisées et leurs coûts

**Avant d'apprendre à choisir le type d'essai mécanique en fonction de l'application envisagée (C) :**

4. Indiquer les propriétés mécaniques des matériaux métalliques et les essais correspondants

**Avant d'apprendre à choisir les traitements thermiques et thermochimiques en fonction des performances recherchées (D) :**

5. Connaître les traitements thermiques et thermochimiques courants ainsi que les améliorations des performances mécaniques associées

**Avant d'apprendre à choisir le brut en fonction des critères techniques et économiques (E) :**

6. Connaître les principaux procédés d'obtention des pièces brutes : avantages et inconvénients
7. Se soucier du rapport qualité / prix et délai
8. S'informer des nouvelles techniques de mise en forme des matériaux

**Avant d'apprendre à choisir un matériau de synthèse en fonction de son utilisation et des performances mécaniques utiles en construction de qualité courante et dialoguer avec un spécialiste (F) :**

9. Connaître la structure, les grandes familles et la désignation des matériaux de synthèses
10. Connaître le principe des procédés de mise en forme de ces matériaux

## **MODULE 12 : PARTIE 2 : TRAITEMENTS ET PROCÉDES DE MISE EN FORME DES MATÉRIAUX**

**Code :**

**Durée : 15 heures**

### **OBJECTIF OPÉRATIONNEL DE PREMIER NIVEAU DE COMPORTEMENT**

#### **COMPORTEMENT ATTENDU**

Pour démontrer sa compétence, le stagiaire doit

**proposer selon le besoin :**

- **des traitements thermiques, thermochimiques**
- **des traitements de surfaces**
- **des procédés de mise en forme des matériaux**

selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent.

#### **CONDITIONS D'ÉVALUATION**

- Travail individuel.
- À partir :
  - de plans, de croquis ou de directives;
  - de questions et problèmes posés par le formateur;
- À l'aide :
  - de plans, de croquis ou de directives;
  - de questions posées par le formateur;

#### **CRITÈRES GÉNÉRAUX DE PERFORMANCE**

- Désignation correcte des matériaux, respect des normes
- Choix justifié d'un traitement et des procédés en fonction des critères :
  - techniques
  - économiques
- Capacité à dialoguer avec un spécialiste dans le domaine



**OBJECTIF OPÉRATIONNEL DE PREMIER NIVEAU**  
**DE COMPORTEMENT (suite)**

**PRECISIONS SUR LE**  
**COMPORTEMENT ATTENDU**

**CRITERES PARTICULIERS DE**  
**PERFORMANCE**

- |   |   |
|---|---|
| A. Choisir un traitement thermique en fonction du besoin  | - Choix justifié en fonction des critères techniques et économiques<br>- Dialoguer avec un spécialiste dans le domaine (sous-traitant)<br>- Connaissances au niveau des modes opératoires |
| B. Choisir un traitement de surface approprié             | - Choix justifié en fonction des critères techniques et économiques<br>- Dialoguer avec un spécialiste dans le domaine (sous-traitant)<br>- Connaissances au niveau des modes opératoires |
| C. Sélectionner un procédé de mise en forme des matériaux | - Choix justifié en fonction des critères techniques et économiques   |

## OBJECTIFS OPERATIONNELS DE SECOND NIVEAU

**Le stagiaire doit maîtriser les savoirs, savoir-faire, savoir-percevoir ou savoir-être jugés préalables aux apprentissages directement requis pour l'atteinte de l'objectif opérationnel de premier niveau, tels que :**

**Avant d'apprendre à choisir un traitement thermique en fonction du besoin et dialoguer avec un spécialiste (A) :**

1. Identifier les éléments théoriques et pratiques essentiels à la compréhension des traitements thermiques utilisés
2. Déterminer le ou les traitements thermiques adaptés à la réalisation de pièces mécaniques et définir les paramètres de contrôle
3. Formuler les bonnes questions aux spécialistes des traitements thermiques
4. S'informer des nouvelles techniques dans le domaine des traitements thermiques

**Avant d'apprendre à choisir un traitement de surface approprié et dialoguer avec un spécialiste (B) :**

5. Identifier les sollicitations et les causes de dégradations des pièces dans leurs conditions d'utilisation
6. Déterminer le ou les traitements de surface adaptés à la réalisation de pièces mécaniques et définir les paramètres de contrôle
7. Formuler les bonnes questions aux spécialistes des traitements de surface
8. S'informer des nouvelles techniques dans le domaine des traitements de surface

**Avant d'apprendre à sélectionner le procédé de mise en forme des matériaux et dialoguer avec un spécialiste (C) :**

9. Identifier le procédé à mettre en œuvre pour la réalisation d'une pièce (fonderie; déformation plastiques ; métallurgie des poudres ; collage et d'assemblage)
10. Adapter la géométrie de base à donner à la pièce en fonction du mode de fabrication
11. Évaluer l'intérêt d'une solution par rapport aux autres procédés
12. Formuler les bonnes questions aux spécialistes dans le domaine des procédés de mise en forme
13. S'informer des nouvelles techniques dans le domaine des procédés de mise en forme

## MODULE 12 : Partie 1 : CHOIX ET DÉSIGNATION DES MATÉRIAUX

Code :	Théorie :	50 %
Durée : 15 heures	Travaux pratiques :	42 %
Responsabilité : D'établissement	Evaluation :	8 %

### OBJECTIF OPÉRATIONNEL DE PREMIER NIVEAU DE COMPORTEMENT

#### COMPÉTENCE

- Choisir et désigner des matériaux selon le besoin

#### PRÉSENTATION

Ce module de compétence générale pour le Technicien Méthodes se dispense en cours des deux années du programme de formation, en partie en même temps que le module usinage pièces simples. La relation entre la conception de pièces de nature d'usage et leur faisabilité devra être un souci quotidien.

#### DESCRIPTION

L'objectif de ce module est de faire acquérir la compétence générale lui permettant de répondre aux questions sur le choix, l'utilisation et la mise en forme des matériaux lors de la conception des pièces mécaniques à partir d'un cahier des charges. Il vise donc à rendre le stagiaire apte à communiquer avec les spécialistes en matériaux et leur mise en forme en adoptant un comportement méthodique et communicatif.

#### CONTEXTE D'ENSEIGNEMENT

- Bien que plusieurs éléments de connaissances et d'exercices pratiques de base puissent se réaliser sur des moyens de laboratoire pour la réalisation des essais, les traitements thermiques, il est très important de favoriser des recherches d'information sous forme d'exposé.
- La documentation doit être disponible et il est important de faire le lien entre les la technologie des matériaux et sa mise en œuvre en conception mécanique.
- Les stagiaires auront à faire en groupe des exposés sur des thèmes techniques d'usage (aciers, fontes, traitements thermiques, thermochimiques...).

## CONDITIONS D'EVALUATION

- Travail individuel
- A partir :
  - D'un cahier des charges
  - De consignes et directives : qualité, quantité et délai
  - De plan de définition, de croquis à main levée
  - Du parc machine disponible
- A l'aide :
  - Des documents relationnels, des méthodes, des standards d'entreprise
  - Des dossiers machines
  - Des catalogues de fournisseurs des outils et outillages

OBJECTIFS	ELEMENTS DE CONTENU
11. Connaître les principaux modes d'élaboration des métaux et alliages métalliques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le haut fourneau</li> <li>- Différents types de fours</li> <li>- Modes d'élaboration des métaux : <ul style="list-style-type: none"> <li>•Fontes</li> <li>•Aciers</li> </ul> </li> <li>- Eléments d'addition</li> </ul>
<b>A. Désigner les matériaux métalliques ferreux et non ferreux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Désignation normalisée des : <ul style="list-style-type: none"> <li>•aciers</li> <li>•fontes</li> <li>•alliages d'aluminium</li> <li>•alliages de cuivres</li> </ul> </li> <li>- Codification et désignation commercialisée</li> <li>- Utilisation des catalogues techniques</li> <li>- Utilisation de la terminologie appropriée</li> </ul>
12. Définir les critères de choix et l'emploi économique des matériaux métalliques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Critère de la fonction à remplir</li> <li>- Critère de résistance</li> <li>- Critère économique</li> </ul>
13. Connaître les formes standard commercialisées et leurs coûts	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dimensions normalisées</li> <li>- Série RENARD</li> <li>- Rond</li> <li>- Plat</li> <li>- Tube</li> <li>- Différent type de profiles</li> <li>- Principaux fournisseur dans la région</li> <li>- Utilisation des catalogues constructeurs</li> </ul>
<b>B. Choisir un métal ferreux et non ferreux en fonction des besoins et des performances mécaniques utiles en construction de qualité courante</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interprétation du cahier des charges</li> <li>- Choix en fonction des critères techniques et économiques</li> <li>- Analyse de la valeur</li> </ul>
14. Indiquer les propriétés mécaniques des matériaux métalliques et les essais correspondants	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Essais de traction : ténacité</li> <li>- Essais de résilience : résistance au choc</li> <li>- Essais de dureté (B, V, R) : dureté</li> <li>- Essais d'endurance (fatigue) : endurance</li> </ul>
<b>C. Choisir le type d'essai mécanique en fonction de l'application envisagée</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Choix d'un type d'essai mécanique en fonction des caractéristiques à vérifier</li> </ul>
15. Connaître les traitements thermiques et	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La trempe, Le revenu, Le recuit</li> </ul>

thermochimiques courants ainsi que les améliorations des performances mécaniques associées	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La cémentation</li> <li>- La nitruration</li> <li>- Carbonitruration</li> </ul>
<b>D. Choisir les traitements thermiques (TT) et thermochimique (TC) en fonction des performances recherchées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Choix du TT et TC en fonction des spécifications demandées par le cahier des charges</li> <li>- Modes opératoires</li> <li>- Dureté et usinage</li> </ul>
16. Connaître les principaux procédés d'obtention des pièces brutes : avantages et inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Différent type de moulage</li> <li>- Forgeage</li> <li>- Estampage</li> </ul>
17. Se soucier du rapport qualité / prix et délai	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avantages et inconvénients des différents procédés d'obtention de brut</li> <li>- Choix du procédés en fonction de : la quantité, la qualité, le prix et le délai</li> </ul>
18. S'informer des nouvelles techniques de mise en forme des matériaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procédés automatiques de : <ul style="list-style-type: none"> <li>•Moulage</li> <li>•Forgeage etc</li> </ul> </li> <li>- Recherche d'information et exposés techniques</li> </ul>
<b>E. Choisir le brut en fonction des critères techniques et économiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Choix en fonction des critères techniques et économiques</li> <li>- Analyse de la valeur</li> <li>- Contact des spécialistes en forgeage, estampage et moulage</li> </ul>
19. Connaître la structure, les grandes familles et la désignation des matériaux de synthèses	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les polymères : structures et le propriétés de mise en œuvre</li> <li>- Matériaux thermoplastiques (types courants)</li> <li>- Matériaux thermodurcissables (types courants)</li> <li>- Les matériaux composites</li> <li>- Désignation</li> </ul>
20. Connaître le principe des procédés de mise en forme de ces matériaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise ne formes des polymères : <ul style="list-style-type: none"> <li>•Extrusion</li> <li>•Injection</li> <li>•Thermoformage</li> <li>•etc</li> </ul> </li> <li>- Matériaux composites</li> </ul>
<b>F. Choisir un matériau de synthèse en fonction de son utilisation et des</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conception des pièces plastiques : dimensions, formes</li> </ul>

**performances mécaniques utiles en construction de qualité courante et dialoguer avec un spécialiste**

- courantes...précisions....
- Choix en fonction des critères techniques et économiques
  - Analyse de la valeur
  - Contact des spécialistes dans le domaine des composites

## **MODULE 12 : Partie 2 : TRAITEMENT ET PROCÉDES DE MISE EN FORME DES MATÉRIAUX**

Code :	Théorie :	67 %
Durée : 15 heures	Travaux pratiques :	25 %
Responsabilité : D'établissement	Evaluation :	8 %

### **OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU DE COMPORTEMENT**

#### **COMPETENCE**

- **Choisir les traitements et les procédés de mise en forme des pièces en fonction du cahier des charges.**

#### **PRESENTATION**

Ce module de compétence générale pour les Techniciens Méthodes se dispense en deuxième et troisième semestre du programme de formation.

#### **DESCRIPTION**

L'objectif de ce module est de faire acquérir la compétence générale pour conférer au méthodistes les bases nécessaires à l'analyse de fabrication des pièces brutes en tenant compte des procédés de mise en forme des pièces en fonderie et estampage... et en proposant divers traitements pour répondre aux exigences de cahier des charges (dessin de définition) et de conception (dureté, traitements thermiques, thermo-chimique, traitement de surface). La relation entre la conception de pièces et leur faisabilité devra être un souci quotidien. Il vise donc à rendre le stagiaire apte à communiquer avec les spécialistes en traitements thermiques et de surfaces et des spécialistes de mise en forme des matériaux : fonderie, estampage, forgeage... en adoptant un comportement méthodique et communicatif.

#### **CONTEXTE D'ENSEIGNEMENT**

- Bien que plusieurs éléments de connaissances et d'exercices pratiques de base puissent se réaliser sur des moyens de laboratoire comme la réalisation des essais, les traitements thermiques, il est très important de favoriser des recherches d'information sous forme d'exposé.
- La documentation doit être disponible et il est important de faire le lien entre la technologie des matériaux et sa mise en œuvre en conception mécanique.
- Viser aussi l'analyse des modes opératoires dans le cas des traitements.



## **CONDITIONS D'ÉVALUATION**

- Travail individuel.
- À partir :
  - d'un cahier des charges ;
  - de consignes et directives : qualité, quantité et délai ;
  - de plan de définition, de croquis à main levée ;
  - du parc machine disponible ;
- À l'aide :
  - des documents relationnels, des méthodes, des standards d'entreprise ;
  - des dossiers machines;
  - des catalogues de fournisseurs des outils et outillages ;

OBJECTIFS	ÉLÉMENTS DE CONTENU
14. Identifier les éléments théoriques et pratiques essentiels à la compréhension des traitements thermiques utilisés	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modification des structures et de la constitution</li> <li>- Les alliages : constitution et structure</li> <li>- Diagramme d'équilibre</li> <li>- Lignes de transformation</li> <li>- Diagramme Fer-Carbone</li> </ul>
15. Connaître les différents types de traitements thermiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Traitements thermiques des aciers (but, mécanisme, défauts et remèdes) : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Trempe</li> <li>- Trempe étagée</li> <li>- Revenu</li> <li>- Revenu durcissant</li> <li>- Recuit d'adoucissement, d'homogénéisation, de régénération des aciers, de stabilisation, de recristallisation...</li> </ul> </li> <li>- Traitements superficiels : cémentation, nitruration et carbonitruration...</li> </ul>
16. Adapter le traitement thermique à la géométrie de base de la pièce	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trempabilité</li> <li>- Défauts de traitements thermiques : contraintes, fissures,...</li> </ul>
<b>D. Choisir un traitement thermique en fonction du besoin</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interprétation du cahier des charges</li> <li>- Répondre à un besoin : caractéristiques mécaniques demandées</li> <li>- Critères de choix : techniques et économiques</li> <li>- Modes opératoires des traitements</li> <li>- Position d'un traitement dans une gamme de fabrication</li> </ul>
17. Identifier les sollicitations et les causes de dégradations des pièces dans leurs conditions d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Corrosion : formes, types et modes de protection</li> <li>- Erosion</li> <li>- Usure</li> </ul>
18. Déterminer le ou les traitements de surface adaptés à la réalisation de pièces mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Préparation des surfaces : grenaillages, sablage,...</li> <li>- Protection et stockage des pièces</li> <li>- Peinture : choix de peinture</li> <li>- Revêtement par projection</li> <li>- Dépôt chimique en phase vapeur : CVD</li> <li>- Dépôt physique en phase vapeur : PVD</li> <li>- Revêtement et dépôts électrochimiques</li> <li>- Traitement mécanique : galetage, grenaillage de précontrainte</li> <li>- Contrôle : propreté, rugosité, épaisseur, aspect, adhérence...</li> </ul>
19. Adapter le traitement de surface à la	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formes géométriques facilitant les traitements</li> </ul>

géométrie de base de la pièce	de surfaces
<b>E. Choisir un traitement de surface approprié</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interprétation du cahier des charges</li> <li>- Répondre à un besoin : caractéristiques et spécifications mécaniques demandées.</li> <li>- Critères de choix : techniques et économiques</li> <li>- Modes opératoires des traitements de surface</li> <li>- Position d'un traitement dans une gamme de fabrication</li> </ul>
20. Connaître le procédé à mettre en œuvre pour la réalisation de brut	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fonderie;</li> <li>- Déformation plastiques : forgeage, estampage...</li> <li>- Métallurgie des poudres</li> <li>- Collage et d'assemblage</li> </ul>
21. Adapter le procédé d'élaboration de brut à la géométrie de base et aux spécifications demandées de la pièce	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avantages inconvénients des pièces en fonderie : formes complexes, ...</li> <li>- Avantages inconvénients des pièces estampées : caractéristiques mécaniques, notions de fibres, ...</li> <li>- Métallurgie des poutres : avantages et inconvénients</li> </ul>
<b>F. Sélectionner un procédé de mise en forme des matériaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interprétation du cahier des charges</li> <li>- Répondre à un besoin : caractéristiques et spécifications mécaniques demandées.</li> <li>- Critères de choix : techniques et économiques</li> <li>- Impact du brut dans la gamme de fabrication</li> </ul>

## 1. Types de conception

Le choix de matériaux est différent selon qu'il s'agit d'une **conception de variation, adaptative ou innovante**.

- **Conception de variation** : il s'agit de faire un changement de taille, une amélioration de forme ou de performances sans que le principe soit changé ; le passage des contraintes aux efforts, la modification des dimensions, ... peuvent amener des changements de matériau.

Par exemple, **les bielles de moteur automobile** sont soumises à des efforts de compression et de traction. Elles sont réalisées en grande série (plusieurs millions de pièces par an dans des matériaux variés) :

- en fonte pour les moteurs de faible cylindrée et peu chargés ;
- en acier fritté-forgé pour les moteurs peu chargés (surtout aux USA) ;
- en acier forgé pour des performances plus élevées ;
- rarement en alliage de titane (30 % d'allègement, mais cher) pour le sport automobile.

Le matériau n'est pas le seul critère, bien sûr !

Dans un domaine plus banal, **la pince à linge** fut d'abord une petite branche de bois fendue, puis deux pièces de bois reliées par un ressort métallique, pour devenir une pièce unique de plastique à bon marché assurant toutes les fonctions (serrement modéré, tenue à l'environnement, coût très faible) ;

- **Conception adaptative** : on part d'un concept existant pour en améliorer les fonctions.

Par exemple, l'industrie du nucléaire a remis en question les matériaux à partir de l'influence des rayonnements sur la tenue en service.

De façon plus banale, le crayon-bille, l'autocuiseur, le petit électroménager, l'agrafe et l'agrafeuse, ..., sont des objets mécaniques qui furent innovants.

- **Conception innovante** : on veut mettre en oeuvre une idée nouvelle ou un nouveau principe de fonctionnement, le champ des conventions usuelles du milieu doit être remis en question.

Le point de départ de la conception d'un produit industriel est une idée innovante ou un besoin du marché. L'étape ultime correspond à toutes les spécifications qui rendent la réalisation du produit possible.

Il est impératif de définir précisément dès le départ le besoin à satisfaire (sous la forme d'un énoncé du type il nous faut réaliser une pièce qui remplit telle fonction). Les traités classiques de conception insistent sur la nécessité d'une spécification de la fonction indépendamment de toute solution remplissant cette fonction, cette précaution ayant pour but d'éviter les limitations qui pourraient résulter d'idées préconçues.

La démarche de conception consiste ensuite à développer des concepts qui peuvent potentiellement remplir la fonction demandée. À cette étape de la conception, toutes les options demeurent ouvertes, et le concepteur se doit d'envisager tous les concepts possibles et toutes leurs combinaisons.

À l'étape suivante, chaque concept est analysé à un niveau d'approximation qui permet de déterminer grossièrement la taille des pièces, les contraintes mécaniques auxquelles elles sont soumises, les températures et environnements dans lesquels elles doivent fonctionner. À cette étape, le concepteur doit sélectionner les classes de matériaux qui peuvent éventuellement être utilisés dans ces conditions.

Le concepteur passe ensuite de ce schéma de faisabilité à une étape de conception détaillée dans laquelle les spécifications de chaque élément sont précisées. Les composants critiques sont alors analysés en détail (du point de vue mécanique et thermique), des méthodes d'optimisation sont utilisées pour maximiser la performance de

composants ou de groupes de composants, et enfin un choix définitif de la forme et des matériaux adaptés est arrêté.

L'aspect production et coût est alors analysé et cela conduit à clore la démarche de conception par des spécifications de production.

Cette démarche de conception se décline quelque peu différemment si l'on a affaire non pas à une conception originale qui démarre pour ainsi dire de rien, mais à une conception adaptative, ou à une conception de variation qui, toutes deux, partent d'un produit déjà existant.

**La conception originale** implique une idée nouvelle ou un nouveau principe de fonctionnement (comme le stylo à bille ou le disque compact). Dans cette démarche de conception, il est impératif de réfléchir avec le maximum de latitude, d'envisager toutes les solutions possibles et de choisir, par une démarche rationnelle, la meilleure d'entre elles. Cette largeur de vue doit aussi s'appliquer au choix des matériaux. De nouveaux matériaux peuvent rendre possibles des conceptions originales : le silicium de haute pureté a rendu possible le transistor, le verre de haute pureté la fibre optique, les aimants permanents à haute coercivité les appareils auditifs, les alliages à haute tenue en température les turbines de réacteurs.

Quelquefois, le nouveau matériau suggère le nouveau produit, d'autres fois le nouveau produit exige le développement de nouveaux matériaux. Par exemple, l'industrie nucléaire a conduit au développement de nouveaux alliages, la technologie des turbines de réacteurs est aujourd'hui motrice dans le développement des céramiques ou des composites à matrice métallique.

**La conception adaptative** part d'un concept déjà existant et recherche une amélioration incrémentale en raffinant le principe de fonctionnement. Ce type de conception est, lui aussi, rendu possible par le développement des matériaux : les polymères ont remplacé les métaux dans les objets électroménagers, la fibre de carbone le bois dans les objets pour le sport. La conception adaptative de la boîte pour boisson a conduit à une rude compétition entre l'aluminium et l'acier. Des marchés entiers peuvent être gagnés (ou perdus) selon l'usage que le manufacturier fait des matériaux classiques et des nouveaux matériaux.

**La conception de variation** concerne un changement de taille ou une amélioration de détail sans que la fonction ou son principe de réalisation soit modifié. Par exemple, la conception de réservoirs de plus grande taille impose le choix de nouveaux matériaux. Les bateaux de petite taille sont réalisés en fibre de verre, alors que les bateaux de taille importante sont en acier ; les chaudières peuvent, suivant leur capacité, être réalisées en cuivre ou en acier ; on utilise pour les avions subsoniques certains alliages qui ne sont pas adaptés aux avions supersoniques.

Aux différentes étapes de la conception, la sélection des matériaux et des procédés se pose en des termes différents (figure 1) ; il est donc impératif de se poser cette question tout au long de la procédure de conception, faute de quoi l'on risque de se voir imposer une solution à moindre performance parce que l'on n'a pas envisagé les différentes conceptions qu'un autre choix de matériau eût rendu possible. Le choix des matériaux et des procédés et la conception de la pièce se doivent idéalement d'être interactifs. Les récentes expériences de carrosserie en aluminium pour l'automobile utilisant une structure dite en cage d'oiseau sont un bel exemple d'une telle interactivité. À l'étape de conception préliminaire, on se doit de considérer l'ensemble des matériaux possibles, ce qui suggère l'utilisation de données sur de vastes familles, mais avec une relativement faible précision. Quand on parcourt les étapes successives de la sélection, les choix possibles deviennent

de plus en plus précis dans des classes de matériaux de plus en plus définies : la conception détaillée impose le choix d'une nuance précise de matériau pour laquelle la conception est finalisée.

De plus en plus, les concepteurs ont à leur disposition des aides informatiques qui ont pour fonction d'accélérer la procédure décrite par la figure 1 : il ne s'agit pas de remplacer l'ingénieur mais, au contraire, de lui faire gagner du temps sur les étapes qui peuvent être systématisées, pour lui laisser plus de latitude dans l'innovation, voire pour lui suggérer des choix possibles. Depuis peu, il existe des outils informatiques d'aide à la sélection des matériaux et des procédés. Les mieux développés à ce jour sont ceux qui concernent les dernières étapes de la conception, la conception de détail.

Les outils informatiques pour la sélection des matériaux, en revanche, sont tout spécialement importants dans les premières étapes de la conception. Que cela concerne le choix des matériaux ou l'aide au choix des concepts de pièce, c'est dans ces premières étapes que les aides informatiques sont, à ce jour, les moins développées ; c'est à ce niveau de la conception que la plupart des recherches se concentrent actuellement. L'objectif envisagé à terme est la conception intégrée assistée tout au long par ordinateur.

### **Interaction matériau-forme-procédé**

En principe, on ne peut découpler la sélection du matériau et celle du procédé : le choix du matériau limite les procédés possibles, le choix du procédé modifie les propriétés du matériau. La fonction recherchée impose à la fois le choix du matériau, de la forme de la pièce et du procédé permettant de l'obtenir (figure 3). Un exemple particulièrement saisissant de cette interaction est la sélection des alliages et des procédés pour les pièces moulées : les choix du procédé, de l'alliage et de la forme de la pièce ne peuvent être séparés. De cette imbrication entre les différents aspects du choix résulte une difficulté certaine : il est impossible de choisir le matériau sans connaître le procédé, ni le procédé sans connaître le matériau ; il s'ensuit que la procédure de sélection se doit d'être itérative et procédera suivant une hiérarchisation des problèmes : on sélectionnera d'abord un ensemble de matériaux auxquels seront associés un ensemble de procédés envisageables, parmi lesquels on choisira ceux qui sont a priori mieux adaptés à la fonction recherchée ; on itérera la procédure en précisant à chaque étape les choix du matériau et du procédé.

Pour pouvoir réaliser efficacement cette itération, il est nécessaire de disposer d'informations sur les matériaux et sur les procédés à différents degrés de précision suivant la généralité du champ envisagé.

Mais le point clé de la sélection des matériaux et des procédés est avant tout la rédaction précise du **cahier des charges** exigé par la fonction recherchée. Ce cahier des charges peut être en partie traduit en termes de performance des matériaux, mais certains aspects, qui sont tout aussi importants, doivent demeurer qualitatifs.

Il est de la toute première importance d'identifier à la fois les fonctions requises, les contraintes imposées et les objectifs à optimiser; cette démarche conduira à déterminer les performances des matériaux envisagés. Mais il est tout aussi important de clairement identifier les limitations au choix des matériaux (la température de fonctionnement, la résistance à l'usure) qui ne se traduisent pas nécessairement en termes de performances mais en termes d'exigences incontournables. Enfin il importera de gérer, dans la plupart des cas, un problème de sélection multicritère, avec la question difficile de l'importance relative des différents critères.

## **Cahier des charges**

Quand on aborde un problème de sélection de matériau pour une pièce donnée, il est utile de disposer d'une série de questions systématiques qui permettent de baliser le problème et d'identifier toutes les performances et les optimisations requises, toutes les limitations imposées, de quelque nature qu'elles soient. Cette étape de rédaction soignée du cahier des charges doit précéder toute tentative de sélection, mais elle peut évoluer au cours de la recherche du meilleur matériau : ici encore la procédure est itérative.

Cela est particulièrement vrai en ce qui concerne le problème de choix vis-à-vis de critères contradictoires. Nous envisageons d'abord l'identification du cahier des charges, puis le problème de la pondération des requêtes.

La définition efficace d'un cahier des charges devant conduire à une sélection de matériau comprend des informations d'ordre technique sur la pièce à réaliser, des informations de caractère économique et des informations d'ordre général sur l'entreprise qui réalise la pièce et sur les clients qui vont l'utiliser. Ces informations générales (taille de l'entreprise, niveau de compétence, concurrents potentiels, existence ou non de prototypes, variabilité admise dans les procédés ou dans les matériaux, dates limites dans la réalisation du projet...) sont autant de contraintes qu'il convient de garder en mémoire lors de la recherche du matériau et du procédé le mieux adapté, non seulement à la pièce à réaliser, mais aussi aux possibilités de l'entreprise. Les informations de caractère économique mettent en jeu les coûts de matériaux, les coûts de fabrication, les cadences et les séries demandées. Ces informations générales et économiques positionnent le cadre des solutions économiquement réalistes. Restent les informations purement techniques : il convient d'identifier précisément les fonctions de la pièce (modes de chargement, de sollicitation thermique ou physique), les formes recherchées (dimensions et formes imposées, variables libres et variables contraintes, états de surface requis...), les contraintes exigées (rigidité donnée, solidité donnée, résistance à la fatigue, à l'environnement, à l'usure...). Enfin il faut identifier les optimisations recherchées (conception à masse minimale, à coût minimal...).

Aussi bien pour les contraintes imposées que pour les optimisations recherchées, la première étape du choix multicritère consiste à identifier des ordres de priorité et à décider de la flexibilité que l'on est disposé à accepter dans la réalisation des requêtes. La rédaction d'un cahier des charges doit comprendre cet aspect de compromis possible pour que ce cahier puisse ultérieurement être utilisé avec plus de souplesse. Il ne faut jamais oublier que, si la condition première d'une sélection de matériau performante est l'existence d'un cahier des charges détaillé et clairement identifié, un des avantages d'une démarche rationnelle de sélection est aussi d'aider à l'élaboration d'un tel cahier des charges.

## **Complexité inhérente à la procédure de sélection**

Comme nous l'avons déjà annoncé, la procédure de sélection des matériaux est complexe, et d'une complexité qui n'est que partiellement attribuable à la variété des matériaux et des procédés. La complexité est en fait inhérente à la procédure de comparaison des matériaux entre eux. Un choix de matériaux est, par nature, un choix multicritère : pour concevoir un radiateur, on recherche un matériau à la fois rigide, solide et résistant aux chocs ; on exigera en plus une bonne conductivité thermique, une bonne résistance à la corrosion par l'eau chaude. Certains de ces critères sont contradictoires, il faudra pondérer l'importance relative des diverses contraintes. Si l'on exige qu'il soit à la fois léger et peu coûteux, il faudra aussi établir un ordre de priorité dans les optimisations.

Mais on a souvent affaire à des critères non chiffrables (il faut que le matériau soit agréable à la vue, chaleureux...), voire à des critères non explicites (d'ici quelques années, il est possible que le matériau doive être recyclable, peut-être faudrait-il en tenir

compte...). C'est cette complexité des différents critères, plus encore que la variété des choix possibles, qui rend la procédure de sélection si difficile. À cette difficulté vient s'ajouter le problème de l'estimation des coûts. Cette estimation peut être en partie rationalisée en distinguant les coûts du matériau et du procédé ainsi que les coûts d'investissement. Mais l'estimation des coûts, pour être d'une quelconque utilité, doit prendre en compte les spécificités locales de l'entreprise.

## **2. Classes de matériaux et types de procédés**

Le choix des matériaux reposant essentiellement sur l'application à laquelle ils sont destinés et le procédé grâce auquel ils seront mis en oeuvre, il importe avant tout de dresser deux rapides panoramas :

- l'un, des grandes classes de matériaux et des propriétés génériques qui les caractérisent ;
- l'autre, des principales filières de procédés permettant, à partir de ces matériaux, l'obtention des pièces et des produits finis.

Ces deux revues débouchent naturellement sur des inventaires plus détaillés des propriétés d'usage des matériaux d'une part, des caractéristiques des procédés d'autre part, ainsi que des interactions obligées entre un matériau, le produit auquel il est destiné et le procédé de mise en oeuvre utilisé.

### **2.1. Les grandes classes de matériaux**

Les propriétés physiques des matériaux à l'état solide, qu'elles soient mécaniques, électriques, magnétiques, optiques..., peuvent s'étendre sur plusieurs décades. La plupart de ces propriétés dépendent très fortement du type d'interaction entre atomes ou molécules qui assure leur cohésion. Ces liaisons interatomiques conditionnent en effet, dans une large mesure, la structure de la matière à l'échelle atomique ou moléculaire, structure dont la cristallographie et les défauts ont des conséquences capitales sur les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du matériau.

Il est donc raisonnable, dans l'optique d'une sélection de ces matériaux, de les classer en fonction de ces différents types de liaisons chimiques. Rappelons que, en fonction de leur position dans la classification périodique de Mendeleïev, les espèces chimiques constitutives d'un matériau peuvent établir entre elles :

- des liaisons fortes, à caractère métallique, ionique ou covalent ; elles sont présentes à l'intérieur des édifices moléculaires, ainsi que dans les édifices cristallins ou quasi cristallins et les solides amorphes ;
- des liaisons faibles, à caractère électrostatique hétéropolaire intrinsèque ou induit ; ce sont elles qui assurent fréquemment la cohésion intermoléculaire des solides constitués de la juxtaposition de plusieurs molécules.

