

Chapitre 1 : Formulation et propriétés mécaniques du béton armé

1.1 Définition du béton

Le béton est un matériau de construction composite obtenu par le mélange de plusieurs éléments (Figure 1.1):

- **Liant** (ciment, souvent de type Portland),
- **Granulats** (sable, gravillons, graviers),
- **Eau** (pour activer la réaction chimique du liant),
- Parfois des **adjuvants** (additifs pour modifier ses propriétés) ou des **fibres** (pour renforcement).

Lors du mélange, le ciment et l'eau forment une pâte qui durcit par **hydratation**, enrobant les granulats pour créer un matériau solide, résistant et durable. Le béton est largement utilisé pour les structures (bâtiments, ponts, routes, barrages) grâce à sa capacité à être moulé, sa résistance à la compression et sa longévité. Sa formulation peut être ajustée en fonction des besoins (résistance, fluidité, temps de prise, etc.).

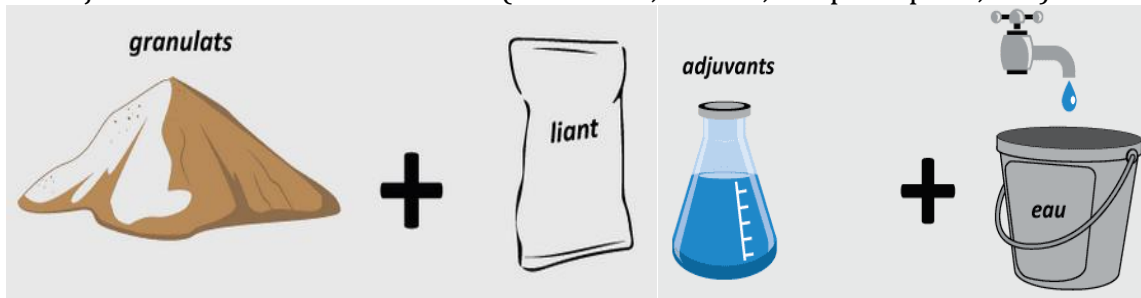
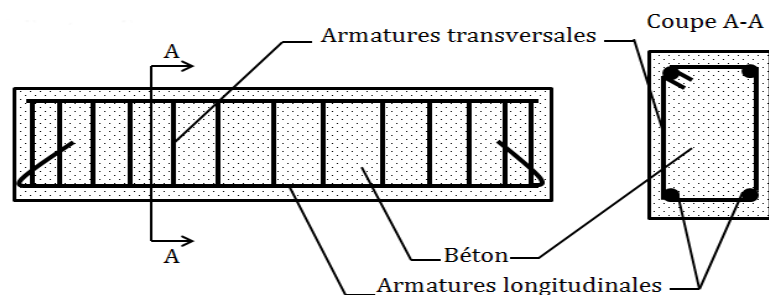


Figure 1.1. Compositions du béton

1.2. Définition du béton armé

Le béton armé est un matériau composite associant du béton et des armatures en acier. Ces armatures, généralement sous forme de barres (ferrailage) ou de treillis (Figure 1.2), sont intégrées dans le béton avant sa prise pour compenser la faible résistance du béton aux efforts de traction et de flexion.



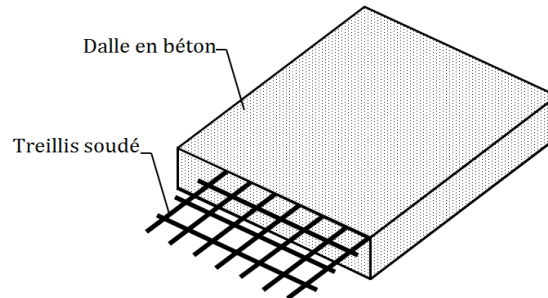


Figure 1.2. Eléments structuraux en béton armé.

Le béton se caractérise par une bonne résistance à la compression, par contre, la résistance à la traction ne représente qu'environ $1/10^e$ de sa résistance en compression. Par ailleurs, l'acier, offre une excellente résistance à la traction et à la compression, tout en présentant un comportement ductile (déformations importantes avant rupture).

La Figure 1.3 présente une poutre simplement appuyée soumise à un moment de flexion du principalement à son poids propre et au chargement externe (F). La flexion de la poutre entraîne des déformations de compression dans la partie supérieure de la poutre et des déformations de traction dans la partie inférieure (fissures dues aux contraintes de traction), et comme le béton présente une mauvaise résistance vis-à-vis les contraintes de traction, la mise en place des armatures en acier (armatures longitudinales principales) est nécessaire afin d'éviter /réduire ou limiter la propagation des fissures et la rupture de la poutre. Les armatures sont parfois disposées dans les zones comprimées si la résistance du béton est insuffisante pour équilibrer les contraintes de compression.