Les liaisons présentes dans les matériaux réels ne procèdent que très rarement d'une seule des catégories ci-dessus : les structures électroniques associées à la présence d'atomes très divers et aux structures parfois complexes des édifices qu'ils tissent entraînent le plus souvent un caractère mixte des liaisons réelles, avec toutefois une tendance de fond sur la base de laquelle on peut proposer la classification ci-dessous.

#### **2.1.1 Métaux et alliages**

Les matériaux métalliques, comme leur nom l'indique, comportent des liaisons essentiellement métalliques, c'est-à-dire en partie assurées par des électrons délocalisés. Ils sont constitués des nombreux éléments du tableau de la classification périodique qualifiés de métaux (tous électropositifs, donc donneurs d'électrons) et de leurs mélanges ou de leurs alliages. La présence d'un gaz d'électrons délocalisés dans l'édifice atomique les rend conducteurs de l'électricité et de la chaleur. C'est également



la densité d'états électroniques dans la bande de conduction de ces matériaux qui est responsable, lors des interactions avec les rayonnements de longueur d'onde correspondant à la lumière visible, de l'éclat métallique, particularité d'aspect qui les caractérisait déjà aux yeux des premiers utilisateurs des métaux de l'époque préhistorique. Les éléments métalliques sont plutôt situés dans la partie gauche du tableau de Mendeleïev et sont caractérisés par un faible potentiel d'ionisation. Il en résulte un type de liaison atomique à caractère collectif et faiblement dirigé, dû à la délocalisation des électrons de conduction. Contrairement aux métalloïdes qui sont diamagnétiques, les métaux sont généralement paramagnétiques, voire ferromagnétiques. Leurs températures de fusion et de vaporisation sont en général élevées, et ils cristallisent souvent dans des structures compactes cubiques faces centrées ou hexagonales compactes (**cfc** et **cph**), sauf les métaux alcalins et bon nombre de métaux de transition qui optent pour la structure cubique centrée (**cc**). Ces structures leur confèrent des propriétés relativement isotropes et ils présentent en général des propriétés élastiques élevées.

Le caractère faiblement directionnel de la liaison métallique facilite la création et la propagation des dislocations, ce qui rend les métaux en général ductiles et relativement tenaces. L'association de leur ténacité et de leur ductilité est un atout majeur pour leur mise en forme. Par contre, après mise en forme, on peut facilement donner aux alliages métalliques une bonne résistance mécanique par des traitements thermomécaniques appropriés, grâce à la précipitation de phases durcissantes (durcissement structural). Du fait de leur plasticité, leur tenue à la fatigue peut poser des problèmes et ils sont, de plus, souvent sensibles à la corrosion. Enfin, les métaux sont en général des matériaux lourds et denses, ce qui est parfois un handicap.

Les métaux les plus utilisés dans les applications structurales sont les aciers, les alliages d'aluminium, les alliages de cuivre et les alliages de nickel.

- **Les aciers** se caractérisent par un fort module et une forte limite d'élasticité. Ils sont en général facilement formables et soudables et relativement bon marché. Ils ont, par contre, une densité relativement élevée, perdent souvent leurs propriétés de tenue mécanique au-dessus de 600°C et sont particulièrement sensibles à la corrosion (sauf évidemment les aciers inoxydables).
- **Les alliages d'aluminium** se caractérisent essentiellement par leur faible densité. Ils ont de bonnes propriétés mécaniques, sont généralement ductiles et formables, et résistent assez bien à la corrosion. Ils perdent leur tenue mécanique pour la plupart au-dessus de 150°C, sont sensibles à la fatigue et à la corrosion sous contrainte. Ils sont difficiles à souder et relativement chers.
- **Les alliages de cuivre** sont de bons conducteurs électriques et thermiques. Ils ont une assez bonne tenue à l'usure et de bonnes propriétés de tenue à chaud, mais ils sont sensibles à la corrosion et sont chers.
- **Les alliages de nickel** ont de très bonnes propriétés mécaniques à haute température et une relativement bonne tenue en corrosion, mais ils sont très chers et très lourds.

### 2.1.2 Verres et céramiques

Une deuxième classe de matériaux est caractérisée par des liaisons fortes et directionnelles, qu'elles soient ioniques (attraction coulombienne d'ions de signes opposés) ou covalentes (mise en commun d'une paire d'électrons). Ce type de liaison met souvent en jeu des énergies considérables et se traduit dans la pratique par une très bonne tenue en température et d'excellentes propriétés élastiques. Contrairement à ce qui se passe dans les métaux, les dislocations ont du mal à se propager. La faible propension à la plasticité qui en résulte rend ces matériaux fragiles, peu tenaces, peu

ductiles, mais en revanche résistants à l'usure. Les liaisons interatomiques très énergétiques confèrent à ces matériaux de hauts points de fusion et une bonne résistance à la corrosion. Parmi les plus utilisés dans les applications structurales, on peut citer l'alumine, le carbure de silicium, le nitrure de silicium, les *Sialons*, la zircone et les verres d'oxydes silico-sodiques du type  $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ .

Compte tenu de leur faible ténacité, les règles de conception particulières aux matériaux fragiles doivent être utilisées. Les céramiques de qualité ont tendance à être chères.

\_ **L'alumine** est un matériau courant qui a une bonne résistance à l'oxydation et une excellente tenue en température.

\_ **Le carbure de silicium** est un excellent abrasif, très résistant aux chocs thermiques.

\_ **Le nitrure de silicium** a une très bonne résistance en compression et une excellente tenue aux chocs thermiques.

\_ **Les Sialons** sont facilement frittés et utilisés dans les outils de coupe.

\_ **La zircone** est un éventuel matériau de remplacement des aciers dans les moteurs, sous réserve d'une ténacité améliorée.

\_ **Les verres silico-sodiques**, utilisés pour leur transparence, peuvent être aussi des matériaux de structure après des traitements de surface spécifiques qui améliorent leurs propriétés mécaniques.

### 2.1.3 Polymères et élastomères

Une troisième classe de matériaux est constituée de macromolécules à squelette covalent, liées entre elles par des liaisons faibles (liaisons de Van der Waals ou liaison hydrogène). Leurs propriétés dépendent fortement du comportement de ces liaisons faibles et évoluent considérablement avec la température. Ils auront généralement un faible module élastique, et une limite d'élasticité d'autant plus faible qu'ils seront portés (dans une limite raisonnable qui respecte l'intégrité chimique du polymère) à plus haute température.

Ils seront donc faciles à mettre en forme et auront souvent une bonne ténacité. Mais ils ont aussi, malgré leur bonne déformabilité, une bonne résistance à l'usure. Ils sont faciles à assembler et ont une bonne tenue à la corrosion. Enfin, ce sont des matériaux légers qui peuvent être très bon marché.

Il existe une très grande variété de polymères que l'on peut grossièrement classer en trois catégories, en fonction de leur architecture moléculaire.

\_ **Les thermoplastiques** sont constitués de chaînes linéaires ou branchées selon le procédé de polymérisation. Ils sont ramollis par un préchauffage. Ils présentent une grande variété de propriétés en fonction de la nature et de la taille des molécules, ainsi que de leur degré de branchement.

\_ **Les thermodurcissables** (résines) sont formés par réaction chimique entre de grands monomères fonctionnels et de petites molécules de liaison, ce qui développe des liaisons transverses, formant un squelette qui donne à l'ensemble sa rigidité. Ils ne fondent pas, ne se ramollissent pas de façon réversible au chauffage : ils se décomposent. Ils résistent aux solvants mais, une fois polymérisés, ils ne peuvent être mis en forme aussi facilement que les thermoplastiques.

\_ **Les élastomères** (caoutchoucs) se placent entre les deux catégories précédentes. Ils sont moins rigides que les thermodurcissables grâce à un plus faible degré de polymérisation, et les liaisons transverses y sont moins nombreuses.

### 2.1.4 Matériaux composites

Les matériaux composites sont des matériaux qui associent des éléments de deux classes de matériaux pour obtenir une combinaison de propriétés qui tire avantage de

chaque classe. Les plus fréquemment utilisés sont les composites à matrice polymère et à renfort fibreux qui présentent des propriétés spécifiques exceptionnelles.

Les composites céramique/céramique, qui sont moins fragiles que les céramiques massives, sont très intéressants pour leur tenue en température ; les composites à matrice métallique à renfort céramique ont pour vocation de tirer parti à la fois de la ductilité des métaux et de la raideur du renfort céramique. Enfin, il convient de citer pour mémoire les matériaux tels que le bois (qui est, ne l'oublions pas, un matériau structural de toute première importance dans le bâtiment), les ciments et les bétons, les mousses polymères, céramiques ou métalliques, qui sont tous en quelque sorte des matériaux composites.

## **2.2 Les grandes familles de procédés**

Chacune des grandes classes de matériaux évoquées ci-dessus possède des propriétés physico-chimiques spécifiques qui se traduisent par des réponses spécifiques aux différentes tentatives de mise en oeuvre. Nous basons donc cette présentation générale sur les grandes filières de mise en oeuvre qui ont été développées en adaptation au type de matériau travaillé.

Il est à souligner que, dans la réalité industrielle et artisanale, ces filières correspondent à des métiers différents, dont les savoir-faire, les technologies, les langages, les circuits technico-économiques se sont développés presque indépendamment, en adaptation étroite aux particularités du matériau travaillé. Même à l'heure actuelle, à l'instar du menuisier, du maçon ou du forgeron de l'époque préindustrielle, ces métiers sont encore rarement intégrés au sein d'une même entreprise.

Les détails technologiques sur les différents procédés de fabrication qui sont évoqués ici seront trouvés par le lecteur dans les traités Génie mécanique, Matériaux métalliques et Plastiques et Composites des Techniques de l'Ingénieur. Nous nous contenterons de donner ici des visions schématiques de leurs articulations et de leurs utilisations pour les différents matériaux.

### **2.2.1 Procédés de mise en oeuvre des matériaux métalliques**

Ces procédés (figure 4) exploitent pour l'essentiel deux caractéristiques spécifiques des métaux et alliages :

- leur température de fusion relativement accessible aux technologies actuelles ;
- leur ductilité intrinsèque, éventuellement favorisée par l'élévation de température.

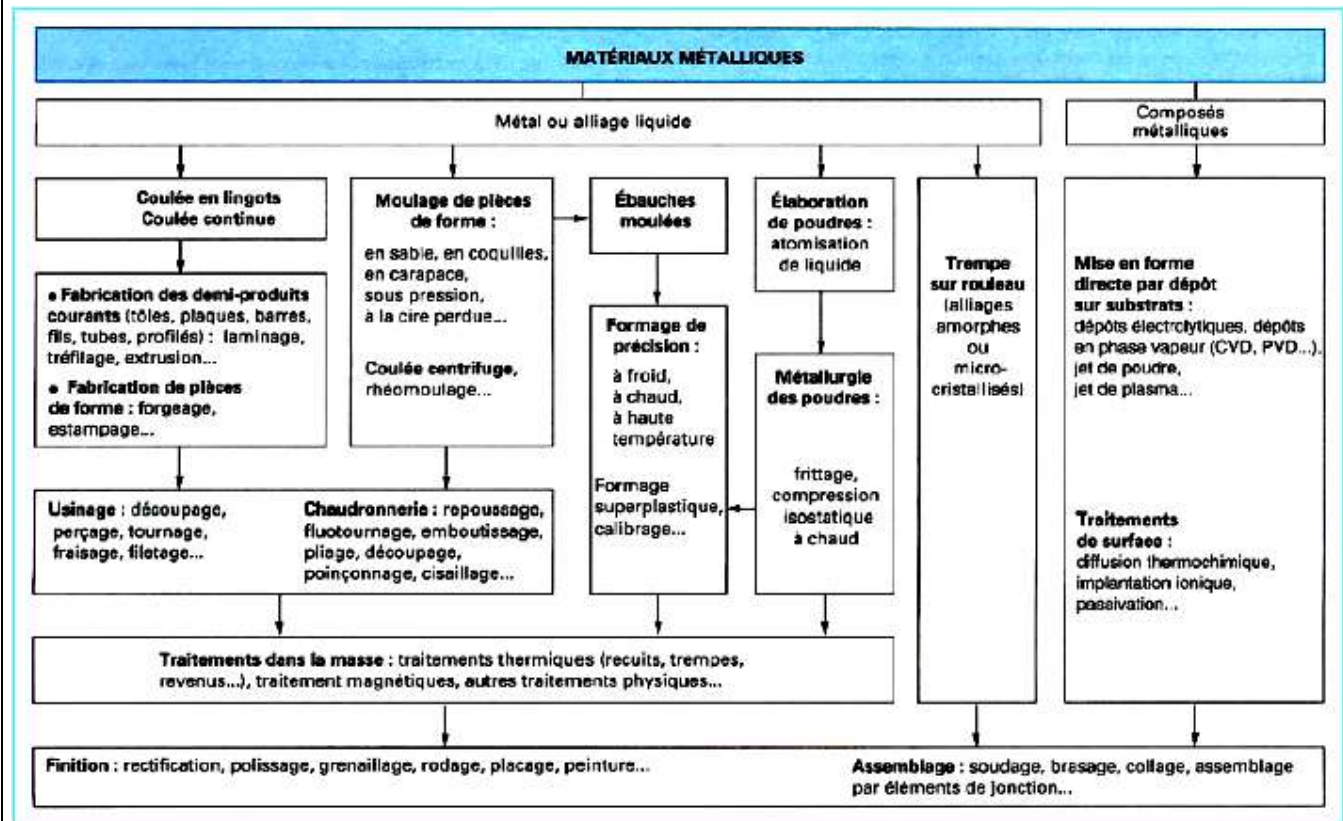


Figure 4 - Principaux procédés de mise en œuvre des matériaux métalliques

## 2.2.2 Procédés de mise en œuvre des céramiques et des verres minéraux

Comme nous l'avons vu plus haut, pour tous ces matériaux la dureté et la fragilité constituent des caractéristiques typiques, qui rendent très difficile leur usinage et pratiquement impossible leur mise en forme par plastification (à l'exception cependant des verres minéraux qui, grâce à leur structure de liquide surfondu, présentent une transition progressive de viscosité lorsqu'on les réchauffe.

La température de fusion des céramiques est généralement élevée : il est donc impossible d'utiliser les procédés de fonderie et de moulage pour obtenir une pièce de forme en céramique. On devra avoir recours aux techniques de frittage, à partir de la matière première sous forme pulvérulente que fournissent les procédés les plus courants d'élaboration des céramiques par voie chimique.

La figure 5, donne une vision d'ensemble des différentes techniques employées. C'est par le même type de procédés que sont généralement fabriqués les cermets, mélanges de céramiques et de métaux, élaborés par frittage de poudres de ces deux types de matériaux. On obtient ainsi un matériau à matrice métallique (qui lui confère une certaine ténacité) renforcée par une forte fraction volumique d'inclusions céramiques (qui procurent une dureté élevée et une bonne résistance à l'usure). Un exemple typique est constitué par les pastilles frittées de mélange WC-Co dont sont faites les arêtes tranchantes de certains outils de coupe.

Dans le cas des ciments et des bétons, la prise qui permet de les faire passer de l'état visqueux à l'état solide est une réaction chimique d'hydratation de la chaux et de la silice qu'ils contiennent.

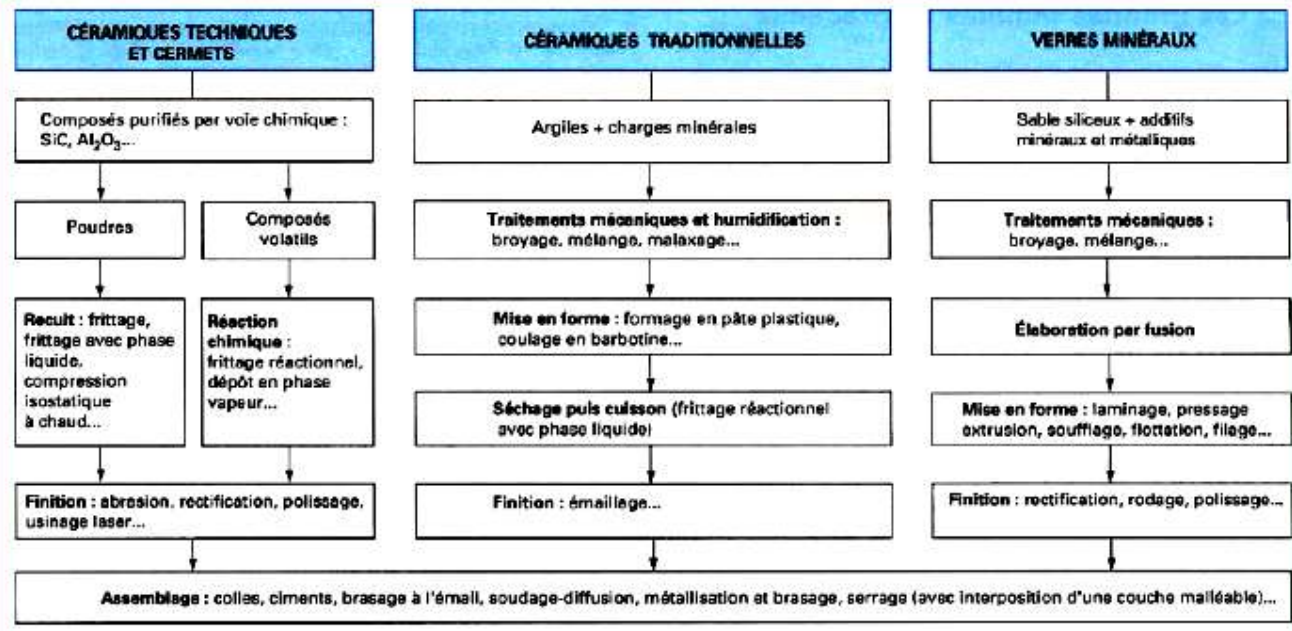


Figure 5 - Principaux procédés de mise en œuvre des matériaux céramiques et des verres minéraux

### 2.2.3 Procédés de mise en œuvre des polymères et des élastomères

Ces procédés diffèrent dans leurs principes selon que le polymère travaillé est thermoplastique, donc malléable à chaud, ou thermodurcissable, donc polymérisant à chaud (les élastomères étant mis en forme par des procédés similaires à ceux des polymères thermodurcissables). Ils sont schématisés sur la figure 6.

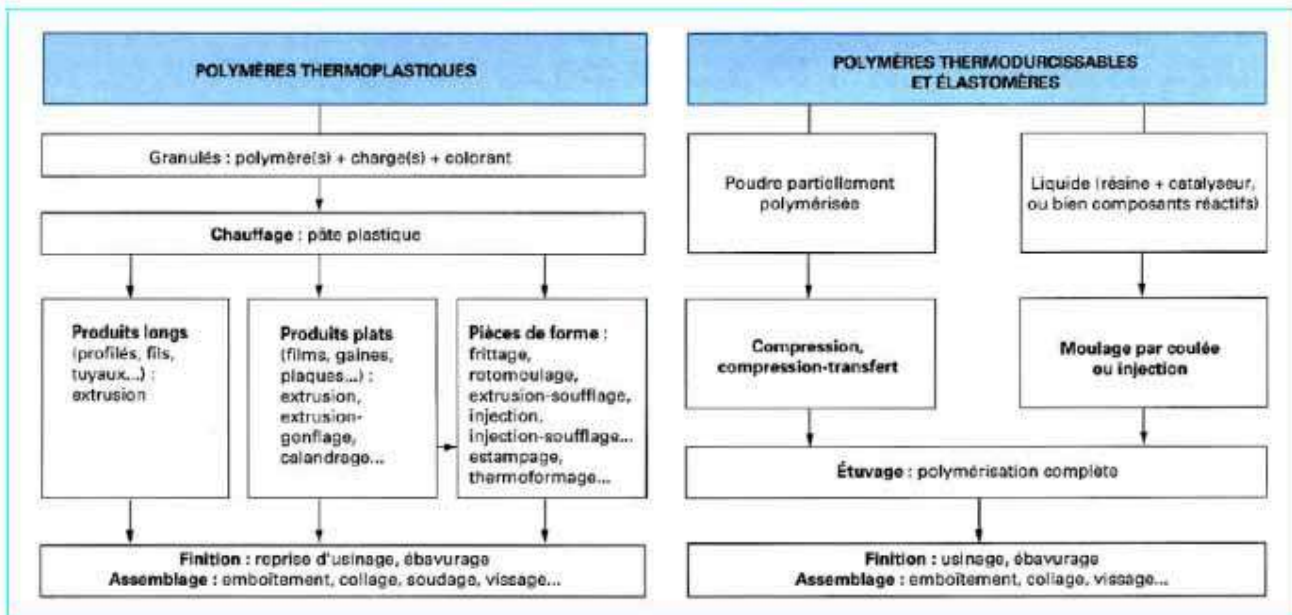


Figure 6 - Principaux procédés de mise en œuvre des polymères

## 2.2.4 Procédés de mise en oeuvre des composites

La plupart des techniques évoquées au paragraphe ci-dessus sont compatibles avec l'incorporation au polymère de particules ou de fibres courtes, et constituent de ce fait des procédés possibles pour la mise en forme des composites à renfort particulaire ou par fibres courtes, et à matrice organique.

Les procédés employés pour les autres types de composites diffèrent essentiellement en fonction de la nature de la matrice du composite (métallique, céramique ou polymère), qui impose le recours à des technologies de mise en forme compatibles avec la classe de matériau à laquelle elle appartient. Ces procédés sont résumés sur la figure 7.

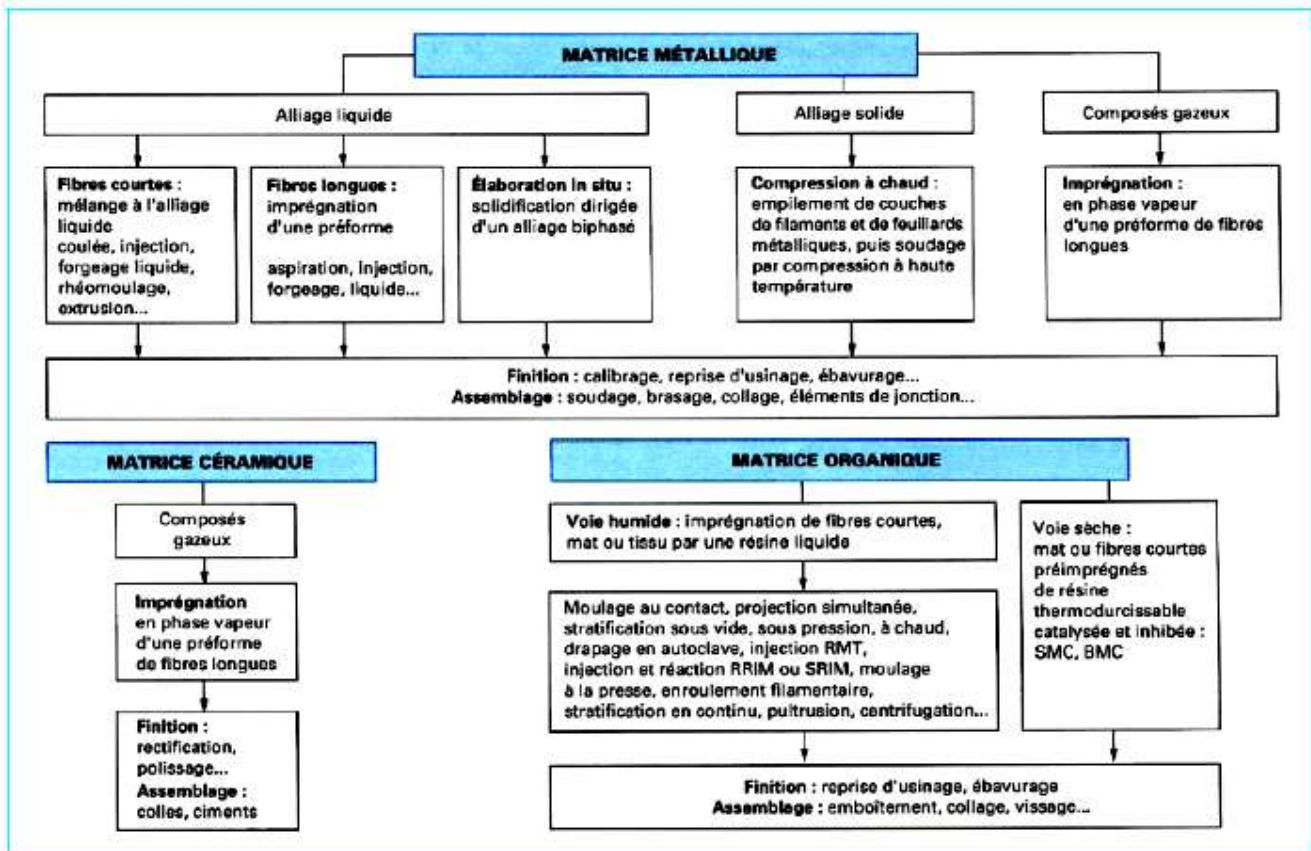


Figure 7 - Principaux procédés de mise en oeuvre des matériaux composites

### 3.1 Caractéristiques des matériaux

Par commodité, nous les répartissons en :

- caractéristiques intrinsèques, propres à chaque matériau, mesurables de manière objective et reproductibles quel que soit l'environnement ;
- caractéristiques interactives, propres à un couple de deux matériaux ou à un couple matériau-environnement ;
- caractéristiques attribuées, dont la valeur dépend du contexte technique ou économique, voire socio-culturel, dans lequel on l'évalue : état des connaissances scientifiques et techniques, niveau des besoins, législation en vigueur...

#### 3.1.1 Caractéristiques intrinsèques

Elles sont constituées, pour l'essentiel, des caractéristiques physico-chimiques du matériau, y compris ses caractéristiques mécaniques.

**1. L'élasticité**, déformation réversible sous l'effet d'une contrainte extérieure, est le plus souvent linéaire (loi de Hooke). Elle se caractérise, dans ce cas, par différentes grandeurs physiques qui dépendent du type de sollicitation :

- **le module d'Young E**, rapport de la contrainte à la déformation en sollicitation uniaxiale. Dans ces conditions de sollicitation, le solide a tendance à se déformer aussi dans la direction perpendiculaire à celle de la contrainte ; cette déformation est définie par le coefficient de Poisson  $\nu$ , rapport de la déformation radiale à la déformation longitudinale, proche de 0,3, pour les solides denses ;
- **le module de cisaillement  $\mu$** , rapport de la contrainte à la déformation en sollicitation de cisaillement ;
- **le module de compressibilité K** =  $-p/(\Delta V / V)$ , où  $p$  est la pression hydrostatique appliquée et  $\Delta V / V$  la variation relative de volume.

En élasticité isotrope, on a :

L'élasticité peut, dans certains cas, être anisotrope (bois, composites) ou non linéaire (caoutchoucs, mousses). Le module d'Young peut varier énormément d'une classe de matériaux à l'autre, passant de 1 000 GPa pour le diamant à 400 ou 500 GPa pour les céramiques plus ordinaires, 50 à 200 GPa pour les métaux, jusqu'à 0,01 ou même 0,000 1 GPa pour les polymères expansés !

On voit ainsi que les propriétés élastiques dépendent de la force des liaisons mais aussi de la compacité de la structure, la plus grande raideur des céramiques comparée aux métaux étant due à des liaisons plus fortes, dont l'effet est cependant compensé en partie par une compacité plus faible. On peut aussi jouer sur l'architecture, soit pour renforcer la raideur (effet composite), soit pour la diminuer (mousses amortissantes).

- **2. La plasticité**, ou déformation irréversible, se caractérise schématiquement par la contrainte limite d'élasticité  $R_e$ , la résistance à la traction  $R_m$ , la dureté Vickers  $HV \approx 3 R_e$ . L'amplitude de la déformation plastique possible avant rupture, ou ductilité, est chiffrable par  $\epsilon_R$ . Ces grandeurs peuvent varier considérablement avec la température. Les ordres de grandeur de  $R_e$  à 0°C peuvent aller, pour les céramiques, de 100 MPa pour la glace à presque 105 Mpa pour le diamant. Ils vont de 1 MPa pour les métaux ultrapurs à quelques 103 MPa pour certains alliages métalliques, et de la fraction de MPa pour les polymères expansés à quelques 100 Mpa (en traction) pour le polyéthylène ou le nylon étirés, la charge étant alors supportée par les squelettes covalents des molécules. La plasticité à chaud (fluage) est en général définie par l'exposant de contrainte  $n$  et l'énergie d'activation  $Q$ .

On peut agir sur la plasticité par l'intermédiaire de la taille des grains, par durcissement de solution solide ou par durcissement structural. On peut là aussi jouer sur l'architecture du matériau, le durcissement dans les composites alliant un effet de transfert de charge à l'effet durcissant de type durcissement structural.

- **3. La résistance à la rupture brutale** est définie par la ténacité, où  $G_c$  est l'énergie absorbée pour agrandir une fissure d'une aire égale à l'aire unité. Une fissure de taille  $a$  sous une contrainte  $\sigma$  deviendra instable si le facteur d'intensité de contrainte atteint la valeur  $K_{Ic}$ . On voit ainsi qu'un matériau dur, c'est-à-dire à forte limite d'élasticité, qui absorbera moins d'énergie par plasticité en tête de fissure, sera plus fragile qu'un matériau plus mou. Cette antinomie entre dureté et ténacité ne pourra être contournée qu'en jouant sur l'architecture du matériau (topologie particulière de la précipitation, transferts de charge par effet composite...).
- **4. La résistance à la fatigue** de pièces fissurées peut être décrite par la loi de Paris qui relie la vitesse de propagation stable de fissures sous-critiques  $da/dN$  (allongement de la fissure par cycle de fatigue) à l'amplitude  $\Delta K$  du facteur d'intensité de contrainte :

$$da/dN = A (\Delta K)^n$$

Elle sera donc caractérisée par l'exposant  $n$ . Dans le cas de pièces non fissurées, la résistance à la fatigue (nombre de cycles à rupture  $NR$ ) est caractérisée par les coefficients de la loi de Manson-Coffin pour la fatigue oligocyclique (c'est-à-dire dans le domaine plastique) :  $NR(\Delta \epsilon)^p = Cte$  et par ceux de la loi de Basquin :  $NR(\Delta \sigma)^m = Cte$  dans le cas de la fatigue à grands nombres de cycles.

- **Le coefficient d'amortissement  $h$**  caractérise la dissipation lors de sollicitations mécaniques,  $d$  étant le déphasage entre excitation et réponse. Il évoluera entre  $10^{-5}$  pour les céramiques et 1 pour les élastomères, à peu près à l'inverse de la limite d'élasticité, la dissipation étant maximale pour les matériaux les plus mous.
- **Le coefficient de dilatation linéaire**, réponse dimensionnelle à une variation de température, résulte de l'anharmonicité des vibrations atomiques. Il varie peu, d'environ un ordre de grandeur autour de  $10^{-5} K^{-1}$ .
- **La capacité calorifique** traduit la capacité du matériau à stocker de l'énergie thermique.
- **La résistivité électrique** s'étend de quelques  $10^{-8}$  à quelques  $10^{-6} W \cdot m$  pour les métaux à plus de  $10^{12} W \cdot m$  pour les meilleurs isolants. Son inverse, la conductivité électrique, se corrèle assez bien avec la conductivité thermique.
- **La conductivité thermique** et la diffusivité thermique gouvernent respectivement le flux de chaleur à l'état stationnaire et les transitoires thermiques, la seconde faisant évidemment intervenir la capacité calorifique. La conductivité thermique varie de quelques  $10^{-2} W/mK$  pour le liège à quelques centaines de  $W/mK$  pour les métaux, augmentant ainsi à la fois avec la compacité de la structure et avec la conductivité électrique.

### 3.1.2 Caractéristiques interactives

D'autres propriétés caractérisent non pas le matériau lui-même, mais son interaction soit avec d'autres matériaux, soit avec l'environnement.

- **Le coefficient de frottement statique** détermine la force  $F_s$  (parallèle à la surface de contact) nécessaire pour initier le glissement. Le rapport  $F_s / F_n$  de cette force de frottement et de la charge  $F_n$  normale à la surface, appliquant les deux matériaux l'un sur l'autre, définit le coefficient de frottement statique  $\mu_s$ .

$F_s$  ne dépend que de  $F_n$  (loi d'Amonton). En effet, l'aire de contact réelle  $A$  de deux surfaces rugueuses est liée à la limite d'élasticité  $R_e$  du matériau le plus plastique par :

$$R_e = F_n / A \text{ (jonctions plastiques).}$$

Dans le cas du **frottement dynamique** (inférieur au statique), le coefficient de frottement dynamique  $\mu_d$  est défini par :  $P = \mu_d p v$  avec  $P$  puissance dissipée,  $p$  pression de contact,  $v$  vitesse de déplacement.

Il est considérablement réduit par la lubrification, qui a pour rôle essentiel de limiter l'usure.



\_ **L'usure** peut résulter de deux types de mécanismes : l'usure adhésive et l'usure abrasive. **L'usure adhésive**, liée à l'arrachement des zones de contact plastiques, croît avec l'aire réelle de contact, et donc avec la charge normale  $F_n$ .

**L'usure abrasive**, de son côté, résulte de la présence de particules (débris d'usure ou particules étrangères) entre les deux surfaces en regard et est beaucoup plus rapide que la précédente.

\_ **La résistance à l'oxydation** peut se définir par l'enthalpie de formation de l'oxyde, mais cette grandeur thermodynamique n'est généralement pas suffisante.

La force motrice de la corrosion aqueuse peut, quant à elle, se définir qualitativement par le potentiel redox, et la vitesse de corrosion par la perte de masse correspondante.

\_ **Le coût d'un matériau brut** dépend de sa disponibilité, elle-même fonction de la rareté de la matière première et des difficultés d'élaboration (et notamment du prix de l'énergie). On admet en général qu'il existe un effet d'échelle, valable pour tous les matériaux bruts, qui fait décroître exponentiellement leur coût par unité de masse lorsque leur tonnage produit – et donc consommé – augmente. Pour un matériau donné, ce coût est néanmoins soumis au cours du temps à des fluctuations importantes d'origines technique, économique et politique.

\_ Il faudra enfin tenir compte dans la procédure de choix de la **toxicité** et de la **recyclabilité** des matériaux. À ces deux caractéristiques sont associées des dispositions réglementaires, qui varient selon l'endroit où le matériau est utilisé, mais qui tendront vraisemblablement à évoluer pour devenir partout de plus en plus restrictives à l'avenir.

Le respect de ces règlements tend évidemment à limiter l'usage de certains matériaux, mais peut également jouer fortement sur le coût du produit final (par exemple si on doit y incorporer le coût de son recyclage).

### 3.2.1 Paramètres liés au matériau mis en oeuvre

Certaines propriétés des matériaux interagissent directement avec le procédé de mise en oeuvre que l'on peut leur appliquer, tout en étant transmises au produit final en tant que propriété d'usage.

- **La température de fusion** du matériau doit être comparée à la température maximale techniquement possible pour la mise en oeuvre du procédé envisagé ; cela est évident pour tous les procédés de fonderie ou de moulage, mais s'avère également utile pour les procédés faisant appel à la déformation plastique ou à la diffusion atomique (comme les traitements thermiques ou le frittage), qui sont susceptibles de bénéficier de tous les mécanismes d'activation thermique si l'on peut opérer au-dessus de 50 % de la température absolue de fusion du matériau environ.

Cette même température conditionne bien sûr, par la suite, la température maximale d'utilisation du produit fini. Ainsi, le cahier des charges d'une pièce destinée à travailler à chaud imposera l'utilisation d'un matériau réfractaire, qui lui-même imposera le recours à un procédé de fabrication adapté.

- **La dureté du matériau** travaillé retentit sur les efforts à appliquer si l'on souhaite le déformer ou l'usiner, sur la taille et la puissance des machines, sur l'usure et la durée de vie des outillages utilisés.

Ce paramètre simple intègre assez bien l'ensemble des propriétés mécaniques d'un matériau : pour les matériaux ductiles, il est ainsi admis que la dureté Vickers HV (exprimée en  $\text{daN/mm}^2$ ) est toujours de l'ordre de 3 fois la limite d'élasticité (exprimée dans les mêmes unités).

Tout en étant transmise à la pièce fabriquée, cette dureté peut être elle-même modifiée par l'opération de mise en forme, en particulier dans le cas des métaux et alliages, susceptibles de s'écrouir lors d'une déformation et de recristalliser lors d'un recuit.

**La prise en considération de l'impact sur l'environnement**, mentionné précédemment pour le matériau lui-même, est aussi nécessaire pour le procédé qui permet de le travailler, dont les rejets de résidus, effluents, sous-produits peuvent s'avérer dangereux (par exemple le dépôt électrolytique de cadmium pour la protection des aciers contre la corrosion). En particulier, il convient de prendre en compte le problème des déchets d'usinage, des copeaux : ils sont, d'une part, la cause d'une perte de matériaux, mais, de plus, ils posent parfois des problèmes épineux car ils doivent être recyclés séparément. Ces problèmes induisent un surcoût de mise en œuvre parfois difficile à évaluer : quand on conçoit une aile d'avion, doit-on opter pour un usinage dans la masse ou pour une solution assemblée? Les copeaux résultant de l'usinage peuvent-ils être recyclés directement ou bien doit-on les collecter séparément ? Le problème du recyclage se pose de façon plus difficile encore en ce qui concerne le produit et non plus le matériau. Un des aspects difficiles à traiter (parce que dépendant de façon cruciale des législations en vigueur) est celui de la collecte des matériaux à recycler.

De même, un mauvais choix du mode d'assemblage de deux éléments d'un ensemble peut rendre plus difficile son démontage et son recyclage en fin de vie. Pour obtenir une même forme finale, certains procédés sont plus coûteux en énergie que d'autres : c'est là, bien sûr, une donnée de base pour intégrer le recyclage dans le problème de sélection, mais la question est, comme on vient de le voir, beaucoup plus complexe.

**Dans la pratique industrielle**, le niveau de performances accessible sur divers matériaux avec un procédé qui leur est applicable est souvent mesuré par des indices d'aptitude spécifiques, déterminés expérimentalement grâce à des essais comparatifs standardisés : **coulabilité, usinabilité, emboutissabilité, forgeabilité, soudabilité...**

Ces essais s'avèrent précieux pour une sélection plus précise et optimisée à l'intérieur d'une classe ou d'une sous-classe de matériaux candidats ; ils permettent en particulier de vérifier si la combinaison matériau-procédé permettra bien d'obtenir les caractéristiques fonctionnelles nécessaires pour la pièce finale.

#### **4. Propriétés caractérisant un matériau**

Le cahier des charges pour le choix d'un matériau donné va dépendre directement de ses propriétés d'usage. On peut classer ces propriétés de la façon suivante:

— **Propriétés mécaniques:**

- instantanées (traction, compression, cisaillement, flexion, tenue aux chocs et essais de résilience),
- non instantanées (fatigue, fluage, relaxation,...),
- de surface (dureté, abrasion, résistance à la rayure,...).

— **Propriétés thermiques** (dilatation, conductivité thermique, températures de transition,...).

— **Propriétés électromagnétiques** (résistivité, conductivité,...).

— **Propriétés optiques** (transparence, brillance, indice de réfraction...).

— **Propriétés physiques** diverses (masse volumique, porosité, étanchéité aux agents chimiques,...).

— **propriétés chimiques**, résistance à l'usage en fonction du milieu chimique (corrosion, résistance aux suivants, tenue au feu, vieillissement,...).

— Propriétés diverses dépendant de la qualité de la mise en œuvre et des possibilités de transformation ultérieures (sensibilité aux défauts, stabilité dimensionnelle, soudabilité, collabilité, recyclabilité,...).

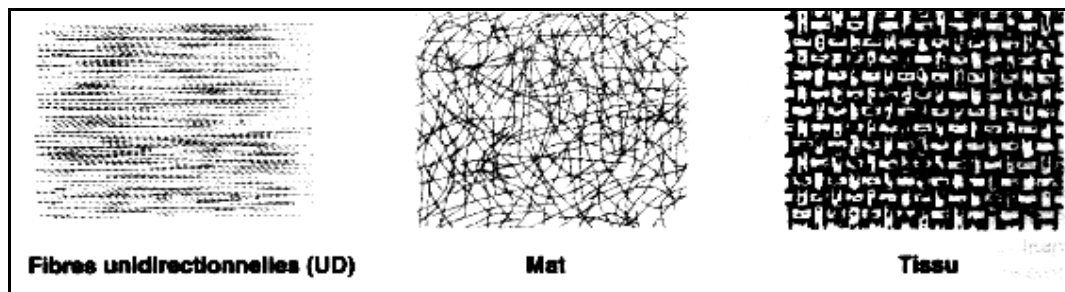
En ce qui concerne le comportement à l'usage du matériau, on se reportera au chapitre modes de dégradation des matériaux (propriétés chimiques,...).

Ces propriétés vont dépendre largement de l'anisotropie et de l'hétérogénéité du matériau:  
 — Un matériau hétérogène est un matériau dont la répartition des différents éléments constitutifs en son sein (constituants, atomes) n'est pas uniforme. À l'opposé, le matériau est dit homogène. Cette hétérogénéité peut prendre divers aspects en fonction des phases ou constituants en présence. Elle peut concerner aussi bien la répartition des atomes au sein de chaque constituant que la répartition des constituants eux-mêmes au sein du matériau.

Sauf cas de laboratoire, les matériaux véritablement homogènes ne peuvent se rencontrer en pratique, ne serait-ce que parce que la présence des impuretés est inévitable.

— Un matériau anisotrope possède des propriétés variables en fonction de la direction des différentes forces exercées sur le matériau. À l'opposé, le matériau est à l'état isotrope.

En pratique il est rare de rencontrer de véritables matériaux solides isotropes obtenus de la main de l'homme. Les modes de mise en œuvre choisis engendrent systématiquement un certain degré d'anisotropie qu'il faut pouvoir contrôler pour garantir la qualité du produit obtenu. Ci-dessous, sont représentés des cas des matériaux composites, un des rares cas où l'anisotropie du matériau est recherchée, à travers la disposition des renforts:



### Propriétés mécaniques instantanées

Les propriétés mécaniques du matériau caractérisent sa capacité à réagir et donc à subir des contraintes ( $\sigma$ ) et des déformations ( $\epsilon$ ) sous l'effet d'un ensemble de forces ( $F$ ) donné. Ces forces peuvent être appliquées sur la surface externe du matériau et sont dites des forces externes. Mais elles peuvent être aussi internes et découlent des tensions déjà existantes au sein du matériau, souvent consécutives à sa mise en œuvre.

Ces propriétés sont dites instantanées, c'est-à-dire que  $\sigma$ ,  $\epsilon$ , et  $F$  n'évoluent pas en fonction du temps. En fait, c'est inexact, car ces propriétés varient avec la vitesse de déformation. Pour tout matériau (en particulier les matériaux plastiques), il y a un phénomène d'inertie, où le facteur temps intervient. On dit que le matériau est viscoélastique ou viscoplastique (voir, ultérieurement, les propriétés non instantanées). Contraintes et déformations peuvent être de plus ou moins grande importance, jusqu'à éventuellement atteindre la rupture. Elles peuvent être locales ou s'étendre à l'ensemble du matériau. De façon générale, elles se définissent de la façon suivante:

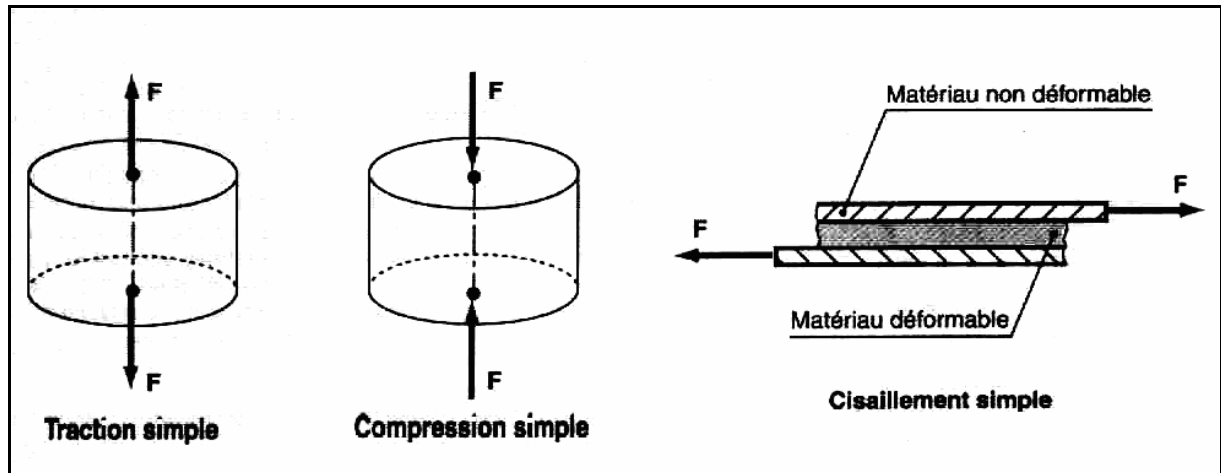
$$\sigma = \frac{\text{Force}}{\text{Section}} = \frac{F}{S} ; \quad \epsilon = \frac{\text{Différence de longueur}}{\text{Longueur initiale}} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Cependant, contraintes et déformations forment un ensemble complexe. Tout allongement consécutif à l'action d'une force externe donnée engendre un ensemble de forces induites

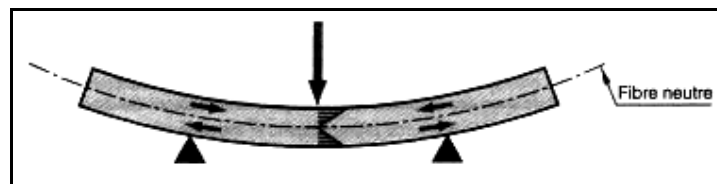
au sein du matériau. Cela implique en particulier un rétrécissement dans la direction perpendiculaire.

$\sigma$  et  $\epsilon$  doivent donc se définir avec différentes composantes en fonction du sens d'orientation de la force appliquée au sein du matériau et de l'orientation de la section sur laquelle s'applique celle force. Dans quelques cas particuliers, avec un mode opératoire adéquat (conditions d'essai en laboratoire), le système de forces appliqué au sein du matériau est simple, ce qui permet d'évaluer plus rigoureusement les caractéristiques mécaniques.

Il s'agit de la **traction simple**, de la **compression simple**, et du **cisaillement simple** schématisés ci-dessous:

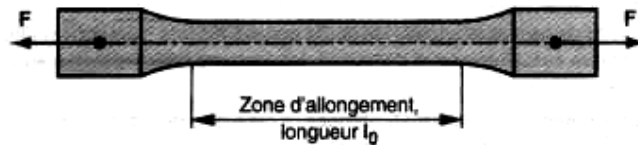


Dans la plupart des cas, particulièrement dans la vie courante, le matériau sera soumis à un ensemble de forces combinant la traction, la compression et le cisaillement. C'est le cas de la flexion qui est aussi un essai de laboratoire, bien que permettant moins bien de caractériser le matériau. Cet essai garde cependant un grand intérêt pratique car il est souvent plus représentatif des conditions d'utilisation du matériau.



En dessous de la fibre neutre, le matériau est soumis à des **contraintes de traction** et, au-dessus, à des **contraintes de compression**. En outre, comme ces contraintes sont plus élevées au centre de l'éprouvette, le matériau est soumis à des **contraintes de cisaillement**.

1. **L'essai de traction** est le principal essai de laboratoire caractérisant les propriétés mécaniques instantanées d'un matériau. On utilise des éprouvettes en forme d'haltère qui sont dimensionnées de façon à ce que l'allongement se fasse uniquement dans la zone centrale tout en permettant la fixation des extrémités dans les mors.

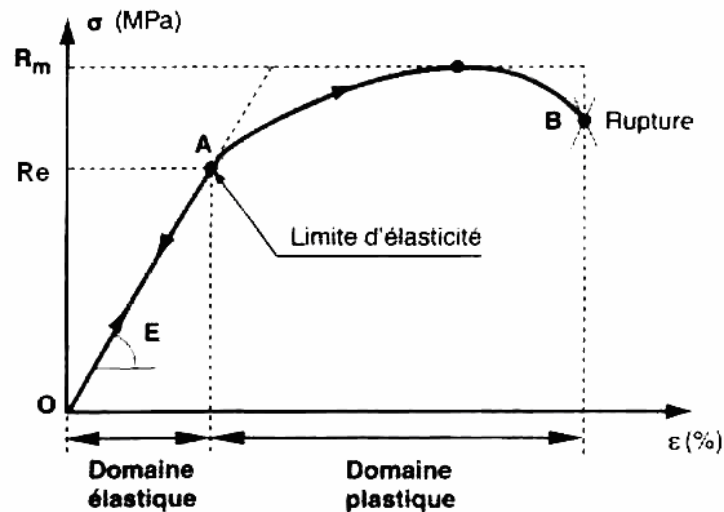


Cette zone centrale, de section uniforme plus faible que sur le reste de l'éprouvette, peut être de section cylindrique ou rectangulaire selon le matériau et la norme.

Dans ce cas précis, déformations et contraintes se définissent simplement dans le sens de l'allongement.

$$\sigma = \frac{\text{Force}}{\text{Section}} = \frac{F}{S} ; \quad \varepsilon = \frac{\text{Différence de longueur}}{\text{Longueur initiale}} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Cela permet de définir un essai qui caractérise véritablement le matériau, avec des valeurs indépendantes des dimensions de l'éprouvette  $S$  et  $l_0$ . On exploite l'essai de traction en traçant la courbe  $F = f(\Delta l)$ . De façon schématisée, on en déduit une courbe  $\sigma = f(\varepsilon)$  du type ci-dessous;



On tire de cet essai des caractéristiques mécaniques très importantes:

- La résistance à la rupture  $R_m$ . C'est la contrainte maximale obtenue avant d'atteindre la rupture.
- La résistance à la limite élastique  $R_e$ .
- L'allongement à la rupture  $A\%$ .
- Le module d'élasticité  $E$ , ou module d'Young  $E = \sigma/s$ , ce qui est valable uniquement dans le domaine élastique.

On distingue généralement deux phases, le domaine élastique  $OA$ , et le domaine plastique  $AB$ :

- dans le **domaine élastique**, les déformations sont réversibles, c'est-à-dire que l'éprouvette reprend sa longueur initiale lorsque la force appliquée est supprimée ( $\sigma=0$  et  $\varepsilon=0$ ). Les déformations maximales pour lesquelles existe un comportement élastique sont généralement faibles (pas plus de 1%);
- dans le **domaine plastique**, les déformations sont irréversibles, c'est-à-dire que l'éprouvette ne reprend plus sa longueur initiale lorsque la force appliquée est supprimée ( $\sigma=0$  et  $\varepsilon=0$ ). Il existe des matériaux tels que le verre sans déformation plastique jusqu'à la

rupture. À l'opposé, des matériaux tels que l'or, certains matériaux plastiques, atteignent la rupture avec des déformations plastiques extrêmement élevées (plus de 1000%).

Dans le domaine élastique, la courbe prend l'aspect d'une droite, c'est-à-dire que  $\sigma$  est proportionnel à  $\epsilon$ . Dans le domaine plastique, ce n'est plus le cas, et cela permet de définir en **A** la limite entre domaine élastique et domaine plastique, appelée limite d'élasticité, ou encore seuil d'écoulement.

Cependant, la transition définissant cette limite d'élasticité est parfois difficile à déterminer avec précision sur certaines courbes. Pour lever toute ambiguïté, on définit une limite d'élasticité conventionnelle pour laquelle une déformation plastique fixée à l'avance est atteinte. Ce  $\epsilon$  est en principe fixé à 0,2 % de la longueur étirable de l'éprouvette.

**E** et **R<sub>e</sub>** sont modifiés quand la limite d'élasticité est conventionnelle.

## Propriétés mécaniques statiques déduites d'un essai de traction

### Résistance

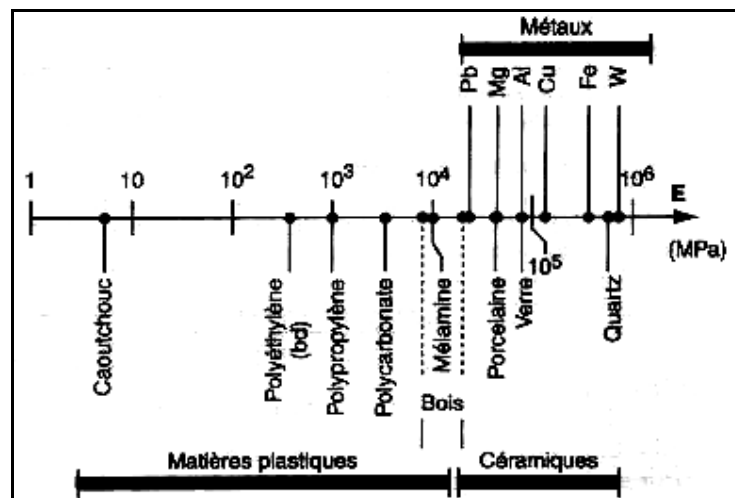
La résistance est définie par **R<sub>m</sub>** la contrainte maximale qu'un matériau peut supporter avant de rompre.

Cependant, on peut également lui associer **R<sub>e</sub>**, la contrainte atteinte à la limite élastique, c'est-à-dire la contrainte maximale qu'un matériau peut supporter avant de se déformer plastiquement, de façon irréversible.

### Rigidité

La rigidité est définie par le module d'élasticité **E**. Elle définit donc la capacité du matériau à se déformer de façon élastique et donc réversible. Plus le matériau est rigide, plus la force qu'il faut lui appliquer est importante, pour une déformation donnée.

Ci-contre, figurent quelques valeurs typiques pour situer l'échelle des valeurs sur l'ensemble des matériaux.



### Ductilité

La ductilité est définie par l'allongement à la rupture **A%**. C'est la propriété grâce à laquelle un matériau peut se déformer fortement de façon permanente avant de se rompre. Par opposition au matériau fragile (voir ci-dessous), un matériau ductile casse avec présence de déformation plastique.

Un matériau ductile présente de nombreux avantages:

- la transformation du matériau à l'état solide est facilitée. Cela implique une malléabilité du matériau, c'est-à-dire une aptitude de façonnage, de modelage, aisée
- une dégradation éventuelle du matériau pour une application donnée peut être détectée et contrôlée à temps, car la rupture est non immédiate
- cela permet d'envisager un dimensionnement avec une marge de sécurité, surtout si les déformations permanentes sont jugées supportables.

### Fragilité

Un matériau fragile se déforme jusqu'à la rupture sans aucune déformation plastique, c'est-à-dire uniquement de façon élastique. C'est le cas de matériaux tels que le verre, les céramiques, mais aussi de certaines matériaux plastiques (polystyrène,...).

#### Un matériau fragile est non ductile.

Des matériaux tels que les aciers, qui sous des conditions normales d'utilisation ont un comportement ductile, peuvent avoir un comportement fragile quand ils sont soumis à de faibles températures et des fortes vitesses de sollicitation.

### Élasticité

Un matériau élastique est caractérisé par la capacité à une forte déformation élastique. Cela peut concerner aussi bien un matériau fragile qu'un matériau ductile.

### Ténacité

La ténacité est caractérisée par l'énergie nécessaire pour casser un matériau. Un matériau tenace combine donc une bonne capacité d'allongement, et une bonne résistance à la rupture.

Sur un essai de traction, cette énergie est représentée par l'aire sous la courbe.

La ténacité se caractérise aussi par la résistance à la propagation de fissures. Sa mesure peut être obtenue de diverses façons:

- par des essais de résilience, caractérisant la tenue aux chocs (choc Charpy, chute de bille,...);
- par des essais de traction, avec des vitesses de mise en charge faibles.



## 2. Essai de compression

Il s'agit d'un essai très simple, car il suffit de soumettre une éprouvette de forme cylindrique à deux forces opposées, entre deux plateaux d'une presse. L'éprouvette est de géométrie simple, facile à réaliser. Mais il est souvent plus profitable de réaliser un essai de traction pour obtenir des résultats caractérisant de façon rigoureuse le matériau.

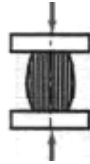


En effet, deux difficultés majeures apparaissent lors de l'essai :

- **Le flambage** si l'éprouvette est trop haute par rapport à son diamètre, il y a risque d'apparition d'une instabilité de l'éprouvette (voir figure).



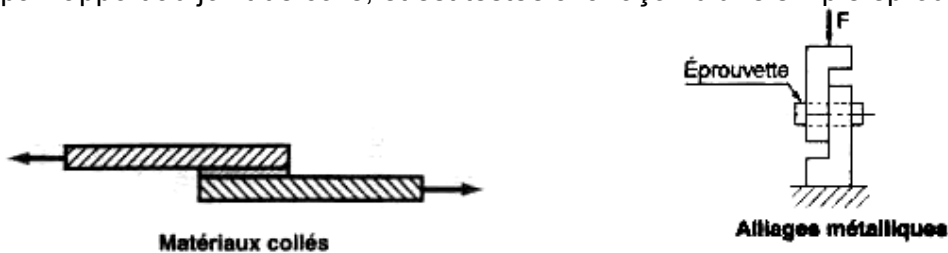
- **Le frottement** éprouvette/plateau d'essai. Celui-ci s'oppose à l'augmentation du diamètre de l'éprouvette, quand sa hauteur diminue. Il en résulte des éprouvettes en forme de barillet (voir figure).



Par conséquent, l'essai de compression est surtout utilisé pour déterminer les propriétés mécaniques des matériaux fragiles (bétons, céramiques) qui, du fait des défauts qu'ils comportent, résistent mal en traction. Ici, le type d'éprouvette est un avantage important : simplicité de sa réalisation, de sa géométrie.

### 3. Essai de cisaillement

Quand le matériau testé est à l'état solide, le cisaillement peut être caractérisé de façon simple sur des joints de colle. L'éprouvette est constituée de supports non déformables par rapport au joint de colle, et est testée à la façon d'une simple éprouvette de traction.



### 4. Essai de flexion

Comparativement à l'essai de traction, l'essai de flexion présente l'avantage d'utiliser des éprouvettes de conception simple, avec des barreaux de section rectangulaire. Cela permet, comme pour la compression, de tester des matériaux tels que les verres et les céramiques, difficiles à tester en traction.

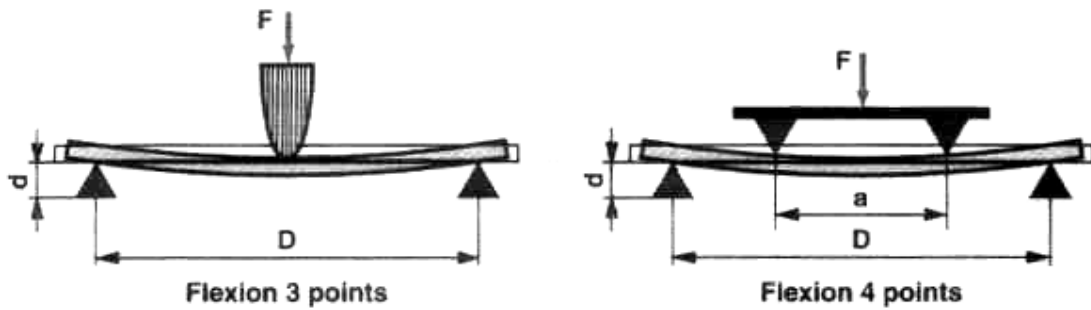
Il présente aussi l'avantage d'être un essai souvent plus représentatif des conditions d'utilisation du matériau. En contrepartie, cet essai ne permet pas d'atteindre la rupture des matériaux ductiles, car l'essai n'aurait plus de signification physique au-delà d'une certaine flèche (**d**): les formules ne seraient plus exploitables (contraintes allongements, etc.). du fait de la trop grande courbure atteinte par le matériau.

De ce fait, on se limitera à des déformations élastiques, avant tout pour tester la rigidité et déterminer la limite élastique.

De plus, l'essai de flexion combine des efforts de traction, compression et cisaillement. Cela limite la validité de l'essai, et rend les formules dépendantes des dimensions de l'éprouvette (largeur  $l$ , épaisseur  $h$ ) en fonction de la portée  $D$ .

Ainsi, au niveau des deux principaux essais de flexion, la flexion 3 points et la flexion 4 points, on en déduit les formules suivantes :





$$E = \frac{D^3}{4 b h^3} \times \frac{F}{d} \quad (3 \text{ points})$$

$$\sigma = \frac{3 F D}{2 b h^2} \quad (3 \text{ points})$$

$$E = \frac{3 D^2 (L - D)}{b h^3} \times \frac{F}{d} \quad (4 \text{ points})$$

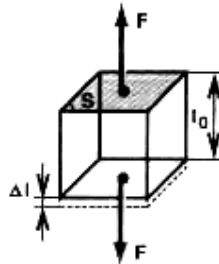
$$\sigma = \frac{3 F (D - a)}{2 b h^2} \quad (4 \text{ points})$$

Le module d'élasticité **E** est une valeur importante Caractérisant le matériau. Avec des conditions opératoires optimales, et dans la mesure où le matériau lesté est peu anisotrope, peu hétérogène, les valeurs obtenues se recoupent dans les quatre essais vus précédemment.

Les modules d'élasticité en traction et en compression sont en principe identiques. Avec l'essai de flexion, la valeur obtenue est plus dépendante de la portée et des dimensions de l'éprouvette. Les différences sont cependant minimales, **E** est généralement légèrement plus faible.

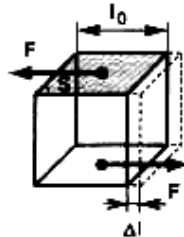
Dans tous les cas, **E**, encore appelé module d'Young, est défini par la formule ci-dessous (loi de Hooke). ( $\sigma$  et  $\epsilon$  sont parallèles à la force appliquée (valeurs normales)).

$$\sigma = E \epsilon \quad (\text{avec } \sigma = F/S \text{ et } \epsilon = \Delta l / l_0)$$



Dans le cas de l'essai de cisaillement, le module d'élasticité noté **G** est appelé module de Coulomb et est défini par une loi similaire, la loi de Coulomb,  $\tau$  est une contrainte de cisaillement, et une déformation de cisaillement.

$$\tau = G \gamma \quad (\text{avec } \tau = F/S \text{ et } \gamma = \Delta l / l_0)$$



## 5. Essais de résilience. Essais de tenue aux chocs

Ces essais sont assimilés à des essais de tenue aux chocs, et ont pour but de mettre en évidence la ténacité du matériau avec de fortes vitesses de sollicitation. Ce sont des essais de résilience.

La ténacité est caractérisée par l'énergie nécessaire **E** pour casser un matériau. La résilience **K** du matériau est définie par la formule:

$$K = E/S$$

**S** est le section résistante de l'éprouvette, c'est-à-dire celle qui est soumise aux plus fortes contraintes lors du choc. On notera cependant qu'une valeur de résilience ne peut être validée que si l'éprouvette a cassé lors de l'essai.

Dans le cas contraire, il faut prévoir une entaille sur l'éprouvette pour favoriser la rupture. Plus cette entaille est aiguë, plus on accentue le caractère fragile du matériau.

Dans les conditions de service, un matériau aura une plus grande tendance à casser avec les facteurs suivants:

- les basses températures,
- les vitesses croissantes d'application des charges,
- les efforts anormaux (efforts excentrés agissant dans des directions hors axe de symétrie).

Comme il est difficile de concevoir des essais avec des efforts anormaux, les essais de résilience sont des essais avec des vitesses de sollicitation (donc de déformation) élevées et/ou de faibles températures.

Les essais de résilience se différencient en fonction de la vitesse de sollicitation de l'élément venant percuter le matériau.

Méthode	Vitesse de sollicitation (m/s)
Choc Charpy	3
Choc Izod	2,44
Chute de bille	1-4
Systèmes hydrauliques	0,08-4
Pistolet pneumatique	20-240
Canon à air comprimé	0-20

### 5.1. ESSAIS PAR CHUTE DE BILLE

Cet essai est le plus simple de tous. Il suffit de laisser tomber une bille de poids déterminé sur une éprouvette de section **S** donnée.

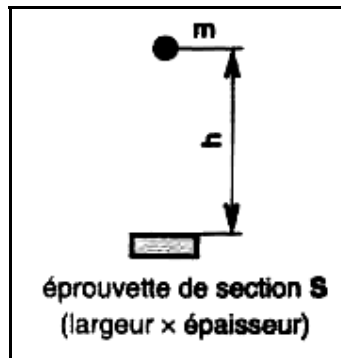
La résilience **K** sera obtenue en recherchant l'énergie **E** nécessaire pour casser l'éprouvette, et la hauteur de chute correspondante.

Cette énergie est une énergie potentielle, et est donnée par la formule bien connue :

$$E = mgh$$

**Exemple** : pour une masse de 1 kg et une hauteur de 1 m, on trouve:

$$m * g = 1 \times 9,81 = 9,81 \text{ N, et } E = 1 \times 9,81 \text{ N} * m = \mathbf{9,81 \text{ J}}$$



L'essai de chute de bille est d'une grande simplicité, d'autant qu'il est facile de moduler la hauteur de chute ou le poids de la bille.

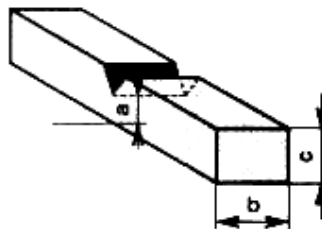
En contrepartie, comparativement aux **chocs Charpy et Izod** ci-dessous, il est plus difficile de tirer des conclusions de cet essai (pas de possibilité de réaliser des entailles, observations subjectives, nécessité d'un grand nombre d'essais,...).

## 5.2. Essai Charpy

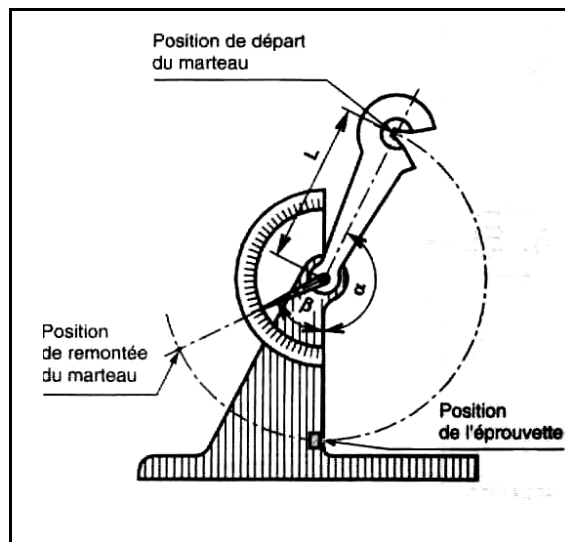
Contrairement à la chute de bille, les éprouvettes sont sous forme de barreau, ce qui permet de bien mieux définir la section résistante **S**.

**S** est égale à  $a \times b$  dans le cas d'une éprouvette entaillée, et  $b \times c$  pour une éprouvette non entaillée. Dans les deux cas, on utilise un mouton pendule pour casser les éprouvettes.

Après avoir lâché le bras du pendule d'un angle  $\alpha$  par rapport à sa position d'équilibre, on mesure l'angle de remontée. Après avoir lâché le bras du pendule d'un angle  $\alpha$  par rapport à sa position d'équilibre, on mesure l'angle de remontée  $\beta$ .



L'intérêt de cet essai, c'est que la mesure de cet angle  $\beta$  permet de déterminer l'énergie **E** fournie au matériau pour qu'il puisse se casser, compte tenu de l'énergie cinétique fournie au marteau au départ de l'essai. La plupart du temps, l'appareil est étalonné de façon à permettre une lecture directe de **E**. Dans le cas contraire, **E** peut se calculer en fonction de  $\beta$  :

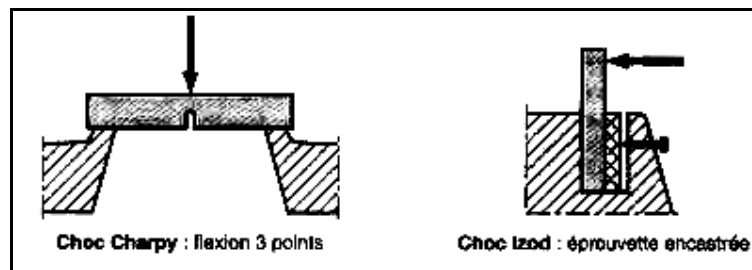


$M$  = masse bras + percuteur

$L$  = longueur du bras, jusqu'au point d'impact

$$E = MgL(\cos\alpha - \cos\beta)$$

Deux types de position pour l'éprouvette :



En fonction du matériau testé, le pendule sera choisi à partir de l'énergie cinétique

$E = MgL\cos\alpha$  disponible :

— de 0,5 à 4 J, ou 7,5 à 50 J : matières plastiques;

— de 100 à 300 J alliages légers, aciers avec de petites éprouvettes Charpy (distance entre appuis de 40 mm). Masse du pendule de 8,6 kg à 22,5 kg;

— 3 000 J aciers, fontes avec de grandes éprouvettes Charpy (distance entre appuis de 120 mm). Masse du pendule = 94 kg.

On distingue trois grandes familles d'éprouvettes, dont chacune fait l'objet de normes très précises:

— **Charpy U** : flexion 3 points, avec entaille en U. **Résilience notée KU**;

— **Charpy V** flexion 3 points, avec entaille en V. **Résilience notée KV**;

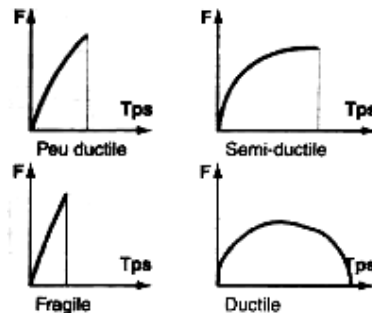
— **Izod** : éprouvette encastrée, entaille affleurante, en V. **Résilience Izod**.

Malheureusement, il existe un très grand nombre de dimensions possibles, en fonction de la taille de l'éprouvette, la profondeur, le type d'entaille,... Cela rend difficile la comparaison des valeurs entre différents matériaux.

On notera cependant:

- l'essai Izod est spécialement adapté pour les matières plastiques, car l'encastrement évite les grosses déformations n'aboutissant pas à la rupture;
- l'essai Charpy U est facile à réaliser car le rayon au fond de l'entaille est important, mais manque de sensibilité (surtout pour les matériaux ductiles);
- pour l'essai Charpy V, les exigences de précision d'entaille sont difficiles à atteindre, mais les résultats obtenus sont plus rigoureux et plus reproductibles, Malgré tout, ces essais de résilience sur barreau nécessitent un grand nombre d'éprouvettes pour obtenir des résultats fiables, car la dispersion est très importante. Comme ce sont aussi des essais rapides à réaliser, ils doivent être considérés avant tout comme des essais de contrôle qualité,

Parfois on instrumente l'appareil d'essai, c'est-à-dire qu'on l'équipe de façon à pouvoir tracer une courbe Force = t (temps), A nouveau, on retrouve des familles de matériau similaires à celles obtenues sur l'essai de traction. Par exemple:



Le cas des aciers et des fontes prend une importance particulière. Ici, les éprouvettes peuvent casser avec un mode ductile ou fragile selon la sévérité de l'essai.

On accentue le caractère fragile quand:

- la température décroît;
- la vitesse de sollicitation est croissante (vitesse du percuteur)
- on augmente le degré des efforts transversaux (ou anormaux);
- on diminue le rayon dans le fond de l'entaille.

L'aspect de la surface de rupture sera différent selon le cas où elle a eu lieu en mode fragile ou ductile:

- en mode ductile, la surface prend un aspect mat et boursoufflé, la matière a été « arrachée (cristallinité 0 %);
- en mode fragile, la surface prend un aspect brillant. On voit la surface lisse d'une multitude de petits cristaux accolés les uns aux autres Qui ont cassé net, comme du verre (cristallinité 100 %).

Il existe une zone de transition pour laquelle la surface de rupture est mixte. On voit distinctement une zone mate et une zone brillante accolées (cristallinité variable).

Par exemple, lorsque l'on fait varier la température, on peut obtenir une courbe du type ci-dessous. La plage de température pour laquelle la rupture est mixte peut être très étendue, jusqu'à 60°C- Le type de cassure fragile s'observe souvent à des températures négatives (alliages métalliques).

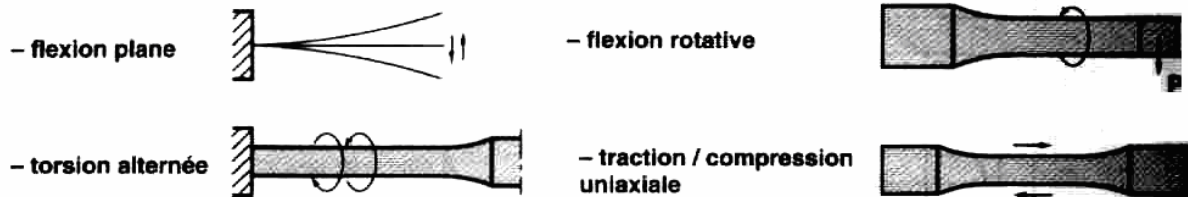
## 6. Essais de fatigue

On réalise un essai de fatigue en comptant le nombre de cycles nécessaires jusqu'à la rupture, en fonction d'un cycle de charge donné, tout en conservant des déformations élastiques. En fait, les essais de fatigue sont très variables et très difficiles à réaliser, pour plusieurs raisons :

- Ils sont très longs, c'est-à-dire qu'il faut réaliser un très grand nombre de cycles avant d'aboutir à une rupture éventuelle.

- Ils ne peuvent véritablement simuler les cas tirés de la pratique, qui ont des cycles d'une grande complexité. Exemple, la courbe ci-contre.
- La rupture éventuelle fait appel à la notion de probabilité, ce qui implique un grand nombre d'essais vérificatifs.
- Un grand nombre de paramètres interviennent
  - la température,
  - le degré d'agressivité chimique,
  - l'amplitude de variation des contraintes  $\Delta\sigma$ ,
  - la contrainte moyenne  $\sigma_m$ ,...

Il existe un grand nombre de modes de sollicitation, parmi lesquels on trouve parmi les plus fréquents:



## 7. Essais de dureté

La dureté d'un matériau est la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un corps plus dur. Les essais de dureté sont particulièrement utilisés pour caractériser les matériaux métalliques, en particulier parce que ce sont des essais rapides à effectuer. Ils permettent ainsi de réaliser un contrôle qualité du matériau en ayant une première approche des caractéristiques mécaniques statiques (résistance, rigidité, etc.), sans être obligé de réaliser un essai de traction, long et coûteux.

Il existe un grand nombre d'essais possibles, mais on relèvera surtout **Brinell**, **Rockwell**, **Vickers**, très complémentaires.

Les essais de dureté sont également très utilisés pour les matériaux plastiques (moins durs), mais avec d'autres essais que ceux mentionnés ci-dessus, **Shore** et **Baical**, essentiellement. Ces essais ont l'avantage d'être encore plus rapides, mais la précision des mesures est moins bonne.

Quant aux verres et céramiques, ce sont des matériaux trop durs et trop fragiles pour être testés en dureté sous cette forme.

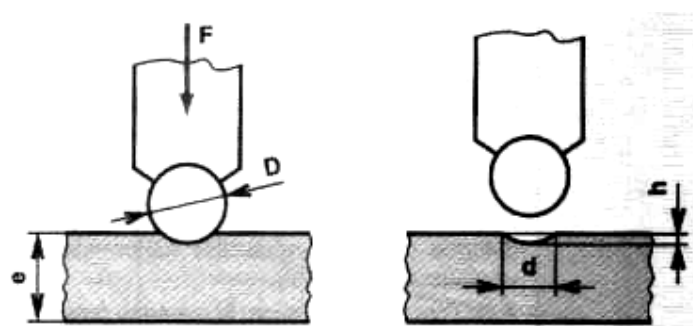
Les essais de dureté donnent des valeurs conventionnelles et sans unité. Pour permettre un contrôle qualité, ce sont des valeurs comparatives.

Dans le cas des essais Brinell, Rockwell et Vickers, le symbole de dureté est respectivement **HB**, **HR**, **HV**.

### **ESSAIS BRINELL**

L'essai consiste à imprimer dans le matériau une bille en acier de diamètre **D** sous une charge et à mesurer l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge.

La dureté **Brinell HB** est un nombre proportionnel à la force appliquée **F** divisé par la surface de l'empreinte.



Cette surface **S** d'empreinte peut se calculer en fonction de la profondeur **h** ou du diamètre **d**. Selon le cas on aura;

$$HB = \frac{F}{S}$$

F → N

S → mm<sup>2</sup>

$$HB = \frac{0,102 (2 \cdot F)}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{0,102 F}{\pi D h}$$

Selon le matériau, la norme préconise une force **F** en fonction du diamètre **D** de la bille. **D** peut être égal à : **1; 2.5; 5; 10**mm.

La charge doit être appliquée sans chocs ni vibrations, pendant 10 à 15 secondes.

Matériaux	F(N)
Aciers, fontes, cupro-nickel, bronzes	9,81 x 30 D <sup>2</sup>
Laitons, alliages légers	9,81 x 10 D <sup>2</sup>
Cuivre, aluminium-cuivre, alliages de zinc	9,81 x 5 D <sup>2</sup>
Alliages étain et plomb	9,81 x 2 D <sup>2</sup>

On notera une dureté Brinell de la façon suivante:

Résultat du calcul HB : Diamètre de la bille en **mm**/ Charge en **daN** /Durée en **sec**.

Ex.: 200 HB 5/750/15.

En fait, les 3 chiffres après HB sont facultatifs et ne devraient être notés que s'ils sont différents des valeurs normalisées préconisées.

L'essai doit se faire sous certaines conditions :

— la dureté du matériau doit être inférieure à celle de la bille (la solution est déconseillée avec plus de 229 HB);

— les dimensions et la position d'une empreinte font l'objet de valeurs normalisées qui dépendent du matériau testé:

- la profondeur ne doit pas être trop grande par rapport à l'épaisseur de la pièce (rapport 1/8 à 1/10),

- l'empreinte ne doit être ni trop proche d'une autre, ni trop proche du bord.

L'empreinte laissée par la bille diamètre 10 mm est importante, avec un diamètre qui dépasse en général 3 mm. Cet essai sera donc préconisé sur des pièces laminées, ou moulées à gros grain, pour lesquelles il existe une forte hétérogénéité.

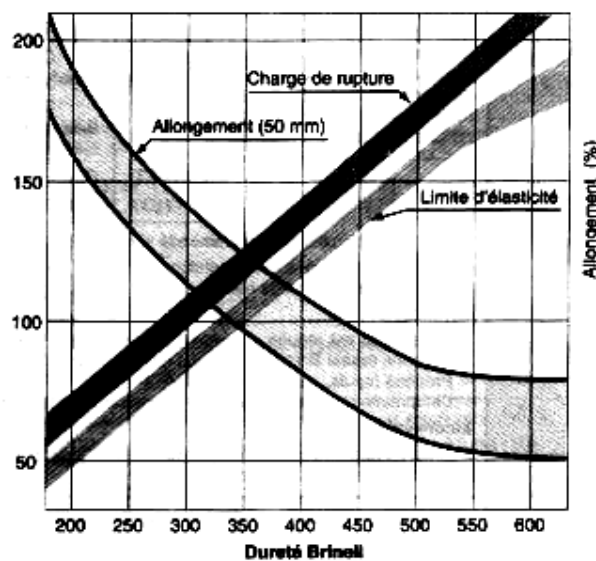
Un des inconvénients de cet essai, c'est qu'il n'existe pas de correspondance entre les résultats obtenus avec  $F = 30 D^2$ , et ceux avec  $F = 10 D^2$ . De même, il n'existe pas de méthodes de conversion de la dureté Brinell en d'autres échelles de dureté, Il est donc difficile de comparer la dureté Brinell pour des matériaux ayant une forte différence de dureté.

Relation entre **HB** et **R<sub>m</sub>**.

Cette dureté peut être liée à la résistance à la rupture en traction par la relation.

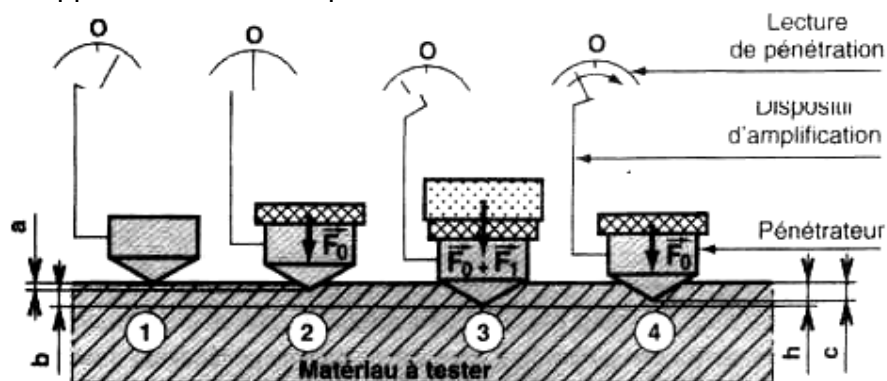
$$HB \sim 3R_m$$

Cette formule est acceptable pour les aciers, les alliages d'aluminium, les alliages de titane... mais pas pour les fontes grises (variation de l'ordre de 30 %) ou des fontes GS, du fait de leur hétérogénéité et de la variété des structures existantes. En fait, cette méthode de conversion, bien que pratique, doit être évitée car les valeurs de  $R_m$  sont trop susceptibles de varier. Elle ne doit être utilisée que dans le cadre d'un matériau et d'un processus de fabrication bien maîtrisés (contrôle qualité), et d'un état bien défini (normalisé)



### ESSAIS ROCKWELL

L'essai consiste à appliquer une bille d'acier ou un cône diamant dans le matériau à tester. La charge est appliquée en deux temps, avec une précharge  $F_0$  et une surcharge  $F_1$ . Après enlèvement de la seule surcharge, on peut lire la profondeur de l'empreinte  $h$ , l'appareil étant équipé d'un comparateur. On en déduit la dureté Rockwell **HR**, mais ordinairement l'appareil est étalonné pour une lecture directe.





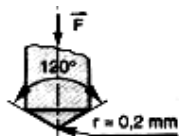
On peut donc noter que comparativement à l'essai Brinell, avec l'essai Rockwell on applique sur le matériau testé une précharge assez faible (98 ou 29,4 N) qui sert d'origine de la mesure de la dureté, et qui subsiste au moment de la mesure de **HR**. Avantages:

- l'échantillon est stabilisé au cours de l'essai,
- minimise l'état d'écaillage superficiel éventuel,
- permet de rendre éventuellement la taille de l'empreinte plus faible, sans que pour autant la qualité de l'état de la surface puisse nuire à la mesure.

**HR** est une valeur conventionnelle et est égale à:

- **130 - h**, dans le cas où l'essai est effectué à l'aide d'une bille; **HRB**
- **100 - h**, dans le cas où l'essai est effectué à l'aide d'un cône diamant. **HRC**

Le cône diamant est encore appelé cône de Brasle et possède un angle au sommet de 120°.



Les diamètres de bille possibles sont : 1,5875 mm; 3,175 mm et 6,35 mm,

Type d'essai	Forme du pénétrateur	Précharge	Surcharge	Alliage métallique
<b>HRc</b>	Cône	98 N ± 2	1373 N ± 7	Fe
<b>HRb, b'</b>	Bille 1,5875 mm	98 N ± 2	883 N ± 4,5	Fe, Al, Cu
<b>HRe</b>	Bille 3,175 mm	98 N ± 2	883 N ± 4,5	Fe, Al
<b>HRf</b>	Bille 1,5875 mm	98 N ± 2	490 N ± 4,5	Fe, Cu
<b>HRg</b>	Bille 1,5875 mm	98 N ± 2	1373 N ± 7	Cu
<b>HRh</b>	Bille 3,175 mm	98 N ± 2	490 N ± 4,5	Al
<b>HRi</b>	Bille 6,35 mm	98 N ± 2	490 N ± 4,5	Al

L'essai à la bille est recommandé pour : aciers non trempés, alliages légers et cuivreux,...

L'essai à la bille n'est pas recommandé si HB > 229.

L'essai à l'aide du cône est généralement réservé pour les aciers. En particulier l'essai HRc est nécessaire pour la caractérisation de l'état de trempe des aciers, avec des valeurs comprises entre 20 et 70.

#### **Avantages**

- L'empreinte est réduite, et convient pour la plupart des matériaux. Quelques exceptions: les pièces moulées à gros grains (essai Brinell), ainsi que les pièces très dures sur de faibles épaisseurs (essai Vickers)
- Procédé rapide, car avec lecture directe;
- L'empreinte peut être réalisée sur une surface brute, exempte d'oxydation et propre.

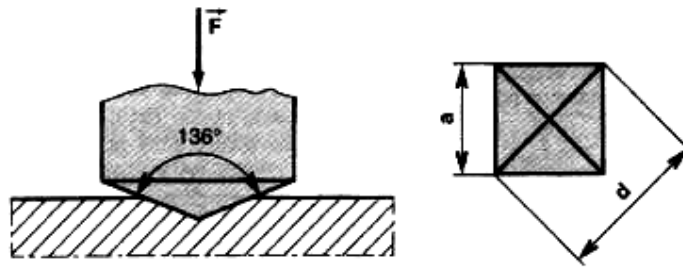
#### **Inconvénient**

Il existe un grand nombre d'essais Rockwell différents, selon le type et la taille du pénétrateur, ainsi que de la force d'essai.

Il n'y a pas de relation de proportionnalité entre ces essais.

#### **Essais Vickers**

L'essai consiste à appliquer dans le matériau un pénétrateur diamant en forme de pyramide à base carrée, d'angle au sommet **136°**, sous l'action d'une charge **F**, et à mesurer la diagonale de l'empreinte après enlèvement de la charge. La dureté Vickers est proportionnelle au rapport **F/S**.



Durée du maintien de la charge: **15s**

$$HV = \frac{2F(\sin 136)/2}{d^2} = 0,189F/d^2$$

L'intérêt de choisir une pyramide à base carrée comme pénétrateur, c'est que contrairement à l'essai Rockwell ou Brinell, la dureté Vickers est quasiment indépendante de la charge appliquée. Cela permet d'établir la gamme de valeurs très large, allant des plastiques jusqu'aux aciers cémentés.

Pour pouvoir mesurer **d**, il faut un système optique. Il s'agit donc d'une manipulation relativement longue. L'essai Vickers convient pour les matériaux homogènes de toute dureté, mais est particulièrement utilisé pour les matériaux les plus durs en couche très mince, car la profondeur de l'empreinte est encore plus petite que l'essai Rockwell : aciers cémentés, aciers nitrurés,... Le principal inconvénient de cet essai est qu'il faudra une surface particulièrement soignée : petite taille de l'empreinte, nécessité d'avoir d1 et d2 de même ordre de grandeur.

#### **Dureté SHORE A et D.**

Ces essais consistent à appliquer une pointe de forme définie, avec une force déterminée, dans le matériau testé.

La pointe étant reliée à un ressort étalonné, l'appareil permet une lecture directe de la dureté arbitrairement échelonnée de 0 à 100, en fonction de la profondeur de pénétration.

Cette pointe étant relativement fragile, ces essais sont adaptés pour les matériaux de faible dureté, c'est-à-dire **les matériaux plastiques, les alliages légers, le plomb...**

Comparativement aux essais Brinell, Rockwell et Vickers, la profondeur de pénétration est très importante.

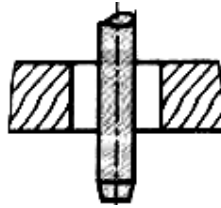
Par conséquent, les mesures de **l'essai Shore** sont moins précises (il est plus difficile de différencier les matériaux).

Elles sont en revanche extrêmement rapides.

Selon le cas, la dureté Shore est définie par le chiffre relevé sur le cadran, suivi par la lettre A ou D (exemples : 70 D, 30 A..)

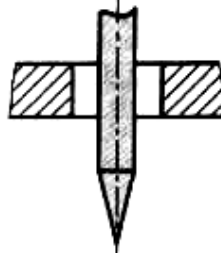
#### **L'essai Shore A:**

- utilisé pour des duretés inférieures ou égales à 85 A (matériau caoutchoutique)
- La masse appliquée est de 1 kg (9,8 N);
- On utilise un duromètre avec une pointe aplatie.



**L'essai Shore D :**

- utilisé pour des duretés supérieures ou égales à 85 A (matières plastiques plus dures)
- la masse appliquée est de 5 kg (49 N);
- on utilise un duromètre avec une pointe fine.



Matériaux	Dureté Shore
Or	8
Cuivre pur	14
Acier à 0,1 % de carbone	18
Acier à 0,7 % de carbone recuit	40
Acier à 0,55 % de carbone trempé	60

5.

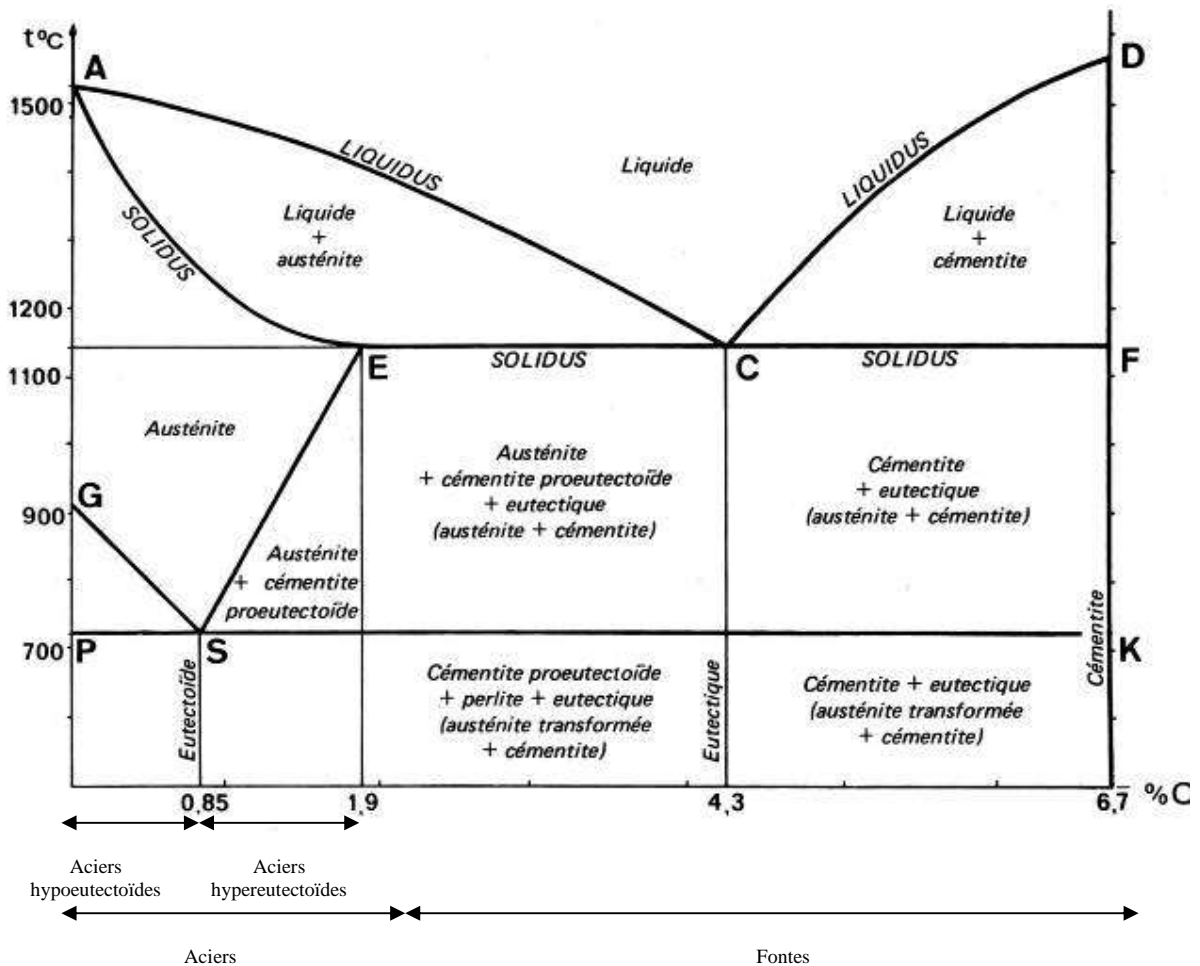
# DIAGRAMME D'ÉQUILIBRE FER/CARBONE

## Diagramme fer carbone

### Représentation du diagramme

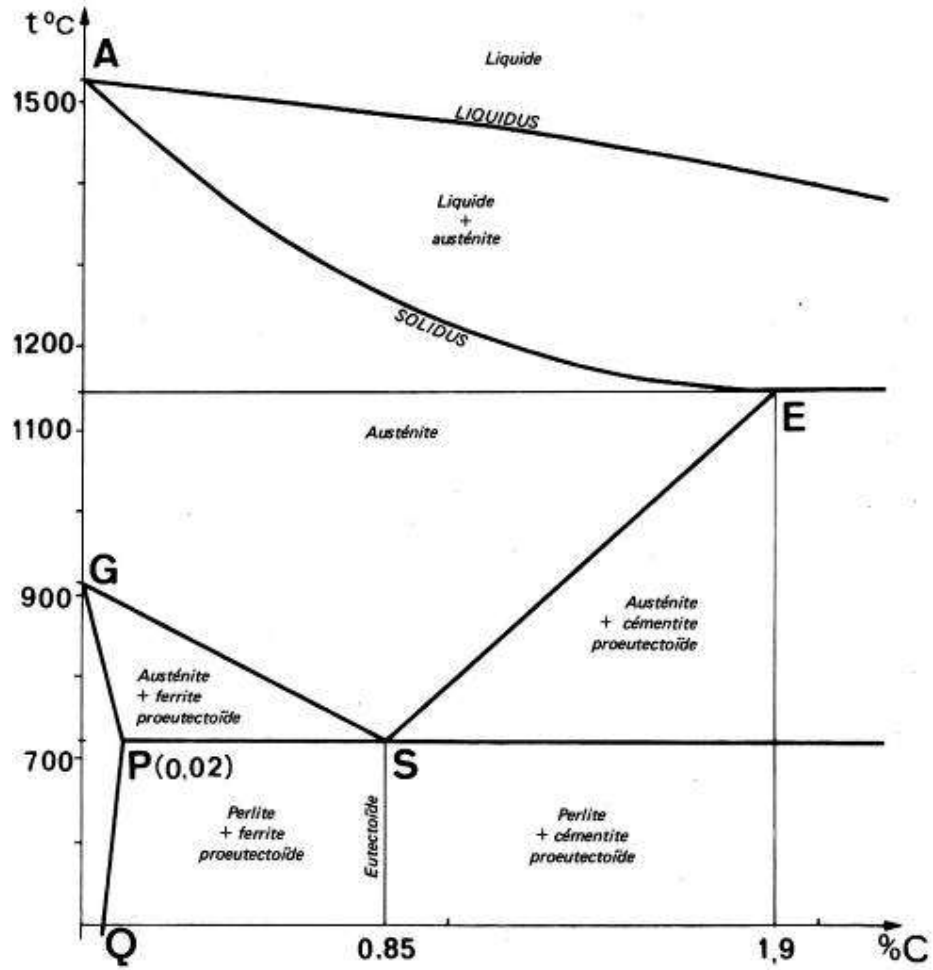
Le diagramme fer - carbone se présente comme le montre la figure. Les lettres repères sont conventionnelles.

Le liquidus est toujours représenté par la ligne **A C D**, le solidus par la ligne **A E C F D**, l'eutectique par le point **C**. Les autres points seront explicités plus loin.



Domaine des aciers

La partie du diagramme correspondant au domaine des aciers est située à gauche du point E.



**DOMAINE DES ACIERS**

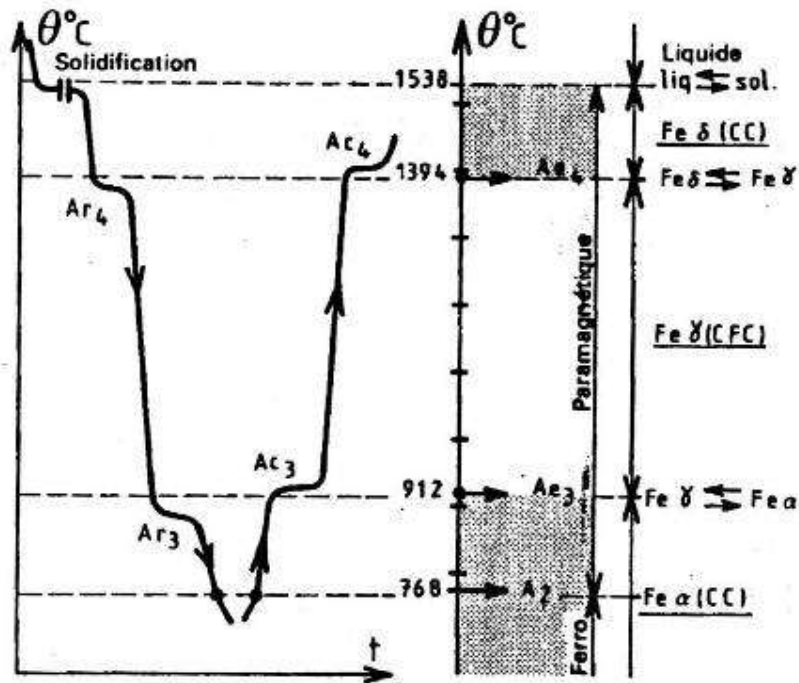
## Propriétés du Fer (structures cristallines et point de transformation)

Le schéma ci-dessous montre les différents points de transformation et la courbe d'analyse thermique correspondante. Mise à part la fusion, le fer présente deux changements de structure cristalline qui sont des transformations isothermes par germination et croissance. Les températures correspondantes sont désignées par  $A_3$  et  $A_4$ .

$A_3$  912° C     $Fe \alpha \leftarrow Fe$   
 $CC \leftarrow CFC$

$A_4$  1394° C  $Fe \leftarrow Fe \delta$   
 $\rightarrow$

CFC CC



Points de transformation du fer. Courbes  $\theta(t)$

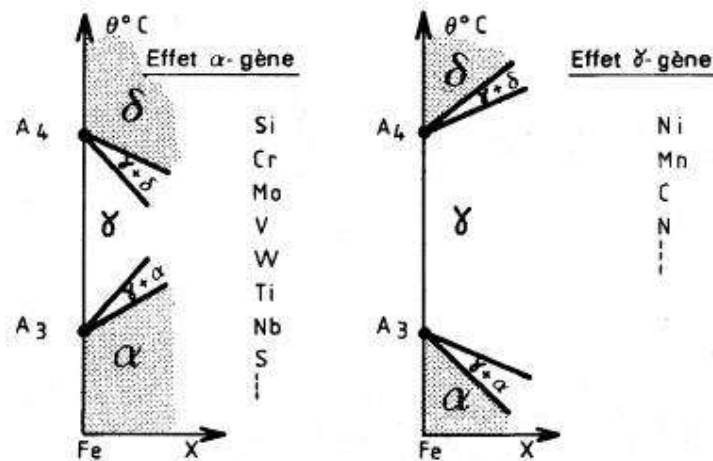
**Remarque** le point  $A_2$  (point de CURIE) ne correspond pas à un changement de phase, mais au passage de l'état ferromagnétique à l'état paramagnétique.

## Alliages ferreux

Le fer forme des alliages avec un grand nombre d'éléments. La mise en solution solide d'éléments d'alliage dans le fer modifie la position des points  $A_3$  et  $A_4$ . Cette modification est particulièrement importante et on a classé les éléments en considérant leur influence sur la position de ces points.

On appelle alphasgène tout élément qui stabilise la phase CC. Il élève la température du point  $A_3$  et abaisse celle du point  $A_4$ .

On appelle gammagène tout élément qui stabilise la phase CFC. Il abaisse la température du point  $A_3$  et élève celle du point  $A_4$ .



Il est à noter que :

Les solutions solides dans le **Fe  $\gamma$**  sont appelées AUSTENITES. On les désigne par  $\gamma$ , elles sont CFC.

Les solutions solides dans le **Fe  $\alpha$**  ou **Fe  $\delta$**  sont appelées FERRITES. On les désigne par  $\alpha$  ou  $\delta$  elles sont CC.

### Le Système Binaire Fe. C

Le carbone est un élément fortement gammagène. De ce fait, et parce qu'il permet la formation de carbures, le carbone joue un rôle particulier dans les alliages ferreux. Il y est en effet toujours présent à cause de leur mode d'élaboration.

Bien que des alliages industriels, aciers et fontes, même non alliés contiennent toujours d'autres éléments, il est nécessaire d'étudier le système binaire Fer + Carbone, il sert de référence à l'étude de tous les alliages ferreux.

## Solution de carbone dans le fer

### État liquide

A l'état liquide, l'acier est une solution de carbone dans le fer. Les atomes de carbone se trouvent répartis, d'une manière homogène, au sein des atomes de fer, en proportion définie par la teneur en carbone de l'acier.

### Solution solide

A l'état solide, les atomes de fer qui constituent la très grande majorité des atomes de l'ensemble, occupent, comme dans le fer pur, les positions qui leur sont dévolues aux noeuds du réseau cristallin. Par contre, les atomes de carbone, dont les dimensions sont inférieures à celles des atomes de fer, trouvent place dans les espaces vacants du réseau.

L'ensemble constitue une solution solide de carbone dans le fer : dans l'acier, il s'agit d'une **solution d'insertion**.



## Les phases

### Ferrite

A la température ordinaire, le fer ne peut normalement contenir, en solution, qu'une quantité infime de carbone, de l'ordre de 0,006 %, pratiquement négligeable en comparaison de la teneur de 1,9 % susceptible de trouver place dans l'acier et même de celles, inférieures à 0,25 %, des aciers destinés aux constructions soudées. Le fer tenant en solution une quantité infime de carbone porte le nom de ferrite. La ferrite est caractérisée par une faible résistance à la traction associée à une faible dureté (80 H Brinell).

### Carbone libre

Le carbone de l'acier, en excès par rapport à la capacité d'absorption du réseau cristallin du fer, devra prendre place en dehors des mailles de ce dernier.

On peut imaginer le voir se séparer et constituer des amas de carbone libre venant s'insérer entre les structures cristallines.

C'est ce que l'on constate dans le cas des fontes grises à graphite "lamellaire" ou "nodulaire", ainsi que dans certains aciers, d'un type particulier, où le carbone se trouve présent sous forme de graphite.

Les aciers de construction peuvent, dans certaines conditions exceptionnelles, être affectés par un phénomène de séparation du carbone sous forme de graphite qui constitue alors une manifestation indésirable, susceptible de provoquer des accidents en cours de service.

Ces exceptions mises à part, le carbone en excès se trouve, pratiquement, toujours associé au fer sous forme de cémentite.

### Cémentite

La combinaison d'un atome de carbone et de trois atomes de fer constitue le carbure de fer qui porte le nom de cémentite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

Ce carbure, très dur et cassant, contient, en poids, environ 6,7 % de carbone Sa dureté est environ 700 H Brinell.

Les aciers non alliés et les fontes, si l'on excepte les fontes graphitées, se trouvent ainsi normalement constitués de cristaux juxtaposés :

- de ferrite, contenant en solution une quantité infime de carbone,
- de cémentite, contenant 6,7 % de carbone.

La ferrite et la cémentite sont les deux constituants de base de l'acier.

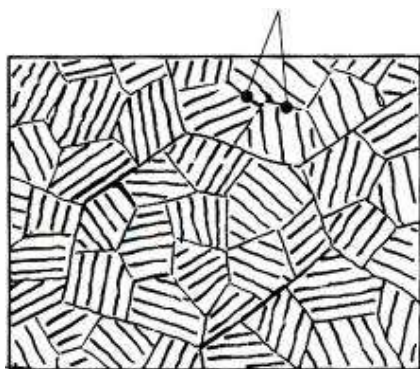
La dureté de la cémentite permet de conférer au métal une résistance nettement supérieure à celle du fer pur, sans provoquer de fragilité, quand elle se trouve intégrée à un agrégat formé de lamelles alternées de ferrite et de cémentite étroitement associées cet agrégat porte le nom de **PERLITE**.

### Perlite

La **PERLITE**, agrégat lamellaire de ferrite et de cémentite, présente une teneur en carbone de 0,85 % C, constante et indépendante de celle de l'acier (fig. 4). Sa dureté est environ 200 H Brinell et son allongement faible.

La perlite se trouve normalement présente, sous forme de plages juxtaposées aux cristaux de ferrite, dans tous les aciers dont la teneur en carbone est inférieure à 0,85 %. Ces aciers sont précisément ceux qui nous intéressent.

Limites des plages de perlite



**Fig. 4** AGRÉGAT DE FERRITE ET DE CÉMENTITE

Acier à 0,85 % de carbone, à structure entièrement perlitique  
Cette figure schématise les lamelles de ferrite et de cémentite.  
La dimension des plages est de l'ordre du dixième de millimètre.

### Association ferrite - perlite

Dans les aciers dont la teneur est comprise entre 0 et 0,85 % C, la perlite, qui contient la quasi totalité du carbone, va donc se trouver en proportion variable. De 0 % dans le fer pur ou la ferrite (fig. 4.1 (a)) elle atteint 100 % dans l'acier à 0,85 % C (fig. 4.1 (c)).

Les aciers de construction, dont la teneur en carbone ne dépasse pas 0,6 %, et reste même inférieure à 0,25 % dans le cas des nuances soumises aux exigences de la construction soudée, vont ainsi présenter une structure composée de plages juxtaposées de ferrite et de perlite (fig. 4.1 (b)).

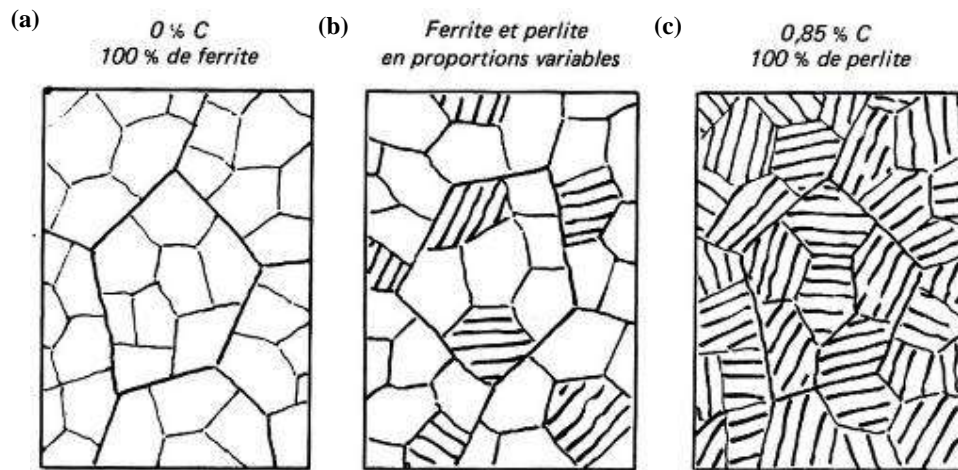


fig. 4.1 association ferrite-perlite illustrant l'influence de la teneur en carbone

La capacité de déformation de la ferrite est pratiquement équivalente à celle du fer pur. La perlite, beaucoup plus dure et peu déformable, agit à la manière d'une armature en gênant, par un effet de bridage, la déformation de la ferrite sous l'action d'un effort appliqué. Il en résulte une modification du processus de déformation conduisant à la rupture : celle-ci intervient sous une charge d'autant plus élevée que la proportion de perlite est, elle-même, plus grande.

Bien entendu, la déformation atteinte par le métal au moment de la rupture varie en raison inverse de la teneur en perlite, dont la capacité de déformation est très inférieure à celle de la ferrite.

**La capacité de déformation de l'acier (allongement de rupture A %, tenue au pliage et aux chocs) varie, pour cette raison, en sens inverse de sa résistance à la traction.**

**Ainsi, par le biais de la quantité de perlite qu'il contribue à former, le carbone constitue le facteur essentiel déterminant les propriétés de l'acier.**

## Remarques

Inconvénient d'une teneur en carbone trop élevée. Cémentite libre

Si la teneur en carbone de l'acier dépasse 0,85 %, la cémentite en excès n'a plus la possibilité de s'associer à la ferrite pour constituer de la perlite.

Cette teneur de 0,85 % marque ainsi le seuil au-delà duquel la cémentite en excès va se présenter sous la forme de liserés continus situés aux joints des grains (fig. 4.2).

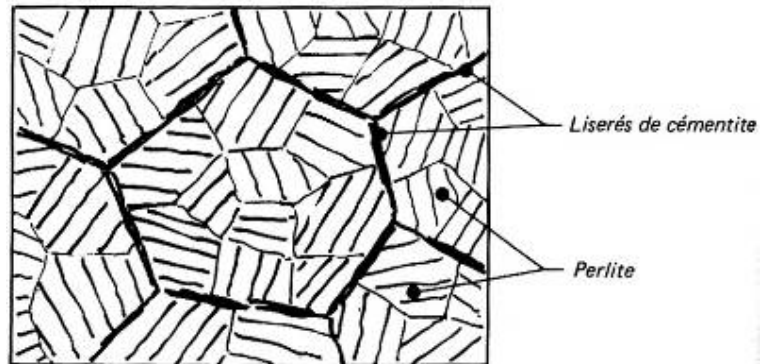
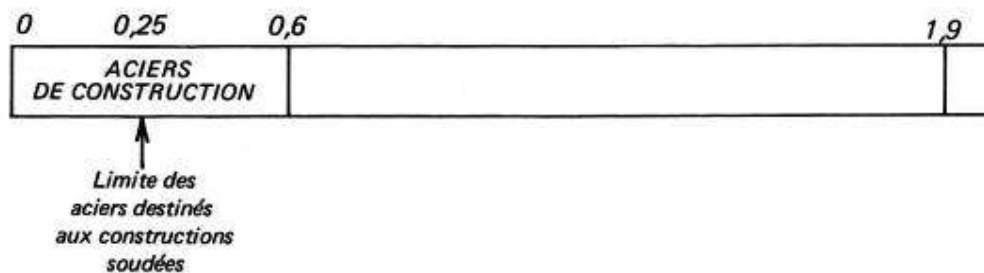


Fig. 4.2 STRUCTURE DES ACIERS A TENEUR EN CARBONE SUPERIEURE A 0,85 %

Position des aciers de construction en fonction de leur teneur en carbone

Ces aciers dont la teneur en carbone est comprise entre 0,05 et 0,6 % n'occupent, en définitive, qu'une bande relativement étroite dans la plage des teneurs en carbone des aciers qui s'étend de 0 à 1,9 %.



L'ensemble des alliages binaires fer-carbone présentent les phases suivantes :

**FERRITE  $\alpha$**  : solution solide d'insertion de carbone dans le fer  $\alpha$  (solubilité maxi 0,02 % à 727° C) La ferrite est CC.

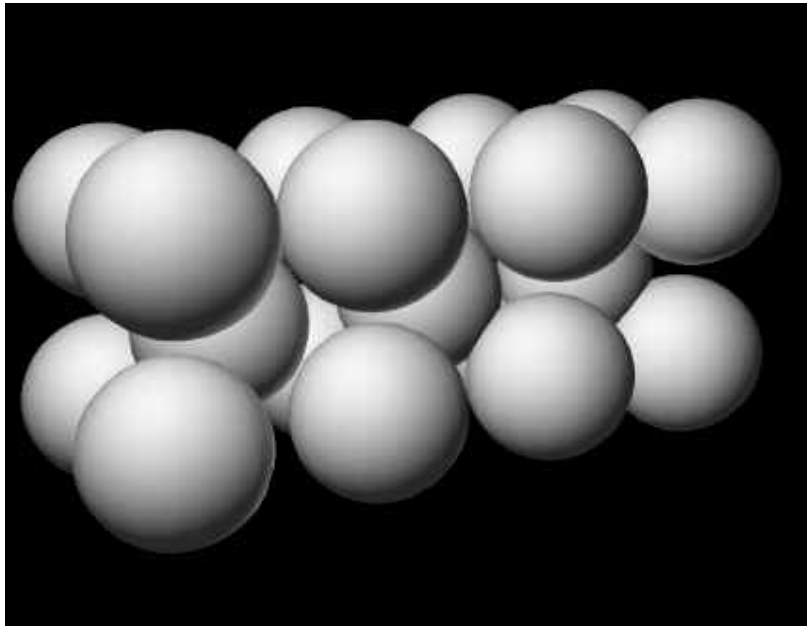
**FERRITE  $\delta$**  : solution solide d'insertion de carbone dans le fer  $\delta$  (solubilité maxi 0,1 % à 1 487° C) La ferrite est CC.

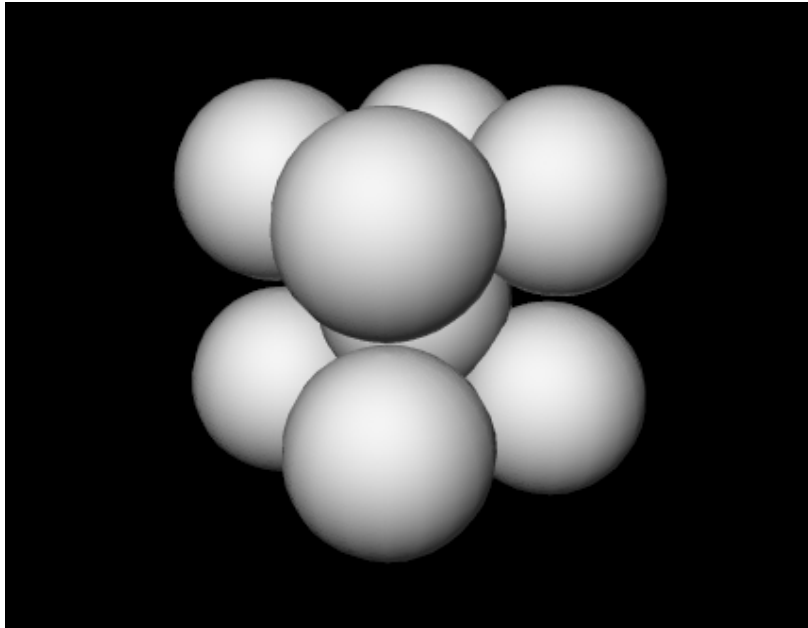
**AUSTÉNITE  $\gamma$** : solution solide d'insertion de carbone dans le fer,

**CÉMENTITE ou carbure de fer,  $Fe_3C$**  : sa composition correspond à une teneur de 6,67 % de carbone.

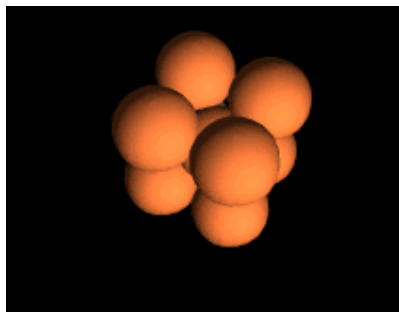
**CARBONE PUR (graphite)** : la solubilité du fer dans le carbone est nulle.

### Structure cristalline du fer à température ambiante

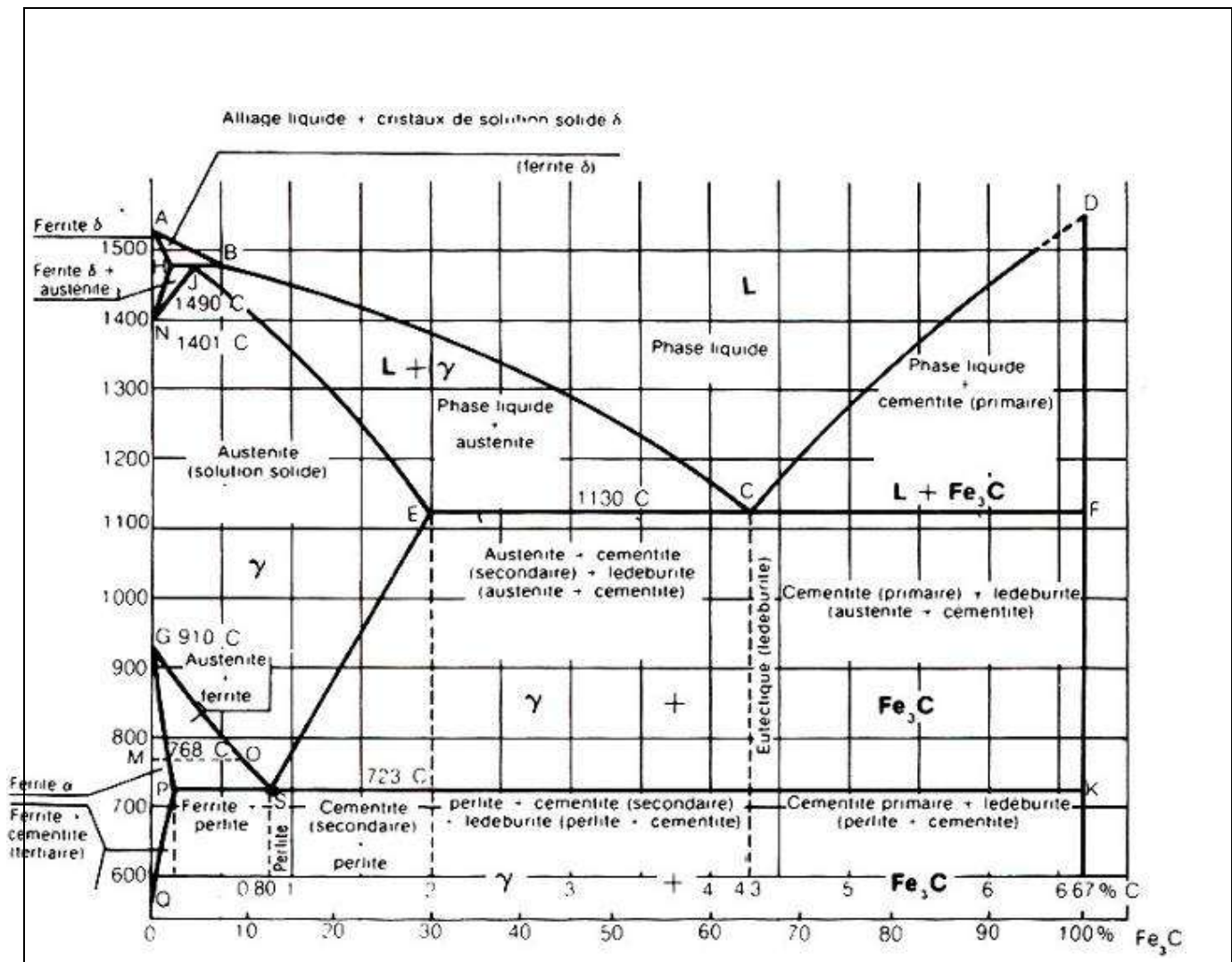




**Fer alpha**



**Le fer delta est stable de 1394°C à 1534°C**



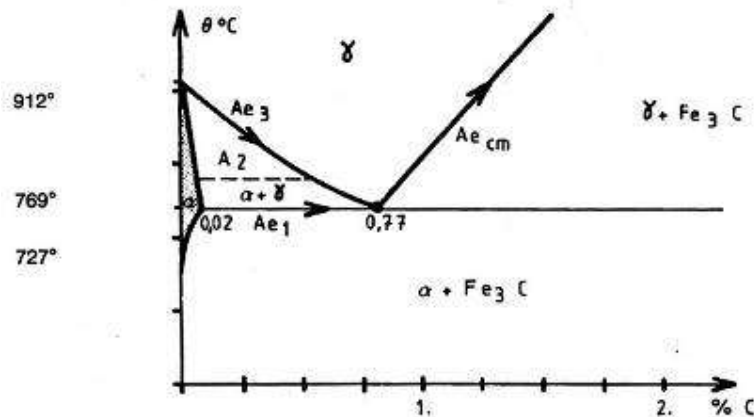
## Influence des points transformation sur la microstructure

L'exploitation du diagramme Fe. C permet d'étudier la constitution des aciers non alliés dans les conditions d'équilibre thermodynamique. Dès que les conditions de refroidissement ne sont plus suffisamment lentes, le facteur temps va jouer un rôle important.

L'étude complète de la cinématique des transformations sera entreprise lors de la présentation des courbes TTT et TRC.

Dans ce paragraphe, nous n'envisagerons que le cas où les vitesses de refroidissement ne sont pas suffisantes pour entraîner l'apparition de constituants de nature différente de ceux donnés par le diagramme d'équilibre.

### Points de transformation



**Ae1** : Température d'équilibre définissant la limite inférieure d'existence de l'austénite. Température de la transformation eutectoïde

**Ae3** : Température d'équilibre définissant la limite supérieure d'existence de la ferrite

**Acm** : Température d'équilibre définissant la limite supérieure d'existence de la cémentite dans un acier hypereutectoïde

**Ae4** : Température d'équilibre définissant la limite entre le domaine d'existence de l'austénite et de la **ferrite δ**. Ce point n'a d'importance que pour certains cas particuliers (soudage). Il n'est pas indiqué sur le schéma.

**A2** : Point relativement moins important pour les applications courantes point de CURIE



## Microstructures des Aciers

Le diagramme de phase permet de déterminer la nature des constituants susceptibles de se former : il ne permet en aucun cas de prévoir la morphologie qui définit la microstructure du métal. Cette microstructure qui dépend des conditions de germination et de croissance des diverses phases est essentiellement fixée par les conditions de refroidissement.

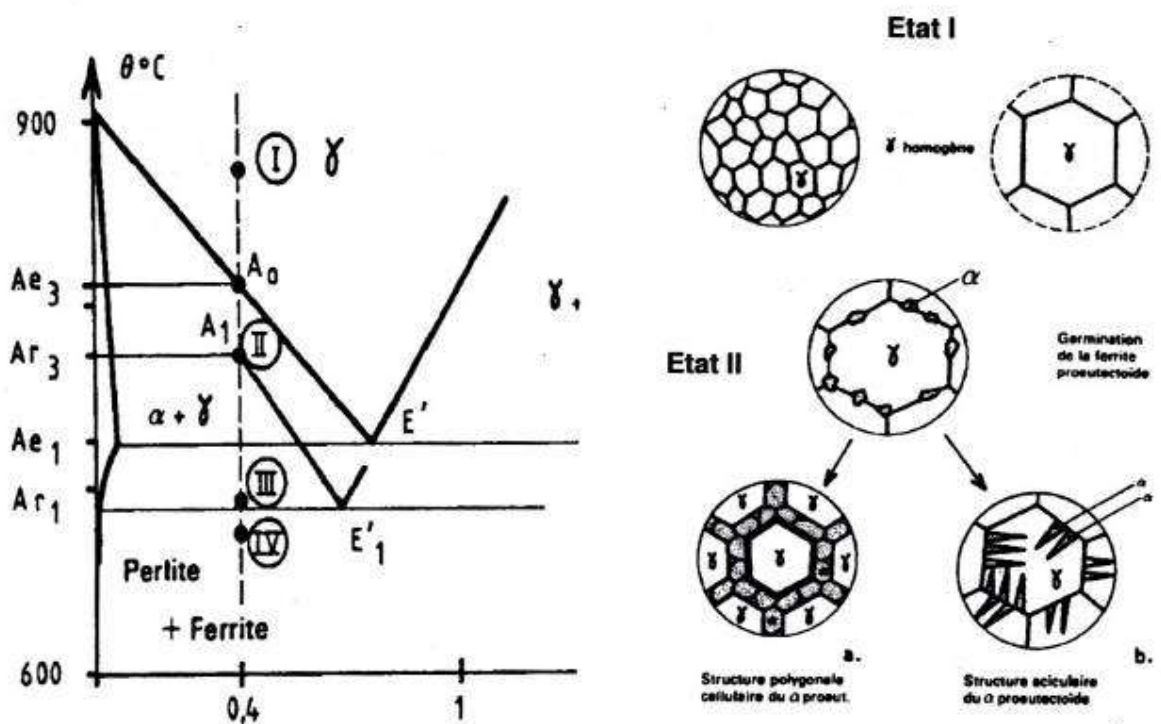
Nous nous contentons de commenter un exemple particulier afin de dégager quelques faits généraux.

En 1 dans le domaine austénitique la structure est caractérisée par une grosseur de grain  $\gamma$  déterminée par des conditions d'austénitisation données.

En 2 lorsque la température atteint  $AR_3$  ( $< AE_3$ ) caractéristique de la vitesse de refroidissement utilisée, la germination de la phase ferritique  $\alpha$  commence. Cette germination a lieu en général aux joints de grains austénitiques.

La croissance des cristaux de ferrite dépend de la vitesse de transfert de l'énergie thermique produite par la transformation  $\gamma \rightarrow \alpha$  et de la vitesse de diffusion du carbone, en excès par rapport à la limite de solubilité dans la ferrite.

### CAS D'UN ACIER A 0,4 % : ACIER HYPOEUTECTOIDE



Pour des vitesses de refroidissement faibles, et des grains austénitiques petits, les cristaux ferritiques pourront prendre la forme polygonale normale et conduire à une répartition cellulaire de la ferrite en a.

Pour des vitesses de refroidissement élevées et des grains austénitiques grossiers, les cristaux ferritiques se développent sous forme de plaquettes, donnant naissance à une répartition aciculaire ou de Widmanstätten en b. Les structures aciculaires sont caractéristiques des zones surchauffées, au voisinage des joints soudés et dans les aciers moulés bruts de moulage.

## 6. Désignation des fontes

### Fontes à graphite lamellaire

Après le préfixe EN les fontes à graphite lamellaire sont désignées par le symbole GJL suivi de la valeur en mégapascals de la résistance minimale à la rupture par extension.

Exemple : EN – GJL-100 (l'ancienne FGL 100)

FONTES À GRAPHITE LAMELLAIRE		
Numérique	Symbolique	Emplois
EN-JL 1010	EN-GJL-100	Bonne moulabilité – Bonne usinabilité
EN-JL 1020	EN-GJL-150	Bonne résistance à l'usure par frottement
EN-JL 1030	EN-GJL-200	Bon amortissement des vibrations
EN-JL 1040	EN-GJL-250	Bonnes caractéristiques mécaniques et frottantes – Bonne étanchéité (blocs moteurs, engrenages...)
EN-JL 1050	EN-GJL-300	
EN-JL 1060	EN-GJL-350	

### Fontes à graphite sphéroïdal

Après le préfixe EN les fontes à graphite sphéroïdal sont désignées par le symbole GJS suivi de la valeur en mégapascals de la résistance minimale à la rupture par extension et du pourcentage de l'allongement après rupture.

Exemple : EN – GJS- 400-18 (l'ancienne FGS 400-18)

FONTES À GRAPHITE SPHÉROÏDAL		
Numérique	Symbolique	Emplois
EN-JS 1010	EN-GJS-350-22	Bonne résilience. Très bonne usinabilité (vannes, vérins...)
EN-JS 1020	EN-GJS-400-18	
EN-JS 1030	EN-GJS-400-15	
EN-JS 1040	EN-GJS-450-10	
EN-JS 1050	EN-GJS-500-7	
EN-JS 1060	EN-GJS-600-3	Très bonnes caractéristiques mécaniques. Bonne résistance à l'usure. Bonnes qualités frottantes.
EN-JS 1070	EN-GJS-700-2	
EN-JS 1080	EN-GJS-800-2	
EN-JS 1090	EN-GJS-900-2	

Fontes malléables : Exemple : EN – GJMB- 450-6 (l'ancienne MB 450-6)

FONTES MALLÉABLES		
Numérique	Symbolique	Emplois
EN-JM 1010	EN-GJMW-350-4	Malléabilité améliorée (pièces complexes).
EN-JM 1030	EN-GJMW-400-5	
EN-JM 1040	EN-GJMW-450-7	
EN-JM 1050	EN-GJMW-550-4	Bonne résilience.
EN-JM 1110	EN-GJMB-300-6	Bonne usinabilité.
EN-JM 1130	EN-GJMB-350-10	Bon amortissement des vibrations.
EN-JM 1140	EN-GJMB-450-6	Très bonnes caractéristiques mécaniques.
EN-JM 1150	EN-GJMB-500-5	
EN-JM 1160	EN-GJMB-550-4	
EN-JM 1170	EN-GJMB-600-3	
EN-JM 1180	EN-GJMB-650-2	

## 7. Désignation des aciers

### Aciers d'usage général

La désignation commence par la lettre **S** pour les aciers d'usage général et par la lettre **E** pour les aciers de construction mécanique.

Le nombre qui suit indique la valeur minimale de la limite d'élasticité en mégapascals\*.

Exemple : **S 235**.

S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation est précédée de la lettre **G**.

Exemple : **GE 295**.

1 Mpa = 1 N/mm<sup>2</sup>

### Aciers non alliés

Teneur en manganèse < 1 %.

La désignation se compose de la lettre **C** suivie du pourcentage de la teneur moyenne en carbone multipliée par 100.

Exemple : **C 40**.

40 : 0,40 % de carbone.

S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation est précédée de la lettre **G**.

Exemple : **GC 25**.

### Aciers faiblement alliés

Teneur en manganèse > 1 %.

Teneur de chaque élément d'alliage < 5 %.

La désignation comprend dans l'ordre :

▷ un nombre entier, égal à cent fois le pourcentage de la teneur moyenne en carbone,

n un, ou plusieurs groupes de lettres, qui sont les symboles chimiques des éléments d'addition rangés dans l'ordre des teneurs décroissantes,

Facteur variable :

Nuance*	R min	Re min	Emplois
S 185 (A 33)	290	185	Constructions mécaniques et métalliques générales assemblées ou soudées.
S 235 (E 24)	340	235	
S 275 (E 28)	410	275	
S 355 (E 36)	490	355	
E 295 (A 50)	470	295	Les aciers ne conviennent pas aux traitements thermiques.
E 335 (A 60)	570	335	
E 360 (A 70)	670	360	
<b>MOULAGE</b>	GS 235 - GS 275 - GS 355 GE 595 - GE 335 - GE 360		
R min = résistance minimale à la rupture par extension (MPa). Re min = limite minimale apparente d'élasticité (MPa).			
* Entre parenthèses correspondance approximative avec l'ancienne symbolisation.			

Nuance*	R min	Re min	Emplois
C 22 (XC 18)	410	255	Constructions mécaniques.  Ces aciers conviennent aux traitements thermiques et au forgeage.
C 25 (XC 25)	460	285	
C 30 (XC 32)	510	315	
C 35 (XC 38)	570	335	
C 40 (XC 42)	620	355	
C 45 (XC 48)	660	375	
C 50 (XC 50)	700	395	
C 55 (XC 54)	730	420	
C 60 (XC 60)	HRC ≥ 57		
Cette symbolisation ne s'applique pas aux aciers de décolletage.			
* Entre parenthèses correspondance approximative avec l'ancienne symbolisation.			

▷ une suite de nombres, rangés dans le même ordre que les éléments d'alliage, et indiquant le pourcentage de la teneur moyenne de chaque élément.

Ces teneurs sont multipliées, par un **facteur variable**, en fonction des éléments d'alliage.

Exemple : **55 Cr 3** (0,55 % de carbone, 0,75 % de chrome).

Élément d'alliage	Facteur
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zn	10
Ce, H, P, S	100
B	1 000

Nuances d'aciers faiblement alliés (entre parenthèses, correspondance avec l'ancienne symbolisation).

Nuance*		R min	Re min
38 Cr 2	(38 C 2)	800	650
34 Cr 4	(32 C 4)	880	660
37 Cr 4	(38 C 4)	930	700
41 Cr 4	(42 C 4)	980	740
55 Cr 3	(55 C 3)	1 100	900
100 Cr 6	(100 C 6)	HRC $\cong$ 62	
25 Cr Mo 4	(25 CD 4)	880	700
35 Cr Mo 4	(34 CD 4)	980	770
42 Cr Mo 4	(42 CD 4)	1 080	850
16 Cr Ni 6	(16 NC 6)	800	650
17 Cr Ni Mo 6	(18 NCD 6)	1 130	880
30 Cr Ni Mo 8	(30 CND 8)	1 030	850
51 Cr V 4	(50 CV 4)	1 180	1 080
16 Mn Cr 5	(16 MC 5)	1 080	835
20 Mn Cr 5	(20 MC 5)	1 230	980
36 Ni Cr Mo 16	(35 NCD 16)	1 710	1 275
51 Si 7	(51 S 7)	1 000	830
60 Si Cr 7	(60 SC 7)	1 130	930

### Aciers fortement alliés

Teneur d'au moins un élément d'alliage) 5 %.

La désignation commence par la lettre **X** suivie de la même désignation que celle des aciers faiblement alliés, à l'exception des valeurs des teneurs qui sont des pourcentages réels.

Exemple : X 30 Cr 13 (0,30 % de carbone - 13 % de chrome).

R min = résistance minimale à la rupture par extension (MPa).

Re min = limite minimale apparente d'élasticité (MPa).

Nuances des aciers fortement alliés.

Nuance*		R min	Re min
X 4Cr Mo S18	(Z8 CF 17)	440	275
X 30Cr 13	(Z30C13)	HRC >51	
X 2Cr Ni 19-11	(Z3 CN 19-11)	460	175
X 5Cr Ni 8-10	(Z6 CN 18-09)	510	195
X 5Cr Ni Mo 17-12	(Z7 CND 17-12)	510	205
X 6CrNiTi 18-10	(Z6 CNT 18-11)	490	195
X 6CrNi Mo Ti 17-12	(Z6 CNDT 17-12)	540	215

## Classification d'aciers par emploi

Acier doux		Trempe dans la masse		Cémentation	
S 185	(A33)	C 35 E	(XC 38 H 1)	C 22	(XC 18)
S 235	(E 24)	C 40 E	(XC 42 H 1)	16 Mn Cr 5	(16 MC 5)
C 22	(XC 18)	C 45 E	(XC 48 H 1)	20 Mn Cr 5	(20 MC 5)
Acier mi-dur		C 55 E	(XC 54 H 1)	15 Cr Ni 6	(16 NC 6)
C 35	(XC 38)	Trempe superficielle		17 Cr Ni Mo 6	(18 NCD 6)
C 40	(XC 42)	C 40	(XC 42 TS)	Nitruration	
C 45	(XC 48)	41 Cr 4	(42 C4 TS)	31 Cr Mo 12	(30 CD 12)
C 50	(XC 50)	42 Cr Mo 4	(42 CD4 TS)	41 Cr Al Mo 7	(40 CAD 6-12)
Acier dur		Formage à froid		Inoxydable	
C 60	(XC 60)	S 185	(A 33)	X 4 Cr Mo S 18	(Z 8 CF 17)
37 Cr 4	(38 CD 4)	S 235	(E 24)	X 30 Cr 13	(Z 30 C 13)
34 Cr Mo 4	(34 CD 4)	S 275	(E 28)	X 2 Cr Ni 19-11	(Z 3 CN 19-11)
42 Cr Mo 4	(42 CD 4)	S 355	(E 36)	X 5 Cr Ni 18-10	(Z 6 CN 18-09)
36 Ni Cr Mo 16	(35 CND 16)	Décolletage		X 6 Cr Ni Mo Ti 17-12	(Z 6 CNDT 17-12)
51 Cr V 4	(50 CV 4)	S 250 Pb		Chocs	
Acier extra-dur		S 300		51 Cr V 4	(50 CV 4)
100 Cr 6	(100 C 6)	S 300 Pb		Fortes sollicitations	
Ressorts	(§ 46.21)	S 300 Si		36 Ni Cr Mo 16	(35 NCD 16)
Entre parenthèses correspondance approximative avec l'ancienne symbolisation.					

## DÉSIGNATION DES MATÉRIAUX NON FÉRREUX

### ALUMINIUM et alliages d'aluminium.

La désignation est composée des éléments suivants:

- le préfixe **EN** ;
- la lettre **A**, pour codifier l'aluminium;
- la lettre **W**, pour codifier la composition chimique.
- quatre chiffres pour codifier la composition chimique

Exemple : **EN AW - 2017**.

On peut aussi utiliser les symboles chimiques.

Normalement cette désignation est placée entre crochets à la suite de la désignation numérique.

Elle utilise les symboles chimiques des éléments suivi de nombres indiquant la pureté de l'aluminium ou la teneur nominale de l'élément considéré.

Exemples:

**ENAW-2017 [Al Cu4 Mg Si]**

**EN AW - 1350 [E Al 99,5]\***

\* Pour les applications électriques le symbole Al est précédé de la lettre E.

## CUIVRE et alliages de cuivre

La désignation du cuivre et de ses alliages comporte le symbole chimique du métal de base (Cu), éventuellement suivie de l'indice de pureté chimique, auquel on associe, dans le cas d'un alliage, les symboles chimiques des éléments d'addition suivis des nombres indiquant les teneurs nominales de ces éléments.

Exemple : Cu Zn 39 Pb 2 (alliage de cuivre -39 % de zinc -2 % de plomb).

Nuances usuelles	État	R min	Re min	Emplois
Cu Pb 1	Écroui	350	300	Utilisé en décolletage. Très haute conductibilité électrique et thermique.
Cu Sn 8 P (bronze)	4/4 dur	490	390	Matériau de frottement pour bagues, douilles, chemises, segments.
Cu Sn Pb Zn	Moulé	—	—	Pièces moulées sans caractéristiques particulières.
Cu Sn 7 Zn 5 Pb 4	Moulé	210	—	Robinetterie courante.
Cu Sn 12 Zn 1 P	Moulé	200	—	Construction mécanique. Robinetterie sous pression.
	Écroui	290	160	Pièces d'usure : pignons et roues d'engrenages, écrous.
Cu Be 2 (cuivre au béryllium)	Trempé-revenu	1 400	1350	Ressorts (matériels électriques, matériels résistant à la corrosion). Connecteurs.
Cu Zn 15 (laiton)	3/4 dur	400	—	Alliage de forgeage à froid, se polit bien et convient aux revêtements électrolytiques.

## LES PLASTIQUES

Pour l'utilisateur, les plastiques se classent en deux grandes catégories :

**les thermoplastiques** : soumis à l'action de la chaleur, ils arrivent à une phase pâteuse (ou une fusion); lors de la solidification, le matériau retrouve son état initial (comportement thermique comparable aux métaux) ;

**les thermodurcissables** : soumis à l'action de la chaleur, ils arrivent à une phase pâteuse (température d'injection dans le moule), puis ils subissent une transformation chimique interne irréversible qui durcit définitivement la matière (comportement thermique comparable à l'argile qui durcit sous l'action de la chaleur).

Principaux plastiques :

Les thermoplastiques :

PA 11	Polycamide type 11
PC	Polycarbonate
PE hd	Poléthylène haute densité
PE bd	Poléthylène basse densité
PTFE	Polytétrafluoréthylène
POM	Polyoxydiméthylène
PP	Polypropylène
PS	Polystyrène
PSB	Polystyrène résistant aux chocs
SAN	Polystyrène acrylonitrile
PVC U	Polychlorure de vinyle

Les thermodurcissables :

PF 21	Phénoplaste (Bakélite)
EP	Époxyde (Araldite)
UP	Poligester
PUR	Poluréthane

## 8. ÉLABORATION DE L'ACIER

1. L'élaboration de l'acier se fait:

- Soit à partir de la fonte liquide (fonte d'affinage): convertisseurs à l'oxygène
- Soit à partir de ferrailles par refusion au four électrique.

Afin de constituer un stock tampon entre les H.F. et l'aciérie dont les cadences de coulée sont très différentes on peut utiliser soit un mélangeur, soit un nombre suffisant de poches tonneaux. Le mélangeur homogénéise la composition de la fonte provenant des diverses coulées et conduit à une certaine désulfuration de la fonte. Cette désulfuration se fait par déplacement de l'équilibre:



(1) [ ] dissous dans la fonte, ( ) dissous dans le laitier.

Le sulfure de manganèse s'élimine soit par combustion soit par mise en solution dans la scorie.

La désulfuration peut être améliorée par les techniques de la métallurgie en poche: introduction de carbonate de sodium, de chaux vive (CaO) avec brassage, ou plus récemment de magnésium (procédé USIRMAG).

Le passage de la fonte liquide à l'acier nécessite une diminution des teneurs de pratiquement tous les éléments comme le montre la comparaison ci-dessous:

	% C	% Si	% Mn	% P	% S
Fontes:	3-4	0,5 à 2,5	1 à 2	2 à 0,1	0,05
Aciers:	0,05-1,5	0 à 0,5	0,3 à 1,5	< 0,05	< 0,05

Modes d'élimination des divers éléments

- Carbone: il s'élimine à l'état de CO<sub>2</sub> et surtout de CO; l'élimination de ces gaz est facile.
- Silicium: son oxydation conduit au dioxyde de silicium SiO<sub>2</sub>: cet oxyde acide se combine avec les oxydes basiques présents MnO, FeO et éventuellement CaO en donnant une scorie liquide qui monte à la surface du bain.
- Manganèse: son oxydation conduit à l'oxyde basique MnO qui se combine avec SiO<sub>2</sub>.
- Phosphore: son oxyde P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> est réductible par le carbone aux températures élevées réalisées. Cependant le phosphate de calcium est moins réductible par C que le pentoxyde. En présence de CaO et si on admet que FeO est le vecteur d'oxygène, la réaction s'écrira:



Le phosphate de calcium s'élimine dans la scorie. Donc une déphosphoration poussée exige un milieu très oxydant et très basique.

- Soufre: l'oxydation des sulfures MnS ou FeS étant très endothermique elle est peu probable aux températures élevées de conversion. L'élimination du soufre aura lieu selon:  $[\text{FeS}] + (\text{CaO}) \rightleftharpoons [\text{FeO}] + (\text{CaS}) \quad (1) \quad H > O.$

(1) [ ] dissous dans la fonte, ( ) dissous dans le laitier.

Elle sera favorisée par un milieu très réducteur (élimination de FeO) et très basique. Une élévation de température la favorisera également et fluidisera la scorie. Dans ces conditions on a intérêt à introduire une fonte de teneur en soufre aussi faible que possible: intérêt de la désulfuration en poche.



L'élaboration comprend en général deux phases distinctes:

- Phase d'oxydation: élimination de C, Si, Mn et du P avec action simultanée de CaO pour ce dernier;
- Phase de réduction: la phase précédente conduit à un métal très oxydé (riche en FeO) qu'il faudra réduire. En présence de CaO, il y aura simultanément désulfuration.

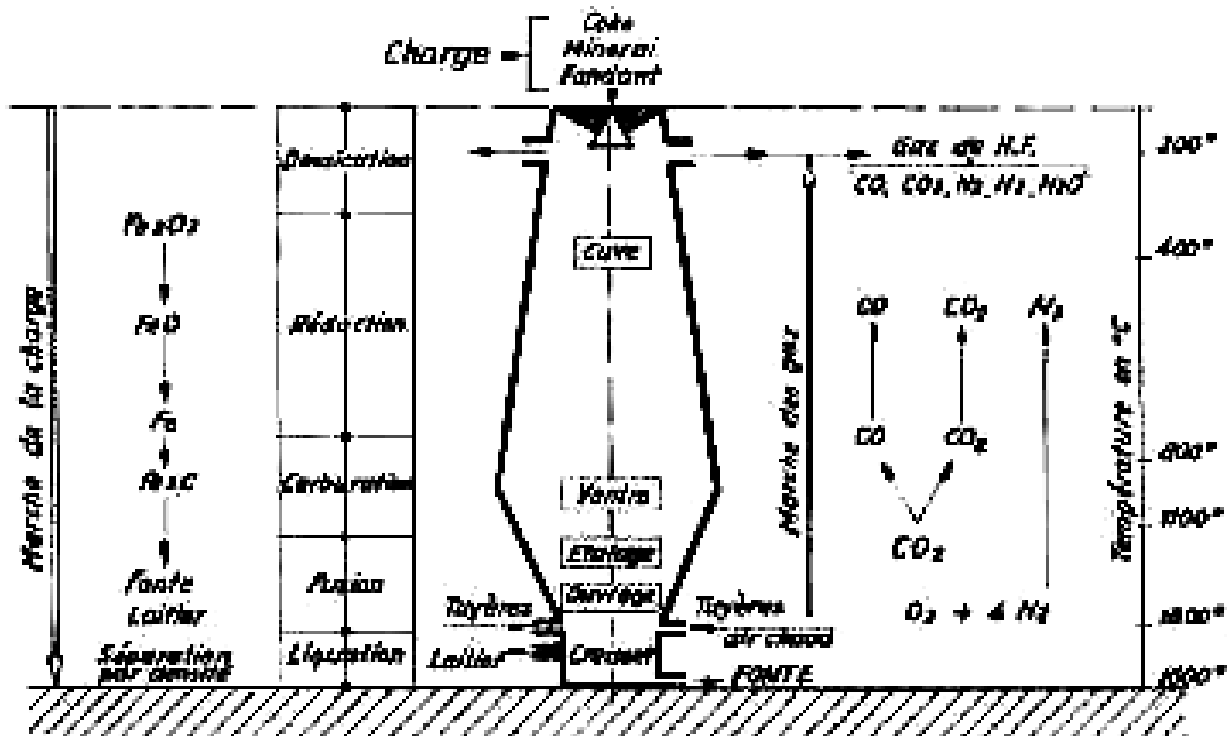


Fig. 94.  
Principales transformations de la charge dans le haut fourneau.

## 2. ACIER A L'OXYGÈNE

### 2.1. PRINCIPE ET CLASSIFICATION

Ce procédé, actuellement le plus répandu, est basé sur l'insufflation d'oxygène pur dans un bain de fonte liquide. On peut ainsi transformer celle-ci en acier liquide, en assurant simultanément l'élimination de C, Si, Mn, P et S et l'élévation de température nécessaire pour passer de la fonte liquide (1250 °C en moyenne) à l'acier liquide (1600 °C en moyenne). Le réglage de la température finale se fait par introduction de ferrailles à refondre.

Les appareils (convertisseurs) sont des cornues, garnies de réfractaires, atteignant 8 m de diamètre et jusqu'à 10 m de haut. Les convertisseurs sont en général immobiles au cours du soufflage et les divers procédés se distinguent par le mode d'insufflation de l'oxygène:

- Insufflation par des tuyères réfractaires placées dans le fond du convertisseur: procédés OBM (Oxygen Boden Maxhütte) et LWS (Loire-Wendel-Sidélor).

- Insufflation par le bec de la cornue à l'aide d'une lance métallique refroidie à l'eau: procédés LD (Linz-Donawitz) et son dérivé le procédé OLP (oxygène-lance-poudre) dans lequel de la poudre de chaux est introduite simultanément pour traiter les fontes très phosphoreuses.

### Remarque :

Une amélioration des procédés à lance consiste à brasser le bain par insufflation de gaz (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, N<sub>2</sub>) par le fond: procédé LBE (lance-brassage-équilibre), procédé STB (Sumimoto Top and Bottom blowing process).

## 2.2. DÉROULEMENT D'UNE OPÉRATION

Le procédé LD est adapté au traitement des fontes peu phosphoreuses ou hématites, le procédé OLP est adapté au traitement des fontes phosphoreuses.

- Procédé LD

La charge est constituée de fonte liquide et de ferrailles et d'une partie du CaO nécessaire.

Le soufflage d'oxygène au cours duquel le silicium s'élimine en premier dure environ 15 min. La décarburation et la déphosphoration ainsi qu'une partie de la désulfuration s'opèrent ensuite, le reste de la chaux étant progressivement ajouté en cours de soufflage. Le débit d'oxygène va de 500 à 1000 m<sup>3</sup> • min<sup>-1</sup>.

Un modèle mis au point par l'IRSID (CALDYN) permet le contrôle dynamique du soufflage en fin d'affinage et permet l'arrêt automatique de celui-ci lorsque la teneur en carbone du bain visée est atteinte: en effet une relation existe entre la vitesse de décarburation du bain et sa teneur en carbone. L'application de ce modèle exige la connaissance du débit des fumées (par venturi) et de leurs teneurs en CO et CO<sub>2</sub> (analyseurs).

Après l'arrêt du soufflage un échantillon est analysé ce qui permet de prévoir les additions à introduire pour atteindre une composition chimique déterminée. Ces additions ont lieu au convertisseur ou en poche lors de la coulée. Outre l'ajustement de composition ces additions ont pour but de désoxyder le bain, riche en FeO.

En effet la présence de FeO donne un produit inforgeable et un dégagement gazeux important de CO (réduction de FeO par C): aciers effervescents.

La désoxydation du bain se fait essentiellement par le manganèse introduit surtout sous forme de ferro-manganèse et selon:



L'oxyde de manganèse est insoluble dans l'acier, l'oxygène n'est en fait pas éliminé du bain, mais il est sous forme d'inclusions de MnO beaucoup moins nocives que FeO.

L'emploi de ferro-silicium ou l'addition d'aluminium à la coulée conduit à des aciers calmés. En particulier l'addition d'Al remplace MnO par Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parfaitement non réductible par le carbone: il ne peut donc y avoir dégagement gazeux lors du refroidissement.

- Procédé OLP

Il permet d'affiner des fontes contenant jusqu'à 2 % de P en insufflant de la chaux mélangée à l'oxygène. L'opération consiste en un premier soufflage, suivi d'un décrassage (élimination de la scorie riche en phosphore), puis un second soufflage pour parfaire déphosphoration et désulfuration. L'analyse du bain est suivie par l'addition finale et la coulée. La durée de coulée à coulée varie de 40 min à 60 min.

- Procédés OBM et LWS

Utilisant la même technique que l'ancien procédé Thomas on insuffle de l'oxygène pur par des tuyères réparties dans le fond du convertisseur. Afin d'éviter la détérioration du fond on injecte en même temps un hydrocarbure dont le craquage endothermique provoque un refroidissement suffisant (fluide modérateur) à la sortie même des tuyères, protégeant le fond d'une forte élévation de température.

Les procédés à l'oxygène permettent d'élaborer les nuances les plus variées d'aciers non alliés et peu alliés. Ils ont de faibles teneurs en P, S et surtout en azote (meilleure ductilité et résistance au vieillissement).

### **3. ACIER ÉLECTRIQUE**

#### **3.1. CARACTÉRISTIQUES ESSENTIELLES**

La filière de la refusion des ferrailles utilise un four à sole réfractaire sur laquelle sont placées les matières à refondre. L'énergie thermique est fournie par production d'arcs électriques entre trois électrodes et la charge. Naguère réservé à l'élaboration d'aciers spéciaux, le procédé électrique assure actuellement une part importante du tonnage des aciers courants. Il a, dans ce domaine, définitivement remplacé l'élaboration sur sole au four Martin. Le procédé électrique basique est le plus répandu, il est caractérisé par:

- Une haute température du bain (> 1 800°C) facilement réglable, ce qui facilite la fusion des laitiers très réfractaires et la réduction des oxydes.

- La non-intervention de l'atmosphère du four qui est neutre. Les réactions ont uniquement lieu entre le bain et les additions à l'aide desquelles on peut réaliser un milieu oxydant ou réducteur. On peut en outre réaliser la fusion d'éléments oxydables comme le Cr sans perte par formation d'oxydes.

#### **3.2. MARCHE D'UNE OPÉRATION**

Les fours d'une capacité de 5 à 250 tonnes sont alimentés sous des tensions de 100 à 200 V, l'intensité pouvant atteindre 50000 A par électrode. La sole et les parois latérales sont garnies de revêtements de dolomie (basique) qu'on réfectionne périodiquement. L'utilisation des parois refroidies à l'eau se généralise et permet, entre autres, d'augmenter la durée du revêtement et de réduire la consommation des électrodes. La marche comprend trois étapes:

a) Fusion: après chargement la fusion commence et dure quelques heures. Au cours de cette étape on ajoute la chaux qui sera nécessaire à la formation du laitier de déphosphoration. En fin de fusion on introduit du minerai de fer.

b) Oxydations et décarburage: l'oxyde de fer sert de vecteur oxygène pour l'élimination de Si, Mn, C. La déphosphoration peut être très poussée, des laitiers très calcaires pouvant être fondus. En fin d'opération le fer commence à s'oxyder. L'alimentation du four est arrêtée et on procède à un décarburage.

c) Réductions et additions. L'alimentation étant rétablie, on crée un laitier désoxydant et désulfurant par ajout de ferro-silicium, de chaux et de spath-fluor. On peut réaliser des laitiers Carbures (carbure de calcium) très réducteurs. Au four électrique désulfuration et désoxydation sont très poussées (S > 0,008%, O > 0,003%). Les additions finales sont ajoutées avant coulée.

Remarque: Le four électrique permet l'élaboration sous vide (four à induction sous vide, fours à électrodes consommables en acier). on obtient ainsi des aciers à teneurs minimales en N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> et de propreté très poussée (faible densité inclusionnaire). Ces aciers de très haute qualité sont caractérisés par une meilleure limite d'endurance, une valeur élevée de la résistance et une tenue au fluage améliorée. Leur coût est évidemment plus élevé que pour les aciers élaborés classiquement.

- Dans le cas d'élaboration des aciers inoxydables, on peut injecter de l'oxygène conduisant à une décarburation poussée nécessaire pour ces nuances.

#### **4. COULÉE DE L'ACIER**

La coulée de l'acier liquide, si on excepte les aciers moulés, s'opère selon deux techniques différentes.

- Coulée en lingotières qui reste prépondérante dans les pays de technologie sidérurgique peu développée (U.S.A., U.R.S.S.).

- Coulée continue qui est devenue prépondérante dans les pays de technologie sidérurgique développée (Japon, Allemagne [R.F.A.], Italie). La France est en position moyenne après ces derniers.

##### **4.1. LA COULÉE EN LINGOTIÈRE**

L'acier élaboré selon les procédés précédents est recueilli à l'état liquide dans des poches. Il est ensuite coulé et solidifié après un séjour dans la poche de 5 à 10 min (décantation).

Les lingotières sont en général en fonte. Leur forme préfigure celle des produits laminés à produire: lingots à section carrée pour les produits longs, à section méplate pour les produits plats.

La coulée se fait selon deux procédés:

- Coulée en chute: le métal est versé directement dans la lingotière.

- Coulée en source: le métal arrive par un canal en réfractaire par le bas de la lingotière. Cette technique donne des aciers de meilleure qualité mais est plus onéreuse.

Lorsque la solidification est suffisamment avancée le démoulage a lieu et les lingots sont acheminés dans des fours où la solidification s'achève; la température étant maintenue à 1250 °C, valeur optimale pour le laminage qui va suivre.

Les défauts principaux des lingots sont:

- L'hétérogénéité chimique inhérente au processus de solidification entraînant l'existence du phénomène de ségrégation majeure (à l'échelle du lingot) et qui concerne C, S, P, O. Le forgeage suivi ou non d'un recuit d'homogénéisation remédie partiellement à ce défaut.

- La retassure due au retrait de l'acier au cours du refroidissement. Ce phénomène concerne essentiellement les aciers calmés, alors que les aciers effervescents en sont exempts. On peut y remédier en chutant la partie supérieure où est localisée la poche de retassure, ou par masselottage, ou par compression. . Les soufflures: propres aux aciers effervescents, elles sont dues à des dégagements gazeux CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>. Elles sont aplaties par le forgeage mais leurs parois peuvent ne pas se souder.

L'emploi d'aciers semi-calmés permet de profiter des avantages des deux catégories (0,05 à 0,15 % Si).

- Les criques superficielles et les tapures internes dues à des anisotropies de retrait pouvant entraîner des dépassements locaux de la charge de rupture.

##### **Remarque:**

La coulée sous vide s'adapte parfaitement à la coulée en lingotière et permet d'abaisser les teneurs en H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, une forte désoxydation des effervescents par élimination de

CO ( $\text{FeO} + \text{C} > \text{CO} + \text{Fe}$ ) ainsi qu'une diminution de la densité inclusionnaire.

#### 4.2. LA COULÉE CONTINUE

La poche de coulée alimente directement un répartiteur qui alimente à son tour plusieurs lignes de coulée. Des systèmes divers (tourniquets) permettent de ne pas interrompre l'opération au changement de poche. Deux configurations sont utilisées comme le montre la figure 8 qui donne en même temps les divers organes successifs:

- Machines verticales
- Machines courbes avec cintrage à l'état solide ou partiellement solidifié.

Les machines verticales sont plus onéreuses et plus encombrantes. Cependant pour certains produits l'extraction sur cœur liquide peut conduire à des criques et des ségrégations. En outre sur machines courbes il y a décantation des inclusions à la partie supérieure des produits. Les machines verticales seront donc préférées pour les aciers de haute qualité.

La coulée continue conduit à une augmentation des cadences de coulée, à l'absence du phénomène de retassure. De plus elle supprime la première étape du laminage en donnant directement des billettes, des blooms ou des brames. L'automatisation est concevable pour ces installations.

Les aciéries françaises utilisent presque exclusivement pour leur production la coulée continue sur machines courbes, la voie lingots étant totalement supprimée

## Les processus de fabrication de demi-produits d'acier

L'acier liquide est élaboré à partir du minerai (filière fonte) ou à partir de ferrailles (filière électrique).

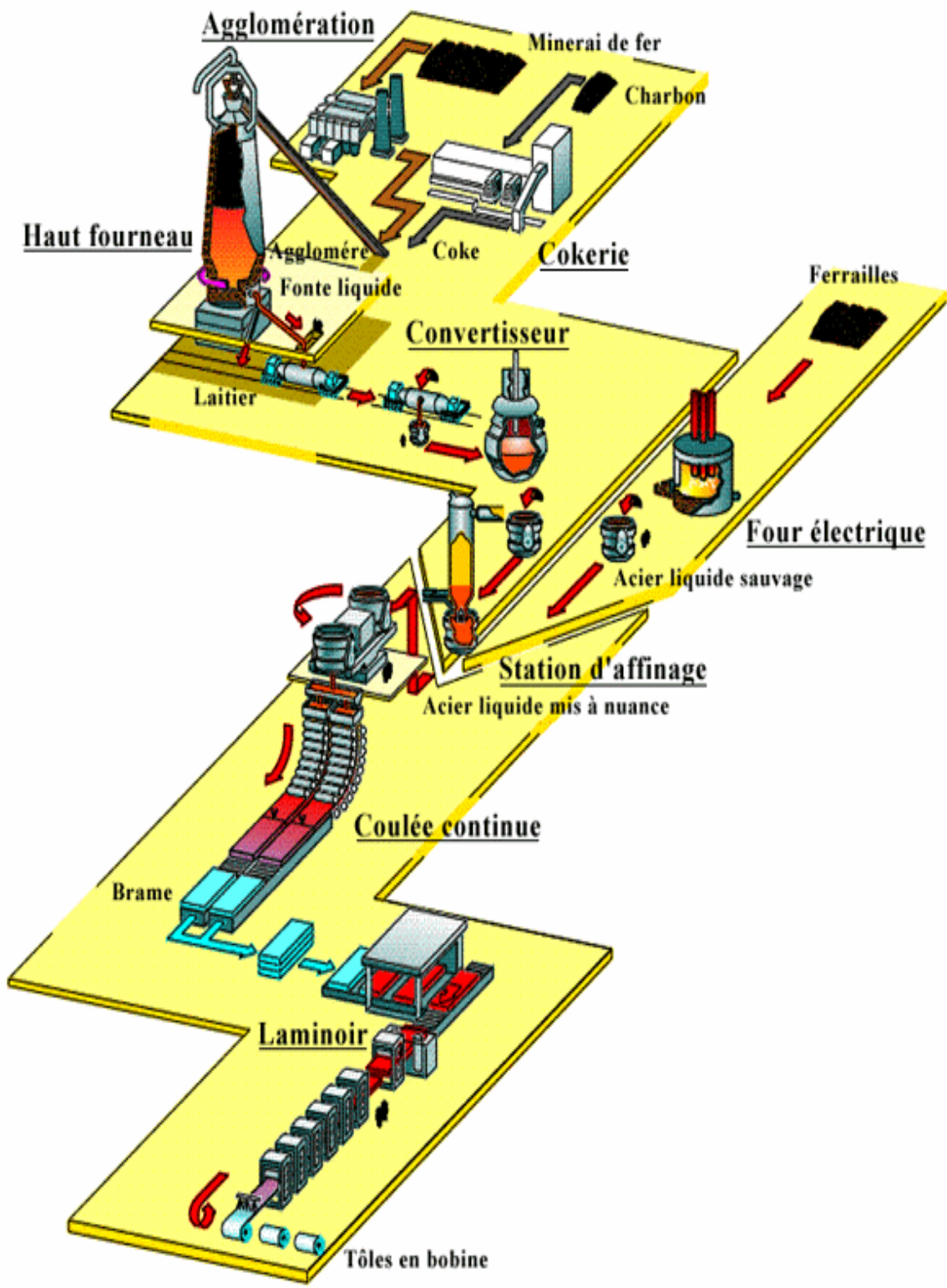
Ensuite, l'acier liquide est solidifié par moulage dans une machine de coulée continue.

A la sortie, on obtient les DEMI-PRODUITS : des barres de section rectangulaire (brames) ou carrée (blooms ou billettes), qui sont les ébauches des formes finales.

Enfin, les ébauches sont transformées en PRODUITS FINIS par laminage, dont certains subissent un traitement thermique. Plus de la moitié des tôles laminées à chaud sont relaminées à froid et éventuellement revêtues d'une protection anti-corrosion.

Tous les produits ne sont pas mis en forme par laminage :

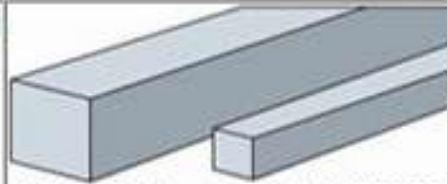
Ils peuvent être **forgés**, **moulés** à partir d'acier liquide ou encore fabriqués à l'aide de poudres d'alliages.



**DEMI-PRODUITS issus de la coulée continue**



BRAME



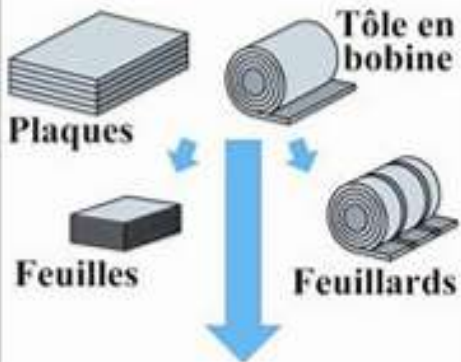
BLOOM

BILLETTE



**PRODUITS FINIS issus du laminage\***

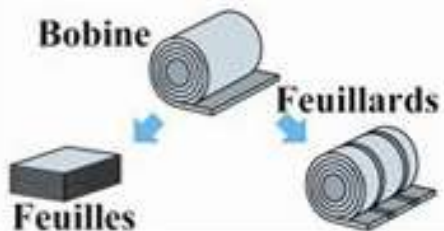
**PRODUITS PLATS LAMINES A CHAUD**



**PRODUITS LONGS LAMINES A CHAUD**



**RELAMINES A FROID**





## 9. LA MISE EN ŒUVRE

### 1. Formage à chaud

Une étape importante dans le formage à chaud est celle du réchauffage. La température de réchauffage ne doit pas seulement rendre le métal suffisamment malléable, mais elle conditionne aussi la structure métallurgique du produit. Lorsque l'on parle de formage à chaud, la déformation est entièrement réalisée dans le domaine austénitique. Autrement, on parle de formage tiède ou « à mi-chaud ». Un domaine de température qu'il faut éviter, c'est celui de la fragilité au bleu (200 à 350 °C) dans lequel les phénomènes de vieillissement dynamique après écrouissage réduisent sensiblement la ductilité de beaucoup d'aciers.

Dans le formage à chaud, le chauffage doit être suffisamment long pour que toute la pièce ait atteint la température désirée, mais pas trop long pour que le grain austénitique reste fin. Le réchauffage permet également de mettre en solution d'autres éléments que le carbone, notamment les éléments dispersoïdes (niobium, vanadium, titane). On peut alors contrôler leur précipitation pendant et surtout après la déformation pour optimiser les caractéristiques mécaniques obtenues après formage ou après traitement thermique ultérieur. Le chauffage doit d'autre part être effectué dans des conditions qui ne consomment pas trop de métal (formation de calamine) et ne produisent pas de décarburation à la surface des pièces.

Les principaux procédés de formage à chaud considérés ci-après sont le forgeage par estampage, le forgeage libre, l'emboutissage à chaud.

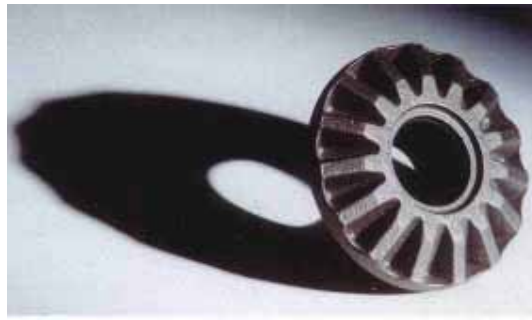
#### L'estampage et Le matriçage

**L'estampage** est un procédé qui permet de réaliser des pièces en acier en écrasant un lopin entre deux matrices reproduisant la forme recherchée, aux retouches d'usinage près.

**Le matriçage** est un procédé analogue à l'estampage, mais ce terme est plutôt réservé au formage des métaux non ferreux (aluminium, magnésium, cuivre et leurs alliages).

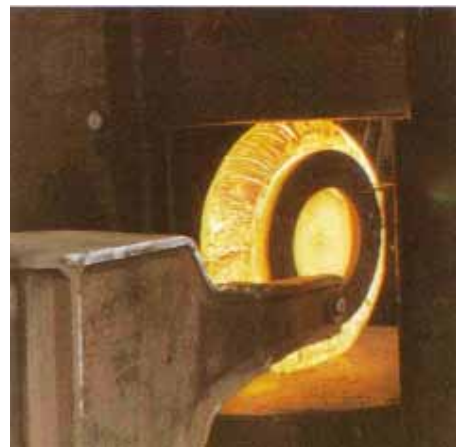
Suivant la dimension des pièces (ou des ébauches) fabriquées, on part de blooms, de billettes (laminées, parfois brutes de coulée continue), de ronds laminés (écroutés ou non). Ces produits sont découpés en lopins par sciage, cisailage à froid ou à chaud. Le cisailage à chaud est utilisé dans le cas de produits de fortes sections (barres ou billettes de plus de 60 mm) ou dans celui du forgeage sur machine automatique. Dans ce cas, l'opération de cisailage est intégrée à la séquence de forgeage et la température de cisailage est la même que celle du forgeage. Le cisailage est le procédé le plus courant dans le cas des produits de moins de 60 mm de dimension transversale.





## Le forgeage libre







## 2- LE MOULAGE

### 2.1- Moulage en moule non permanent :

#### 2.1.1- Principes :

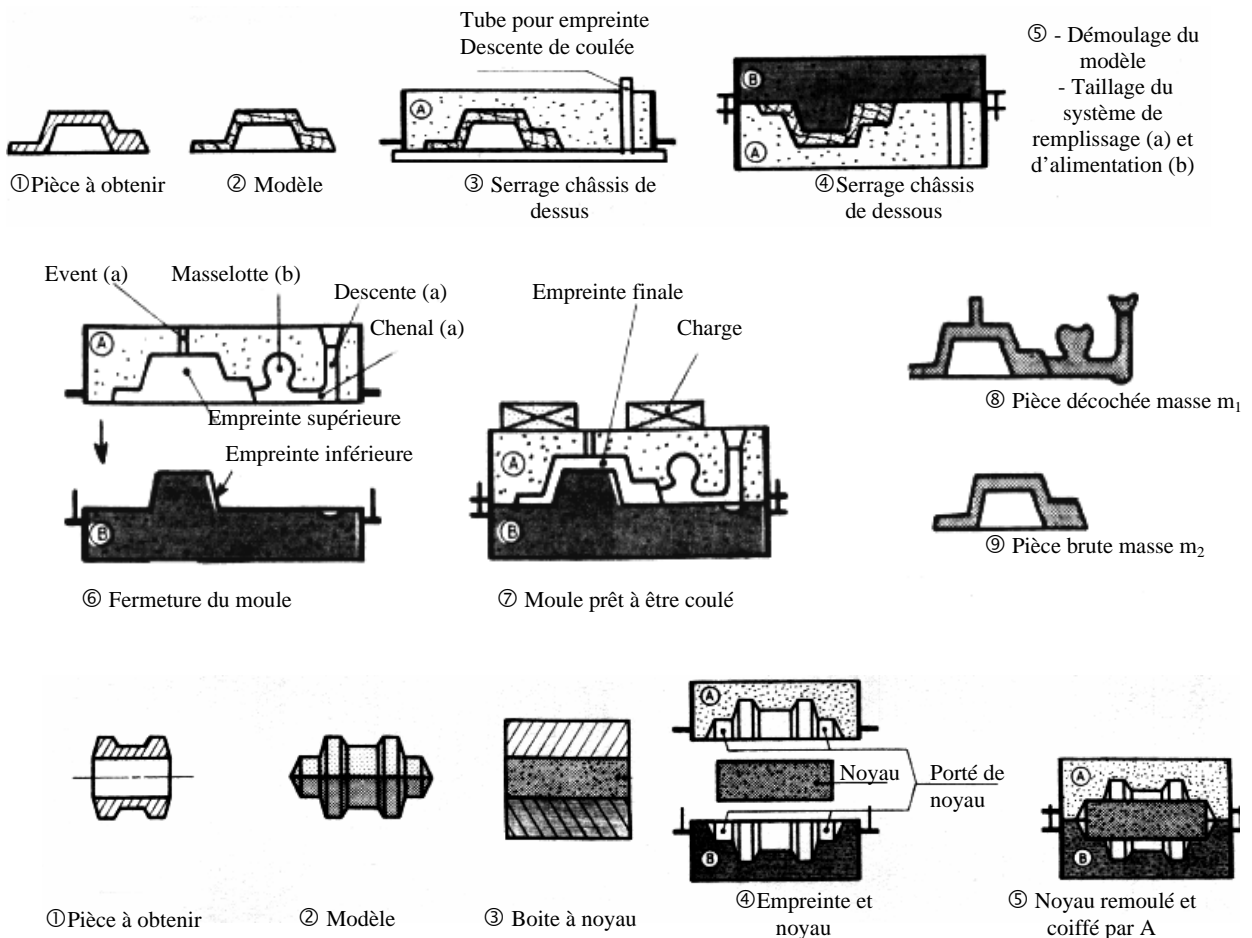
Le **moule non permanent** est une structure principalement réalisée en matériaux de moulage (**sable et châssis**), composée d'une ou de plusieurs parties et offrant après assemblage un évidement appelé *empreinte finale*.

Cette empreinte correspond à la pièce brute (en tenant compte du retrait) et aux systèmes de remplissage et d'alimentation. Après coulée de l'alliage. Cette structure est désagrégée (décochage) pour extraire la pièce brute. Chaque partie du moule correspondant à une forme de la pièce constitue une *empreinte partielle*.

- Une *empreinte* donne généralement les formes extérieures de la pièce.

$$\text{Mise au mille} = \frac{m_1}{m_2}$$

- Un *noyau* donne généralement les formes intérieures de la pièce.



## 2.1.2- Procédés particuliers :

### 2.1.2.1- Le moulage en carapace :

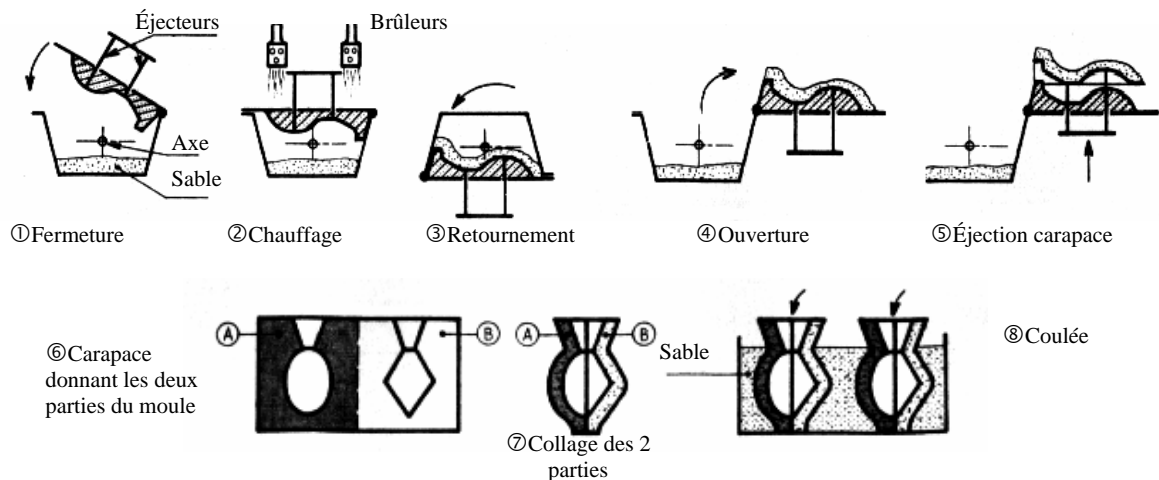
Connu sous le nom de *procédé Croning*, réalise des empreintes et des noyaux présentant la forme d'une carapace de 4 à 8 mm d'épaisseur.

Du sable siliceux préalablement enrobé de résines thermodurcissables est mis en contact d'un outillage chauffé à 300° environ.

L'agglomération du sable, par polymérisation, se propage dans l'épaisseur du sable.

Formation d'une croûte dont l'épaisseur dépend du temps de contact avec l'outillage (plaques modèles ou boîtes à noyaux).

Le choix d'un sable de faible granulométrie et d'un outillage très élaboré permet de réaliser des moulages de précision, de faible rugosité et de bonne précision dimensionnelle.

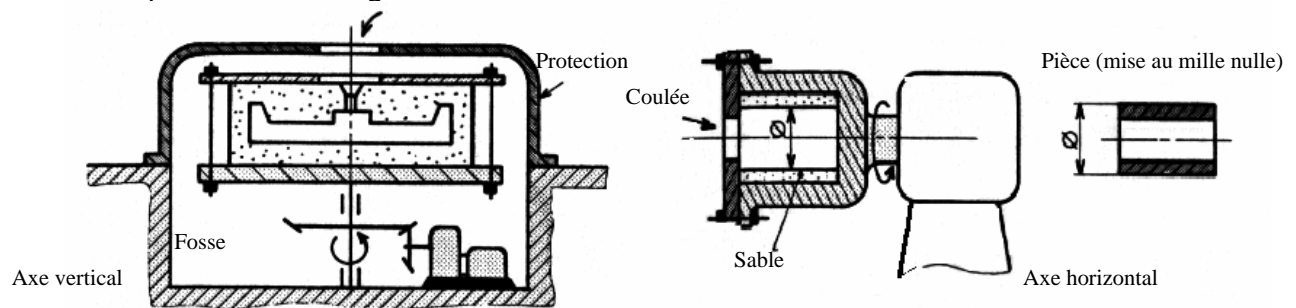


### 2.1.2.2- Le moulage par centrifugation :

Selon le type de pièce le moule est monté sur une machine à centrifuger d'axe horizontal, oblique ou vertical.

On applique à l'alliage une accélération centrifuge de plusieurs dizaines de g.

- Évite l'emploi de noyaux axiaux (bagues);
- Compacité de la pièce augmentée;
- Diminution de la mise au mille: diminution ou suppression des systèmes de remplissage et d'alimentation;
- Emploi de moules rigides.



### 2.1.2.3- Le moulage avec modèle non permanent :

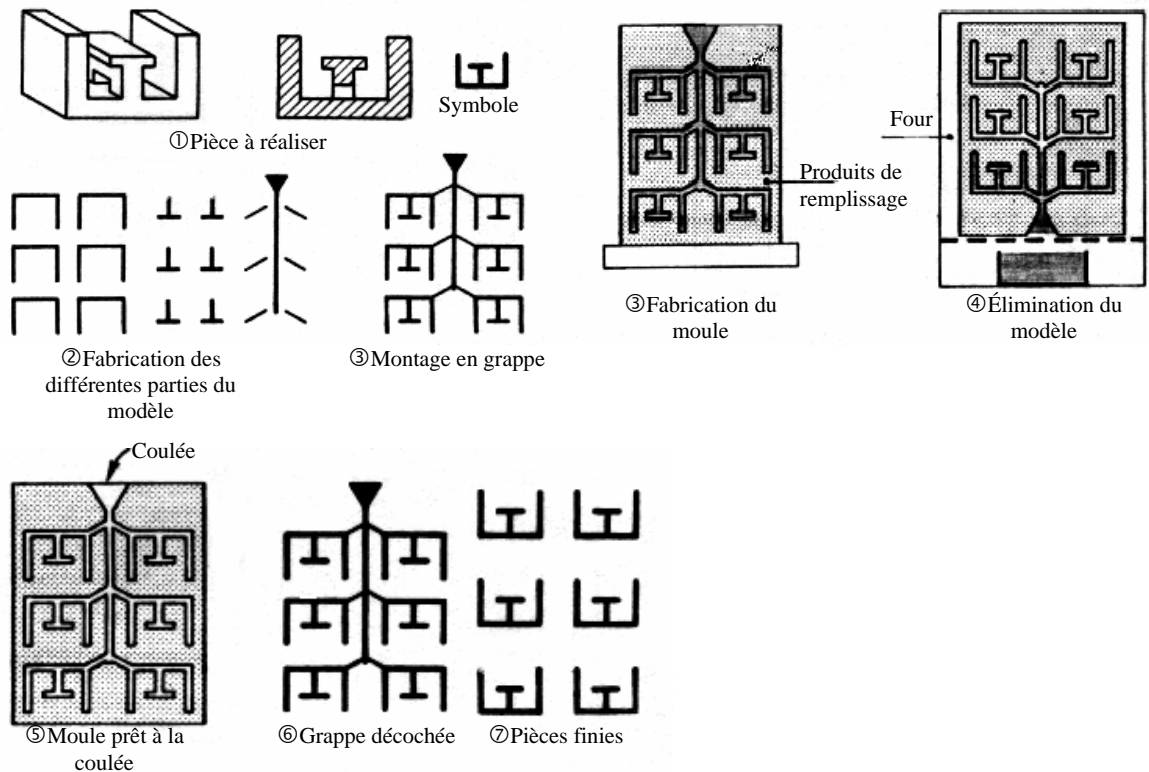
Le moule généralement en une partie est réalisé autour d'un modèle sans possibilité de démoulage.

Le modèle comporte la forme de la pièce ainsi que les systèmes de remplissage et d'alimentation. Le moule et le modèle sont détruits dans le cycle de fabrication de la pièce moulée.

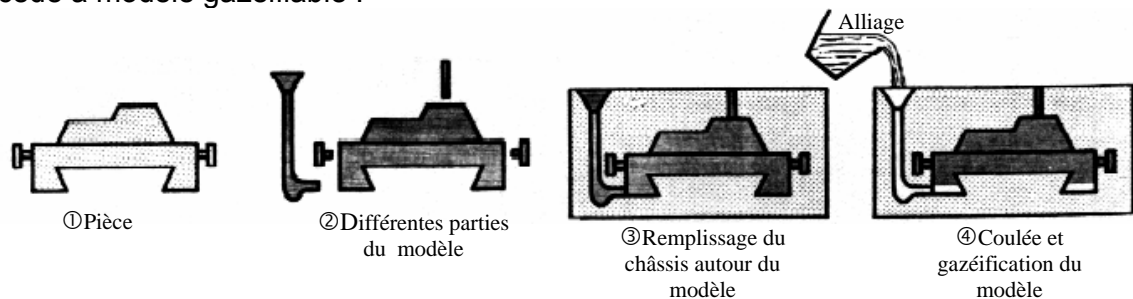
Conditions générales d'emploi :

- Si le coût d'un modèle permanent n'est pas justifié : prototypes, pièces unitaires.
- Pour la simplification du moule lorsque d'autres procédés de moulage nécessitent un grand nombre de parties.

Procédé à la cire perdue :



Procédé à modèle gazéifiable :



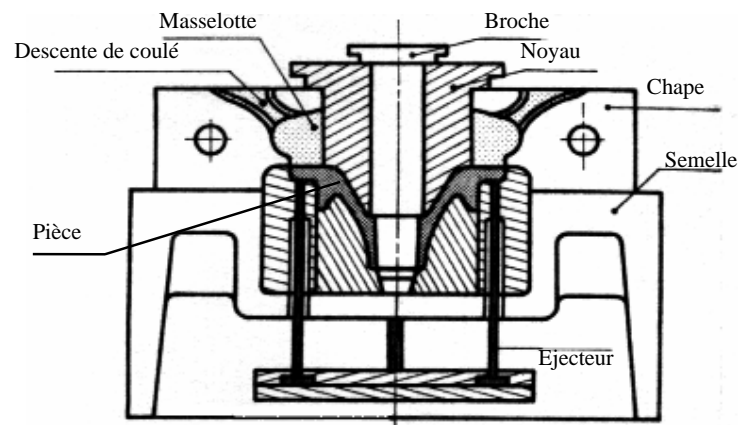
## 2.2. - Moulage en moule permanent :

Le moule permanent peut supporter plusieurs coulées successives avant sa mise hors service. Les opérations fondamentales que sont **le moulage** (obtention des formes), **le remplissage** en alliage liquide, **l'alimentation** de la pièce pendant la solidification, et enfin **le démoulage** de cette pièce sont assurés par le moule qui devra donc être mécanisé presque totalement. La répétition de ces opérations amène à parler de cycle de moulage et de cadence de production, ceci pour un moule déterminé.

Le remplissage et l'alimentation sont déterminés par la pesanteur, le moule étant appelé **coquille**, d'où la désignation courante de cette technique de moulage: *coulée en coquille, par gravité*.

➤ Ce procédé peut être utilisé avantageusement à partir d'une série minimale de 2000 pièces.

*Schéma d'une coquille (principaux éléments) :*



**Nota :** Il existe des machines à couler sous pression. L'appareillage nécessaire est complexe. Ce procédé n'est rentable qu'à partir d'une production de 10000 pièces.



## 10. TRAITEMENTS THERMIQUES des aciers

### 1. LA TREMPE

#### 1.1. GÉNÉRALITÉS

La trempe des aciers consiste en un chauffage dans le domaine austénitique, un maintien et un refroidissement suffisamment rapide pour éviter la formation des constituants d'équilibre. On obtient ainsi une phase hors d'équilibre : la martensite, qui donne la dureté maximale pour une nuance d'acier donnée. Pour aboutir à des constituants moins durs, on peut utiliser le réglage de la vitesse de refroidissement ou la trempe isotherme (ou étagée).

Les caractéristiques mécaniques de l'alliage sont modifiées :

- La dureté (H) augmente ,
- La résilience (K) diminue ,
- La résistance à la traction augmente ,
- L'allongement (A%) diminue ,

#### 1.2. EXEMPLE :

	Avant trempe		Après trempe à l'eau	
	Rm (en Mpa)	KCU (j/cm <sup>2</sup> )	Rm (en Mpa)	KCU (j/cm <sup>2</sup> )
Trempe d'une éprouvette en C 22	400	70	730	68
Trempe d'une éprouvette en C 35 E	700	70	1900	25

Aciers trempables contenant 0,22 et 0,35 % de Carbone

Note : Seuls les aciers (C) peuvent subir une trempe.

#### 1.3. TEMPÉRATURE D'AUSTÉNITISATION

La température d'austénitisation est fonction de la teneur en carbone de l'acier. Les aciers hypereutectoïdes doivent être chauffés à  $AC_3 + 50^\circ C$  environ, les aciers hypoeutectoïdes doivent être chauffés à  $AC_1 + 50^\circ C$ .

#### 1.4. TEMPS DE MAINTIEN

Le maintien à la température d'austénitisation doit être conduit jusqu'à l'achèvement des transformations de phases. Ce temps de maintien dépend, en particulier, de la composition chimique de l'acier, de la dimension et de la forme des pièces à traiter.

La détermination du temps est donc surtout une question d'expérience et un compromis.

## 1.5. REFROIDISSEMENT

En dehors des propriétés des aciers (conductivité thermique...) et de la configuration des pièces (masse, forme, état de surface), la vitesse de refroidissement dépend essentiellement du pouvoir refroidisseur du bain. Les modes de refroidissement sont très variés : air, brouillard, (air + eau), bains de sels fondus, bains d'huile, eau...

L'eau , pour les aciers contenant moins de 0,48% de carbone

L'huile , pour les aciers contenant plus de 0,48% de carbone

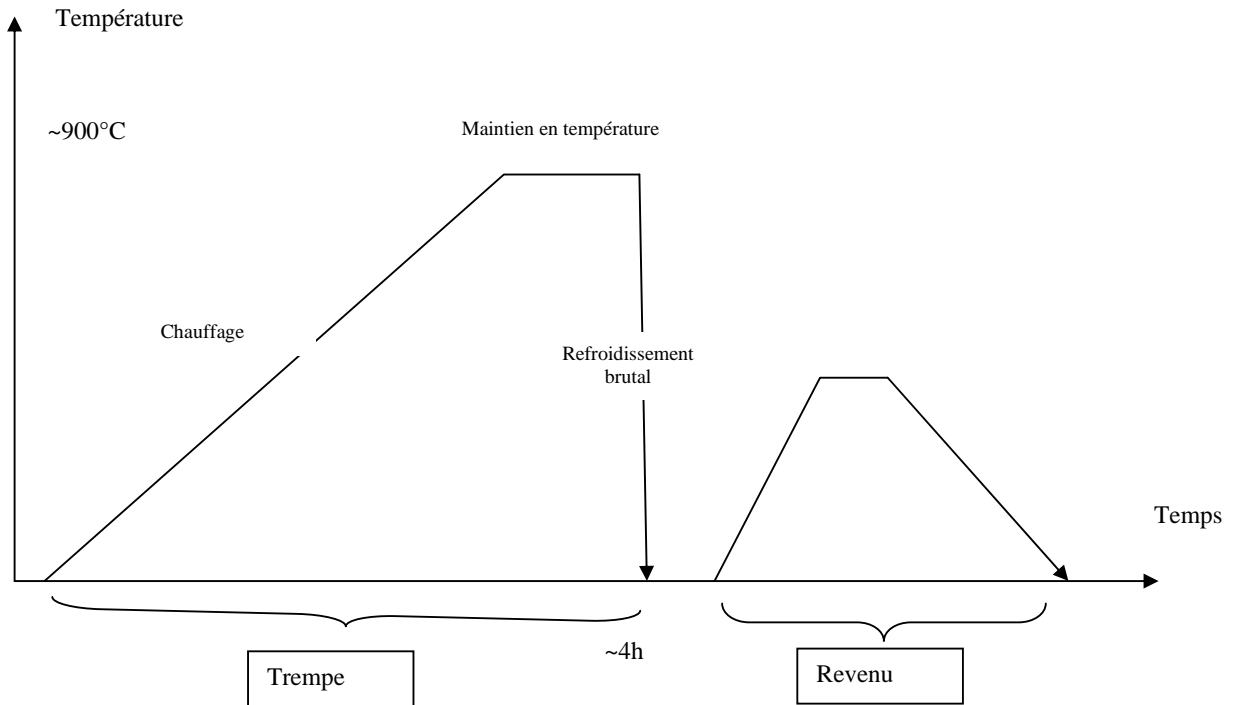


## 1.6. LES DÉFAUTS POSSIBLES OCCASIONNÉS PAR LA TREMPE

**Déformations** : qui proviennent généralement d'un chauffage non uniforme (dû à des inégalités de section de la pièce)

**Tapures** : caractérisées par une rupture du métal résultant des inégalités de température entre les différentes parties de la pièce (principalement aux changements brusques de section)

**Manque de dureté** : dû à une température de trempe trop basse.



## 2. LE REVENU DES ACIERS

### 2.1. DEFINITION

On appelle revenu le chauffage de l'acier trempé à une température inférieure à  $A_1$ , le maintien à cette température et le refroidissement ultérieur. Le revenu est une opération finale de traitement thermique. Son but est l'obtention des propriétés mécaniques requises.

De plus, il supprime partiellement ou totalement les contraintes internes dues à la trempe.

	HRC	KCu
C45 E avant trempe	16	70
C45 E trempé à l'eau	55	25
C45 E après revenu à $550^{\circ}$	32	35

## **2.2. DIFFÉRENTS TYPES DE REVENUS**

La température de revenu modifie sensiblement les propriétés obtenues, ce qui permet de distinguer trois types de revenu.

### **2.2.1. Revenu à basse température : 150° C à 200° C**

Ce revenu diminue les contraintes internes dues à la trempe, il améliore quelque peu la ductilité sans altérer sensiblement la dureté. C'est le traitement type des aciers à outils.

### **2.2.2. Revenu à température intermédiaire : 300° C à 500° C**

Il s'emploie pour des ressorts de types variés. Il permet d'obtenir une limite d'élasticité maximale et élève quelque peu la ductilité.

### **2.2.3. Revenu à haute température : 550° C à 700° C**

C'est le traitement type des aciers de construction. Il supprime presque totalement les contraintes internes et accroît nettement la résilience. Dans ces conditions, la résistance et la dureté diminuent mais restent encore beaucoup plus élevées qu'après recuit. C'est pourquoi, le revenu à haute température crée un meilleur rapport entre la résistance et la ductilité de l'acier.

## **2.3. MODE OPÉRATOIRE DU REVENU**

On place les pièces les pièces dans un four. On chauffe lentement.  
On refroidit brutalement (mais un peu moins brutalement que la trempe) dans :

- Dans l'huile
- Dans l'air

Voir courbe de température du revenu page précédente

### **3. LE RECUIT**

#### **3.1. DÉFINITION**

On appelle recuit tout traitement consistant à chauffer l'acier au-dessus de AC3, à maintenir la température atteinte pendant un temps suffisant, puis à refroidir lentement le métal jusqu'à l'ambiante.

#### **3.2. BUT**

- Supprimer ou diminuer les tensions internes résultant de l'obtention d'une pièce par moulage ou forgeage ou soudure
- Annuler les effets d'une trempe (pour refaire un usinage par exemple)

#### **3.3. DIFFÉRENTS TYPES DE RECUIT**

On distingue plusieurs sortes de recuits :

##### **3.3.1. Recuit d'homogénéisation**

C'est un recuit à haute température ( $\square A3 + 200^\circ C$ ) destiné à atténuer ou à faire disparaître les hétérogénéités de composition chimique. Il est suivi d'un refroidissement lent.

##### **3.3.2. Recuit de normalisation**

Il s'effectue à une température égale à  $A3 + 50^\circ C$  à  $100^\circ C$  suivi d'un refroidissement à l'air calme. Il a de multiples effets :

- Homogénéisation
- Affinage et régénération du grain
- Adoucissement
- Détensionnement (ou stabilisation)

##### **3.3.3. Recuit de globularisation (sphéroïdisation)**

Il s'obtient en faisant subir à l'acier des oscillations de température autour de A1. Il permet de transformer la perlite lamellaire en perlite globulaire présentant de bonnes caractéristiques, notamment une meilleure déformation à froid.

##### **3.3.4. Recuit d'adoucissement**

L'opération consiste à chauffer l'acier à une température quelque peu inférieure à A1, et après maintien, à le refroidir à l'air. Il a pour objet d'abaisser la dureté du métal et s'applique aux aciers au carbone destinés à l'usinage, l'emboutissage à froid et l'étirage.

### **3.4. REFROIDISSEMENT**

On refroidit très lentement (On laisse les pièces dans le four éteint)

## 11. Choix et utilisation des métaux

### Métaux ferreux

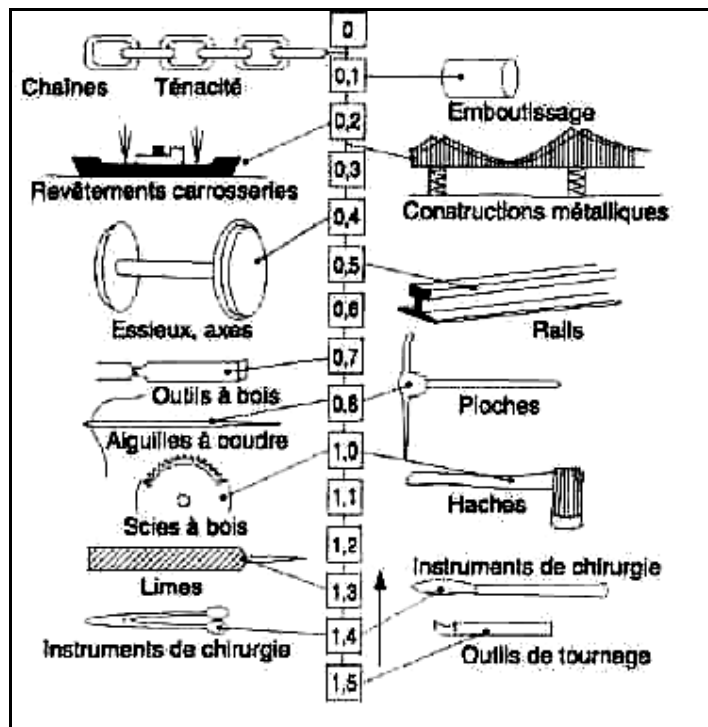
Métaux	Teneur en carbone (%)	Teneur en carbone
Fer	Moins de 0,06	La différence essentielle entre chaque type d'acier réside dans la proportion de carbone qu'il contient si le fer et le carbone sont alliés, dans la mesure où la teneur en carbone ne dépasse pas 1,5%, on obtient les aciers. Par contre, si l'alliage contient plus de 2% de carbone, on entre dans le groupe des fontes. Le carbone détermine la dureté et la ténacité des aciers. Plus un acier en contient, plus il est résistant. Cependant, il faut également tenir compte des procédés de production, des autres éléments d'alliage et de la nature du traitement thermique, lesquels contribuent à modifier certaines propriétés physiques des matériaux.
Acier doux	Entre 0,06 et 0,2	
Acier semi-dur	Entre 0,2 et 0,5	
Acier dur (acier à outils)	Entre 0,5 et 1,5	
Fonte	Plus de 2	

#### Aciers doux et semi-durs

Les aciers doux (à faible teneur en carbone) possèdent entre 0,06 et 0,2 % de carbone. Les aciers semi-durs (à moyenne teneur en carbone) en possèdent entre 0,2 et 0,5 %. D'autres éléments, tels que le silicium, le soufre, le manganèse et le phosphore, sont aussi présents dans l'acier en faible quantité. Voici leurs teneurs limites:

- silicium: 0,06 %;
- manganèse: 1,2 %;
- soufre: 0,06 %
- phosphore: 0,06 %.

## Applications des aciers au carbone selon leur teneur en carbone



### Aciers doux

L'acier doux est le métal le plus courant et le plus largement utilisé dans l'industrie de la transformation des métaux. Il sert à la fabrication d'une multitude de pièces, telles que les boulons, écrous, les rondelles, les articles en tôle. Il constitue environ 85% de la production de l'acier. Il est surtout choisi pour sa malléabilité à froid.

À cause de leur faible teneur en carbone, les aciers doux ne peuvent être trempés par traitement thermique. En revanche, ils peuvent être cémentés dans le but d'augmenter leur quantité en carbone en surface. C'est pour cette raison que l'acier doux est parfois appelé acier de cémentation. L'épaisseur de la couche cémentée est habituellement inférieure à 1,2 mm. Après la cémentation, les pièces peuvent être trempées afin de provoquer un durcissement structural en surface. Seule la surface pénétrée de carbone subira cette transformation. Cette formule est utilisée lorsque l'on désire une surface à la fois dure et résistante à l'usure et un noyau tenace.

### Aciers semi-durs

Les aciers semi-durs se trempent par traitement thermique, mais dans certains cas, on a recours à la cémentation. Ces aciers offrent une meilleure résistance à la traction. On s'en sert largement comme aciers d'usage général: estampage de clés, marteaux, tournevis, éléments préfabriqués, ressorts, pièces forgées, etc.

## Aciers alliés

La trempe d'un métal est souvent exécutée par chauffage puis refroidissement à l'eau. Avec des pièces minces ou de petites dimensions, cela ne pose aucun problème, car les aciers au carbone sont appropriés pour ce genre de traitement. Par contre, avec les pièces de plus grandes dimensions ou plus épaisses, le noyau se refroidit plus lentement que la périphérie lors du refroidissement de la pièce. La dureté est alors répartie de façon inégale. De plus, des variations dimensionnelles inégales sont à l'origine de tensions à l'intérieur des aciers au carbone. C'est pour éliminer ces inconvénients que l'on a développé les aciers alliés.

### Composition

Les propriétés particulières des aciers d'alliage sont déterminées par la quantité et les types d'éléments d'alliage qu'ils contiennent. Il faut préciser que le carbone n'est pas considéré comme un élément d'alliage. Les aciers au carbone n'entrent donc pas dans la catégorie des aciers alliés.

Par aciers alliés, on entend des aciers à teneur modérée en éléments d'alliage et qui exigent un traitement thermique pour acquérir les propriétés correspondant à l'usage auquel ils sont destinés. Les alliages sont habituellement employés dans le but d'obtenir des propriétés supérieures. Par exemple, les éléments d'alliage permettent d'obtenir :

- Une meilleure élasticité;
- Une dureté accrue;
- Une meilleure ténacité;
- Une température critique modifiée (température à laquelle le métal subit une perte de ses propriétés);
- Une résistance accrue à l'usure;
- Une meilleure aptitude à la trempe;
- Une meilleure résistance à l'oxydation.

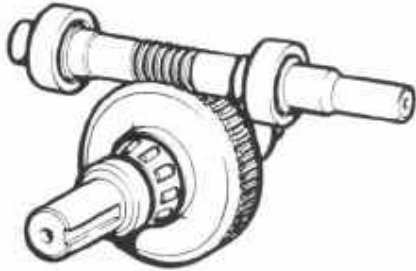
Les principaux types d'aciers alliés sont les suivants :

- Acier au nickel;
- Acier au chrome;
- Acier au nickel-chrome;
- Acier au nickel-chrome-molybdène;
- Acier au chrome-molybdène;
- Acier au manganèse-molybdène;
- Acier de nitruration (durcissement de la surface par absorption d'azote).

Le phosphore, le tungstène, le cobalt, le silicium, le vanadium et le soufre entrent parfois dans la composition des aciers alliés.



## Utilisation d'aciers alliés trempant a cœur (sandvick)



### Utilisations

L'utilisation des aciers alliés est reliée à leur degré de trempabilité et aussi à leur type, trempant à cœur ou de cémentation. Ces derniers, qui ne requièrent qu'une surface dure pour l'usage auquel ils sont destinés, servent à réaliser des pièces telles que des engrenages, des arbres, des ressorts et des essieux.

Les aciers de nitruration, qui entrent dans la catégorie des aciers de cémentation, sont utilisés pour la fabrication de pièces d'outils, de matrices, de moules, de boulons et de différentes pièces devant présenter une surface très dure, mais n'étant pas soumises à des efforts excessifs.

Les aciers trempant à cœur connaissent de très larges applications, mais on les choisit souvent lorsque la profondeur de trempé ou les propriétés mécaniques sont essentielles. Par exemple, on les utilise pour les pièces d'automobiles et d'avions et les dispositifs de fixation soumis à de durs efforts.

## Aciers alliés et application

Catégories d'aciers	Applications
<b>Aciers au nickel</b> nickel 3,50 % nickel 5,00 %	Vilebrequins, bielles, essieux
<b>Aciers au nickel-chrome</b> nickel 0,70 % chrome 0,70 % nickel 1,25 % chrome 0,60 % nickel 1,75 % chrome 1,00 % nickel 3,50 % chrome 1,50 %	Roues d'engrenages, chaînes, goujons, vis, arbres
<b>Aciers au molybdène</b> chrome-molybdène nickel-chrome-molybdène nickel 1,65 % molybdène 0,25 % nickel 3,25 % molybdène 0,25 %	Essieux, cames, pièces forgées
<b>Aciers au chrome</b> à faible teneur à moyenne teneur	Roulements à billes, bielles, ressorts

## Éléments d'alliage pour les aciers

Voici une description des effets de quelques éléments d'alliage sur les aciers.

### Carbone

Même si le carbone n'est pas considéré comme un élément d'alliage, il n'en constitue pas moins l'élément le plus important dans la composition d'un acier, puisque c'est lui qui en influence la dureté, l'aptitude à la trempe, la ténacité et la résistance à l'usure. Plus on approche de 0,85 % de carbone, plus l'acier est dur et présente une résistance à la traction élevée; par contre, sa ductilité et sa soudabilité sont amoindries. Au-delà de 0,85 % de carbone, l'ajout de carbone ne modifie pas sensiblement la dureté de l'acier, mais cela lui confère une meilleure résistance à l'usure.

### Manganèse

Quelle que soit la teneur en carbone de l'alliage, le manganèse en améliore la qualité et le fini de surface. De plus, il augmente la résistance et la ténacité de l'acier, tout en améliorant son aptitude à la trempe et sa résistance aux chocs. L'ajout de manganèse aux aciers servant à la cémentation les rend très résistants à l'usure.

### Chrome

Le chrome augmente la dureté, la résistance à la corrosion et à l'oxydation ainsi que la résistance aux chocs. En contrepartie, il diminue un peu la ductilité de l'acier. Le chrome est l'élément essentiel des aciers inoxydables.

### Nickel

Le nickel améliore la résistance à la traction et la ductilité de l'acier. Il résiste aux effets de la chaleur et de la corrosion.

### Phosphore

On trouve le phosphore en grande quantité dans les aciers d'usinage à décolletage (tournage) rapide ou à faible teneur en carbone, car il améliore les qualités d'usinage. Plus la proportion de phosphore augmente, moins l'alliage est résistant aux chocs. Par le fait même, sa ductilité s'en trouve réduite d'autant.

### Soufre

On ajoute du soufre pour améliorer l'usinabilité de l'alliage d'acier. Cependant, plus l'alliage contient de soufre, moins il est facile à souder.

### Silicium

La principale qualité du silicium est de servir de désoxydant lors de la fabrication des alliages d'acier. Il accroît la résistance à la dureté, mais à un moindre degré que le manganèse.

### Cuivre

Le cuivre réduit l'usinabilité par forgeage mais n'influence pas le soudage réalisé à l'arc électrique ou par procédé oxyacétylénique. Il améliore la résistance à la corrosion atmosphérique lorsqu'il est présent dans l'alliage dans une proportion supérieure à 0,15 %.

### Plomb

Le plomb améliore l'usinabilité de l'alliage dans lequel on le trouve.

### Éléments utilisés dans la fabrication des aciers

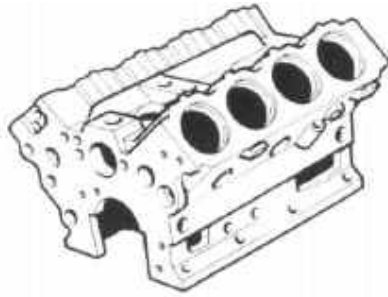
Éléments	Symbole chimique	Effets	Utilisations
Aluminium	Al	Décapant pour éliminer les impuretés et améliorer la grosseur du grain; limite le grossissement du grain.	Fabrication des aciers
Carbone	C	Augmente la dureté.	Aciers moulés à basse, moyenne ou haute teneur en carbone et aciers de construction.
Chrome	Cr	Augmente la dureté et améliore la résistance à l'usure sans fragilité augmente la ténacité et la résistance à la corrosion.	Aciers inoxydables, outils, turbines aciers de construction pièces de machines, récipients sous pression.
Cobalt	Co	Maintient la dureté du métal porté au rouge.	Fabrication de fourneaux, outils de coupe.
Cuivre	Cu	Augmente la résistance à la corrosion atmosphérique; abaisse la température critique.	Profilés.
Étain	Sn	Utilisé comme revêtement et pour empêcher la corrosion.	Industrie de mise en conserve.
Manganèse	Mn	Affine la structure; augmente la ténacité et la ductilité.	Rails, essieux, barillets d'armes à feu.
Molybdène	Mo	Durcit et augmente la ténacité des aciers.	Récipients sous pression, moulage pour applications sous pression, pièces de machines, outils.
Nickel	Ni	Résiste aux effets de la chaleur et à la corrosion; améliore la résistance à la traction.	Turbines forgeage industriel pour charpentes à haute résistance, aciers inoxydables, récipients sous pression, résistance à la corrosion.
Phosphore	P	Augmente la limite apparente d'élasticité et la trempabilité.	Aciers faiblement alliés.
Plomb	Pb	Améliore l'usinabilité ajoutée à l'étain, il est utilisé pour empêcher la corrosion.	Dans un milieu corrosif.

<b>Éléments</b>	<b>Symbole chimique</b>	<b>Effets</b>	<b>Utilisations</b>
<b>Silicium</b>	<b>Si</b>	Utilisé pour améliorer la résistance à la traction; agit comme désoxydant en général.	Moulage de précision aciers à aimants et pour équipement électrique.
<b>Soufre</b>	<b>S</b>	Améliore l'usinabilité.	Pièces usinées.
<b>Titane</b>	<b>Ti</b>	Agent nettoyant prévient la précipitation du carbone dans les aciers inoxydables.	Aciers inoxydables, aciers faiblement alliés.
<b>Tungstène</b>	<b>W</b>	Augmente la ténacité, la dureté ainsi que la résistance à l'usure à des températures élevées.	Aciers pour outils à coupe rapide, aimants.
<b>Vanadium</b>	<b>V</b>	Donne de la ténacité et de la résistance à la traction résiste à l'adoucissement lors de la trempe, retarde le grossissement du grain à la température critique.	Revêtement de l'acier (galvanisation).
<b>Zinc</b>	<b>Zn</b>	Résiste à la corrosion.	Fabrication des aciers, outils, pièces de machines.
<b>Zirconium</b>	<b>Zr</b>	Utilisé comme désoxydant élimine l'oxygène l'azote et les inclusions d'éléments non métalliques lorsque l'acier est en fusion; structure à grain fin.	Tubes de charpente.

## Fontes

En principe, la fonte est un alliage de fer et de carbone dont les propriétés peuvent être modifiées par l'ajout de petites quantités de silicium, de manganèse, de phosphore et de soufre. La fonte est présente sous toutes les formes de lingots, mais elle est principalement utilisée en fonderie, pour la fabrication de pièces moulées.

### Bloc-cylindres (Sandvik)



Grâce à sa teneur élevée en carbone (de 2 à 4 %), la fonte est particulièrement fluide à haute température et peut donc être coulée dans des moules. Toutefois, les alliages ferreux ayant une teneur en carbone comprise entre 1,8 et 2,5 % ne sont pas couramment utilisés. La fonte sert à fabriquer des pièces moulées telles que des pièces d'automobiles, de locomotives et d'équipement agricole.

La fonte résiste nettement mieux à la compression qu'à la traction. Par ailleurs, elle est relativement cassante. Les pièces en fonte comportent ordinairement des surfaces d'ajustage qui sont généralement les seules à nécessiter un usinage.

Les procédés de transformation permettent de raffiner la fonte brute en fonte grise, en fonte blanche, en fonte malléable, en fonte nodulaire et en fonte alliée.

### Fonte brute

La fonte brute n'a aucune utilisation pratique en raison de sa teneur élevée en carbone. Elle sert surtout à fabriquer d'autres types de fontes et des aciers.

### Fonte grise

On appelle fonte grise la fonte faite d'un mélange de fonte brute et de rebuts d'acier. Dans les entreprises, la fonte grise est la plus utilisée pour fabriquer des pièces coulées d'usage général lorsque les considérations de coût sont primordiales. Les surfaces exposées ont une coloration grise sombre à cause de la présence de graphite (carbone cristallisé).

Parmi les caractéristiques essentielles de la fonte grise, on note son aptitude à amortir les vibrations, grâce à sa teneur élevée en graphite, ainsi que sa résistance à l'usure. À l'aide d'un traitement thermique, on peut tremper la fonte grise afin d'augmenter sa dureté.

### Fonte blanche

La fonte blanche provient de la solidification de la fonte dans des moules en métal, un procédé communément appelé moulage en coquille. Avec cette technique, le refroidissement rapide de la fonte en surface confère aux pièces une surface extrêmement dure. La fonte blanche est donc très résistante à l'usure; cependant, elle est très cassante et fragile.

La fonte blanche n'est pas très utilisée, car il est difficile de la couler et de l'usiner. On l'emploie quand même dans des applications où sa dureté et sa résistance à l'abrasion

peuvent être exploitées, par exemple pour la fabrication de broyeurs, de cylindres, de dents de godets d'excavatrices, etc.

***La fonte blanche peut être adoucie par recuit (chauffage suivi d'un refroidissement lent).***

### **Fonte malléable**

La fonte malléable est habituellement de la fonte blanche recuite. Cette fonte est malléable comparativement à la fonte grise. Toutefois, son degré de malléabilité est loin d'atteindre celui du plomb. Cette fonte présente tout de même une certaine ténacité. La fonte malléable est utilisée pour des applications requérant de la résistance mécanique, de la ductilité, de la résistance aux chocs et de l'usinabilité. Il existe plusieurs types de fontes malléables, dont les propriétés sont assez différentes. La fonte malléable est utilisée couramment pour fabriquer des pièces telles que des engrenages, des bâtis, des joints de tuyauterie, etc. Certains types de fontes malléables ont des propriétés assez proches de celles de l'acier pour être utilisés dans les situations qui exigent un surcroît de résistance à l'usure.

### **Fonte nodulaire**

Dans la fonte nodulaire, aussi appelée fonte GS (graphite sphéroïdal), le graphite est présent sous forme de petites sphères (nodules), formées par l'addition de magnésium à la fonte avant la coulée. Cela améliore la résistance mécanique, la ténacité et la résistance aux chocs. La fonte nodulaire peut être soumise à des contraintes élevées. Elle peut également être soudée, ce qui la rend comparable à l'acier. Elle est supérieure à la fonte grise à de nombreux égards, sauf en ce qui concerne sa capacité d'amortissement et sa conductibilité thermique. Elle peut être adoucie par recuit ou trempée, partiellement ou intégralement, en coquille ou à l'eau. Parmi les utilisations typiques de la fonte nodulaire, on trouve les vilebrequins, les bâtis de machines, les pistons, etc.

### **Fonte alliée**

La fonte alliée contient des éléments d'alliage tels que le nickel, le chrome, le molybdène, le cuivre ou le manganèse en quantité suffisante pour améliorer certaines propriétés physiques. Habituellement, la teneur en alliage est de 3 % ou plus. Cette addition d'alliage peut améliorer:

- La résistance mécanique;
- La résistance à l'usure;
- La résistance à la corrosion;
- La résistance à la chaleur;
- La capacité d'amortissement des vibrations.

La plupart de ces propriétés sont radicalement différentes de celles des autres fontes. Aussi, la fonte alliée est-elle normalement produite par des fonderies spécialisées.

La fonte alliée est largement utilisée dans l'industrie automobile pour fabriquer des pièces telles que les cylindres, les pistons, les carters et les tambours. On s'en sert aussi pour diverses pièces de machines et divers outils ou d'autres éléments exposés à l'action d'agents abrasifs.

### Résumé

- Le Carbone joue un rôle essentiel dans les métaux ferreux. Il détermine la résistance mécanique et la dureté.
- Le fer possède moins de 0,06 et 0,2% de carbone, avec possibilité de cémentation.
- L'acier semi-dur possède entre 0,2 et 0,5% de carbone, avec possibilité de cémentation ou de trempe.
- L'acier à outils possède entre 0,5 et 1,5% de carbone et est trempable par traitement thermique.
- L'acier inoxydable possède plus de 12% de chrome.
- La fonte possède plus de 2% de carbone.
- Presque aucun alliage ferreux dont la teneur en carbone est comprise entre 1,8 et 2,5 % n'est couramment utilisé.
- Les aciers doux et semi-durs sont de loin les plus utilisés.
- Plus un acier est allié, meilleure est sa qualité.

## MÉTAUX NON FERREUX

Les deux métaux non ferreux les plus abondants dans le monde sont l'aluminium (si l'on considère l'écorce terrestre) et le magnésium (si l'on tient compte à la fois de l'écorce terrestre et des océans). Il existe un grand nombre de métaux dont l'élément principal n'est pas le fer, mais seulement quelques-uns sont employés dans des applications techniques. Les métaux non ferreux ont les propriétés communes de ne pas être attirés par un aimant et de résister à la corrosion.

Caractéristiques des métaux non ferreux usuels

Métal	Couleur	Densité	Point de fusion (°C)	Principales propriétés
<b>Aluminium (Al)</b>	Blanc brillant	2,7	660	Léger Ductile Malléable Bon conducteur Forme une couche d'oxyde d'aluminium
<b>Argent (Ag)</b>	Blanc brillant	10,5	950	Malléable Ductile Très bon conducteur
<b>Cuivre (Cu)</b>	Rouge brun	8,9	1083	Malléable Ductile Conducteur Forme une couche de vert-de-gris lorsqu'il est exposé à l'humidité
<b>Étain (Sn)</b>	Blanc	7,3	232	Malléable Ductile Très mou Faible résistance mécanique N'est pas touché par l'eau ou l'air
<b>Plomb (Pb)</b>	Gris bleuâtre	11,3	327	Malléable Ductile Mou Résiste à la corrosion Mauvais conducteur
<b>Magnésium (Mg)</b>	Blanc argenté	1,7	650	Malléable Ductile Résiste à la corrosion Peut brûler Faible résistance mécanique
<b>Nickel (Ni)</b>	Blanc grisâtre	8,9	1455	Malléable Ductile Résiste à la corrosion
<b>Zinc (Zn)</b>	Blanc bleuâtre	7,2	419	Cassant (à la température ambiante) Malléable (200 °C) Résiste à la corrosion
<b>Manganèse (Mn)</b>	Grisâtre	7,2	1245	Cassant Très dur Résistant S'oxyde facilement



## 1. Aluminium

### Procédé de transformation

La transformation de l'aluminium s'effectue en deux étapes principales:

- Fabrication de l'alumine;
- Transformation de l'aluminium par électrolyse.

La fabrication de l'alumine se fait à partir d'un minerai appelé bauxite. On concasse le minerai et on le sèche à 700 °C, puis on additionne de la soude caustique et on mélange le tout. Plusieurs réactions chimiques ont lieu avant et après la décantation et la dilution du mélange. On procède ensuite à la filtration, au lavage, puis à la calcination à 1300 °C, ce qui, par réaction chimique, donne l'alumine.

La transformation de l'alumine se compare à celle des aciers dans le four à arcs électriques. L'alumine fondue à haute température (1000 °C) par le courant des électrodes est décomposée en aluminium et en oxygène. L'oxygène est consommé par les anodes et dégage du monoxyde de carbone (CO). Finalement, on recueille l'aluminium périodiquement pour en faire des lingots ou des pièces directement moulées.

### Saviez-vous que...

#### Identification et propriétés

**L'aluminium est un métal trop réactif avec l'oxygène pour exister à l'état libre. Ce sont ses composés qui sont les plus répandus. Les plus connus sont le mica et l'argile. On trouve aussi de l'oxyde d'aluminium dans la nature sous forme de rubis, d'émeraudes, de saphirs et de topazes. Ces pierres précieuses contiennent de petites quantités d'oxyde de chrome, de titane, de manganèse et de fer qui leur donnent leurs couleurs particulières. On fabrique des rubis artificiels en ajoutant de l'oxyde de chrome à de l'oxyde d'aluminium en fusion, tandis que l'ajout d'oxyde de cobalt donne des saphirs bleus. Ces pierres artificielles sont souvent mieux formées que les pierres naturelles.**

L'aluminium est un métal blanc tirant légèrement sur le bleu, dont on obtient facilement un beau fini poli. Il est aussi léger (trois fois plus que le fer) et très malléable. Il conduit la chaleur trois fois mieux que l'acier, mais sa conductivité décroît plus rapidement lorsque la température augmente.

L'aluminium vient au second rang des métaux les plus employés après l'acier. Il est léger, robuste, facile à usiner, souvent économique et il résiste à la corrosion. tout comme l'acier inoxydable, dès l'instant où l'aluminium est exposé à l'air, sa surface se recouvre d'une pellicule transparente qui le protège contre toute forme de corrosion. L'aluminium n'est pas magnétique, il est bon conducteur de chaleur et d'électricité.

### 1.1. Alliages d'aluminium

L'usage de l'aluminium pur n'est pas aussi répandu que celui des ses alliages. Les utilisations de l'aluminium pur sont très spécialisées et limitées à certaines industries: emballage et conditionnement des aliments, fabrication de réflecteurs de chaleur ou de lumière, etc. De plus, il ne se coule pas aussi bien à l'état pur que lorsqu'il est allié, et son usinage pose quelques problèmes en raison de sa malléabilité.

Les alliages d'aluminium offrent une résistance très variée. Leur limite d'élasticité peut varier entre 5000 et 7000 lb/po<sup>2</sup> selon l'alliage.

## Magnésium

Les alliages d'aluminium-magnésium peuvent être forgés ou coulés, mais ils ne peuvent subir de traitement thermique, à moins qu'ils ne s'agisse d'alliages coulés et qu'ils contiennent plus de 10 % de magnésium. Modérément tenaces et résistants à la corrosion, les alliages forgés sont utilisés dans la construction navale, pour les tubes d'usage général, les pièces de tôlerie, les structures soudées, etc. Les alliages coulés sont utilisés pour fabriquer des réservoirs et des récipients, des composants d'avions et de bateaux ainsi que des pièces d'architecture.

## Duralumin

Le duralumin est un alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, de manganèse, de silicium et de fer. Très léger, il durcit par vieillissement (durcissement graduel à la température ambiante). Comme il résiste bien à la corrosion, le duralumin est idéal dans les domaines de l'aviation et de l'automobile.

## Manganèse

Les alliages d'aluminium-manganèse peuvent être durcis uniquement par travail à froid (forgeage). La plupart de ces alliages se prêtent bien au formage et au soudage. On utilise ce type d'alliages essentiellement pour les ouvrages structuraux, les tôles, les récipients, etc.

## Zinc

Les alliages d'aluminium-zinc contiennent, en plus du zinc, d'autres éléments comme le cuivre et le magnésium. On obtient ainsi certains alliages d'aluminium parmi les plus robustes. Le durcissement se fait par vieillissement. Ces alliages sont principalement employés dans l'industrie aérospatiale pour les structures d'avions et pour des pièces soumises à des contraintes élevées.

## Silicium



Les alliages d'aluminium-silicium sont très faciles à couper, ce qui permet de réaliser des formes complexes et des pièces à parois minces. On les trouve surtout dans l'industrie automobile: corps de carburateurs, pistons de moteurs, blocs-cylindres, etc. De plus en plus de pièces sont coulées à partir d'alliages d'aluminium en raison de la légèreté de ce métal.

## Silicium-magnésium

Les alliages d'aluminium-silicium-magnésium peuvent être soumis à un traitement thermique et ont une extrême résistance à la corrosion. Certains alliages sont employés en général pour la fabrication de boîtes, de petites embarcations, de garde-fous de ponts, de carters, etc.

## Magnésium

Le magnésium est produit en grande quantité à partir de l'eau de mer. Il s'agit d'un métal blanc argenté très léger qui ressemble à l'aluminium. Cependant, il s'oxyde facilement et sa surface se couvre alors d'une pellicule grisâtre. Il est modérément résistant aux produits chimiques tels que les acides, l'alcool, le phénol, les hydrocarbures, les huiles, etc. Il risque de s'enflammer lorsqu'il est chauffé à l'air libre. Il n'est donc pas facilement soudable, sauf s'il est allié à du manganèse ou de l'aluminium.

Le magnésium est employé comme désoxydant pour le laiton, le bronze, le nickel et l'argent. En raison de sa légèreté, on l'utilise pour fabriquer des pièces d'avions. Les alliages de magnésium se retrouvent, par exemple, dans les machines à coudre et les machines à écrire.

## 2. Cuivre

Le cuivre est vendu sous les mêmes formes que les aciers. Très ductile et malléable, on peut aussi l'obtenir sous forme de fils, de tôles, de tubes, de forgeages et de pièces moulées.

### **Identification et propriétés**

Le cuivre est un métal brun tirant légèrement sur le rouge. Il permet d'obtenir facilement un beau fini poli. Il est assez léger.

Le cuivre vient au troisième rang des métaux les plus utilisés après l'acier et l'aluminium. C'est le premier métal à avoir été utilisé par l'être humain. Ses propriétés sont multiples, mais il se distingue surtout par sa bonne conductibilité électrique. Le cuivre est facile à mettre en forme. Il possède une grande résistance aux intempéries et de bonnes caractéristiques mécaniques. Le cuivre ternit mais ne rouille pas. Il possède néanmoins une faible résistance à certains acides. Une pellicule adhérente se forme sur les alliages de cuivre, les protégeant ainsi contre la corrosion. Tout comme l'aluminium, les alliages sont plus résistants que le métal pur.

Le cuivre à l'état pur est utilisé pour fabriquer des fils électriques, de l'appareillage de communication, de la tuyauterie, des toitures, etc. Lorsqu'il est à l'état pur, il se couvre d'une couche d'hydrocarbonate (vert-de-gris) au contact de l'air humide chargé de gaz carbonique.

## Laiton

### Identification et propriétés

On reconnaît facilement le laiton à sa couleur passant du rouge cuivré, pour les alliages riches en cuivre, jusqu'au jaune pour les alliages qui contiennent un peu plus de 36 % de zinc, comme c'est le cas des alliages les plus souvent utilisés dans les ateliers d'usinage. On peut facilement obtenir un beau fini lisse.

Le laiton est un alliage de cuivre et de zinc dont la teneur en zinc peut excéder 50 %. Chaque type de laiton présente des caractéristiques particulières. On apporte d'importantes modifications à ces alliages en ajoutant, en faible quantité, des éléments comme le plomb, l'aluminium, l'étain, le fer, le manganèse, le nickel et le silicium. Le laiton possède une bonne résistance à la corrosion et aux contraintes mécaniques, ainsi qu'une ductilité et une malléabilité assez élevées, mais moindres que celles du cuivre et de l'aluminium purs.

Les qualités du laiton font en sorte qu'il peut servir à la fabrication d'accessoires électriques, de raccords, de rivets, de tuyaux, de pièces embouties, de tubes et de tôles. On choisit le laiton à grande ténacité pour les pièces de structures nécessitant une grande résistance.

Le laiton jaune est utilisé dans la fabrication de conduits (radiateurs, systèmes de climatisation, bornes d'accumulateurs, etc.) et de différentes petites pièces coulées. Cet alliage est utilisé lorsqu'on doit obtenir des pièces qui s'usinent bien à faible coût.

Le laiton rouge est utilisé dans la fabrication de couronnes mobiles et de pompes centrifuges, d'accessoires sur les conduites à essence et de transport d'huile, de petits coussinets, etc. Ce laiton est classé dans la catégorie des laitons à décolletage rapide. Il possède d'excellentes propriétés au regard du moulage et de la qualité du fini de surface.

## Bronze

Il y a quelques années, seuls les alliages de **cuivre-étain** étaient considérés comme du **bronze**. Avec le temps et l'exigence d'autres propriétés, la définition du bronze s'est un peu élargie. Les bronzes contiennent d'autres éléments d'addition principaux comme l'aluminium, le plomb, le nickel, le manganèse, etc., et ce terme s'applique aujourd'hui à n'importe quel alliage de cuivre autre que l'alliage de **cuivre-zinc (laiton)**. La couleur des bronzes varie du rouge au jaune, suivant la composition des alliages. Les bronzes sont identifiés selon l'élément principal ajouté au cuivre.

## Alliages de cuivre



### Cuivre-étain

Très peu utilisés, ces alliages sont souvent remplacés par d'autres alliages plus performants. Les bronzes de ce type sont surtout utilisés là où la résistance à la corrosion est importante, comme pour l'équipement marin et les corps de pompes.

## Aluminium

Aussi appelés cupro-aluminiums, ces alliages ont généralement une teneur en aluminium inférieure à 10 %, mais ils contiennent souvent d'autres éléments tels que

- Le fer (résistance);
- Le nickel (dureté et résistance);
- Le manganèse (robustesse);
- Le plomb (usinabilité).

Les caractéristiques de ces bronzes, comme la dureté et la résistance, sont excellentes et nettement supérieures à celles du laiton. Leur résistance à la corrosion est également excellente. On emploie ces bronzes dans des applications telles que les engrenages, les outils, les éléments de fixation, les aubes de turbines ainsi que les coussinets dans le cas des alliages contenant du plomb, puisqu'ils ont la propriété d'être autolubrifiants.

## Nickel

Ces bronzes ont une teneur en nickel qui varie entre 10 et 30 %. Ils contiennent aussi d'autres éléments d'addition. Le nickel améliore la résistance, la dureté, ainsi que les caractéristiques de résistance à l'usure et à la corrosion. Les alliages de ce type ont des applications diverses, notamment les tubes, les arbres, les paliers et les roulements, les corps de valves, etc.

## Silicium

Ces alliages peuvent aussi contenir d'autres éléments d'addition en faible quantité. Ils possèdent une résistance exceptionnelle à la corrosion et représentent un excellent compromis entre la robustesse, la dureté, la résistance et la coulabilité. Ces bronzes sont très utiles dans les industries chimique, pétrolière et marine. On en fait des réservoirs, de la tuyauterie, des paliers, des pignons, des engrenages, etc.

## Béryllium

Ces bronzes peuvent contenir jusqu'à 2 % de béryllium en plus d'autres éléments d'addition. Ils sont trempables, de sorte qu'ils peuvent acquérir d'excellentes qualités au regard de la traction et de la fatigue. On s'en sert dans la fabrication des ressorts, des matrices, des filières, des tubes et des appareils à contacts à haute résistance.

### 3. Titane

Le titane est un métal blanc et brillant. Le titane et ses alliages se distinguent par les caractéristiques suivantes :

- Très bonne résistance à la corrosion;
- Charge à la rupture élevée;
- Bonnes propriétés mécaniques à haute température.

Le titane est aussi résistant que l'acier, tout en étant deux fois plus léger. On l'utilise dans les industries aéronautique et chimique. De plus en plus, on trouve le titane et ses alliages dans différents secteurs industriels.

### 4. Nickel

Le nickel est un métal blanc grisâtre présentant une bonne dureté. Il est malléable et ductile. À l'état pur, le nickel est meilleur conducteur que les aciers. Toutefois, lorsqu'il est allié avec du cuivre, du chrome, du fer ou du molybdène, il est moins conducteur. On utilise le nickel comme élément d'alliage pour augmenter la ductilité, la dureté et la résistance tant des métaux ferreux que non ferreux. De plus, il permet d'augmenter la ténacité à basse température, la trempabilité et la résistance à faible traction. On utilise les alliages de nickel pour produire des pièces devant supporter des températures élevées: résistances électriques d'appareils de chauffage, évaporateurs et échangeurs pour l'industrie chimique, accessoires de décorations lumineuses. L'**Inconel** et le **Monel** sont des alliages de nickel couramment utilisés.

***L'acier inoxydable est un alliage de nickel, de chrome et de fer.***

## COMPARAISON ENTRE LES MÉTAUX FERREUX ET LES MÉTAUX NON FERREUX

En raison de leurs nombreuses propriétés, les métaux non ferreux rivalisent de plus en plus avec les métaux ferreux et tendent à les remplacer dans bon nombre d'applications.

### Résistance à la corrosion

Les métaux non ferreux résistent mieux à la corrosion que les métaux ferreux. Ces derniers, à l'exception des aciers inoxydables, sont grandement attaqués par la corrosion. Chaque année, la corrosion dégrade plusieurs centaines de milliers de tonnes d'acier.

### Conductivité électrique

La conductivité électrique des métaux non ferreux est largement supérieure à celle des métaux ferreux.

### Conductivité thermique

En général, la conductivité thermique des métaux ferreux est inférieure à celle des métaux non ferreux.

### Ferromagnétisme

Tous les métaux ferreux, à l'exception de l'acier inoxydable austénitique, sont attirés par un aimant. Quant aux métaux non ferreux, ils ne le sont pas, à l'exception du nickel et du cobalt.

### Densité

L'aluminium, le zinc et l'étain sont plus légers que le fer, tandis que le nickel, le cuivre, l'argent, le plomb et l'or sont plus lourds que le fer.

### Comportements à basse température

Les métaux ferreux (à l'exception des aciers à haute limite élastique, des aciers inoxydables austénitiques et des aciers au nickel) deviennent fragiles et cassants à basse température. Les métaux non ferreux gardent leur résistance mécanique à basse température.

### Résistance mécanique

La résistance mécanique des métaux ferreux est supérieure à celle des métaux non ferreux.

## Coût

En général, le coût des métaux non ferreux est supérieur à celui des métaux ferreux.

## Résumé

Les deux métaux les plus abondants dans le monde sont l'aluminium et le magnésium.

Les métaux non ferreux résistent généralement bien à la corrosion et ne sont pas magnétiques.

L'aluminium est trois fois plus léger et conducteur que le fer. Ses alliages sont plus résistants que le métal pur.

En raison de la facilité avec laquelle on peut le couper, l'alliage d'aluminium-silicium permet de réaliser des pièces complexes.

L'alliage d'aluminium-silicium-magnésium a une très grande résistance à la corrosion.

Le cuivre se distingue par sa grande conductibilité électrique. Il ternit mais ne rouille pas. ses alliages sont plus résistants que le métal pur

Le laiton est un alliage de cuivre et de zinc. Il est moins malléable que le cuivre et l'aluminium purs.

Le terme « bronze » s'applique aujourd'hui à n'importe quel alliage de cuivre autre que le laiton (cuivre-zinc).

Les principaux éléments ajoutés au cuivre pour produire différents bronzes sont l'étain (équipement marin, corps de pompes), l'aluminium (engrenages, outils, éléments de fixation), le nickel (tubes, paliers, corps de valves), le silicium (réservoirs, tuyauterie, engrenages).

Le nickel est ajouté aux métaux ferreux et non ferreux pour augmenter leur ductilité et leur résistance ainsi que pour abaisser leur température critique.

Le magnésium ressemble à l'aluminium mais il s'oxyde facilement. En soudage, on utilise surtout les alliages de magnésium, car lorsqu'il est pur, ce métal tend à s'enflammer lorsqu'il est chauffé.

## **Bibliographie :**

**Guide du dessinateur industriel**

**A. Chevalier**

**Guide du technicien en productique**

**A. Chevalier**

**Mémotech (génie des matériaux)**

**R. Bourgeois**

**H. Chauvel**

**J. Kessler**