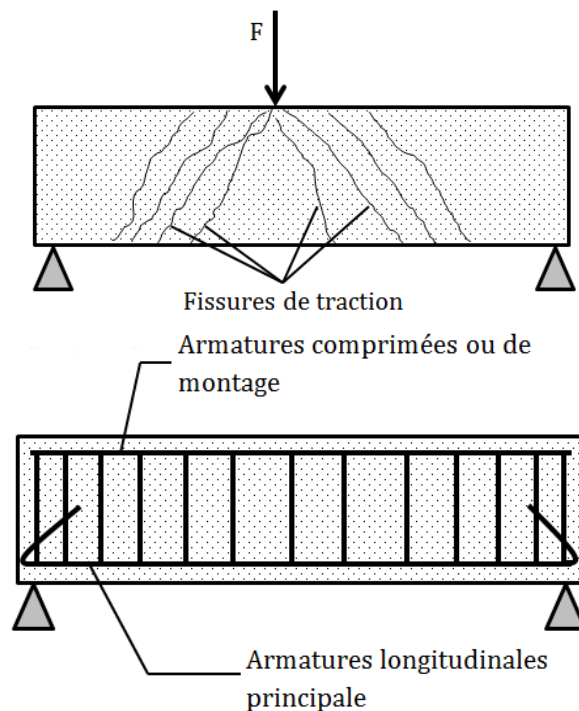


Figure. 1.3. Zones de fissuration et ferrailage dans une poutre

1.3. Historique :

Avant l'émergence du béton moderne, Louis Vicat, jeune ingénieur de l'École nationale des ponts et chaussées, réalise une avancée majeure en 1818 : il produit pour la première fois des chaux hydrauliques artificielles en contrôlant leurs composants et leurs proportions.

En 1848, Joseph-Louis Lambot innove en associant béton et armatures métalliques pour construire une barque, présentée à l'Exposition universelle de Paris en 1855. Peu après, Joseph Monier, jardinier à Versailles, utilise une méthode similaire pour fabriquer des bacs à fleurs, ce qui lui vaut d'être reconnu comme l'inventeur du béton armé (BA). Son procédé est commercialisé en Allemagne par l'entreprise *Monier Béton Brau*, qui dépose un brevet en 1868.

Les années suivantes marquent des étapes clés :

- 1891 : François Coignet emploie des poutres préfabriquées en béton armé pour un immeuble.
- 1886 : Mathias Koenen publie le premier traité théorique sur le dimensionnement des structures en BA.
- 1897 : Charles Rabut intègre le béton armé à l'enseignement de l'École des ponts et chaussées, créant le premier cours académique sur le sujet.
- Fin du XIX^e siècle : François Hennebique établit les bases de calcul pour une utilisation rationnelle du matériau.

Les progrès techniques conduisent, dès 1910, à la création d'institutions dédiées (*comité allemand du béton armé*, *American Concrete Institute*, etc.). Au XX^e siècle, le béton armé se généralise dans les bâtiments, ouvrages d'art, réservoirs, et autres infrastructures.

Une révolution survient avec Eugène Freyssinet, qui invente le béton précontraint : en 1928, il brevète un procédé où des câbles d'acier tendus compriment le béton, lui permettant de résister aux tractions futures. Baptisé « précontrainte » en 1933, ce système permet des ouvrages aux formes audacieuses, comme le pont de Luzancy (1940), symbole de portées longues et élancées.

1.4. Evolution des règles de calcul

En France

- **1906** : *Circulaire du Ministère des Travaux Publics* – Première réglementation officielle sur le béton armé.
- **1934** : *Circulaire Ministérielle* (30 pages) – Élargit les prescriptions techniques.
- **Règles BA 45** (90 pages) – Normalisation des méthodes de conception.
- **Règles BA 60** – Introduction de nouvelles exigences de durabilité.
- **1964** : *Circulaire Ministérielle* – Actualisation des critères de sécurité.
- **Règles CC BA 68** – Intègre les avancées sur les états limites.
- **BAEL 80** (modifiées en 1983) : « *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages en béton armé suivant la méthode des états limites* » – Référence majeure jusqu'à l'Eurocode.
- **Eurocode 2** (applicable dès les années 2000) : « *Règles unifiées communes pour les structures en béton* » – Harmonisation européenne des normes.

En Algérie

- **CBA 93** : *Document Technique Réglementaire D.T.R. B.C. 2.41* – « *Règles de conception et de calcul des structures en béton armé* », approuvé par le ministère

de l'Habitat en **1993**. Ce texte s'inspire des normes françaises tout en adaptant les spécificités locales (climat, matériaux, pratiques).

1.5. Composition du béton armé

Le béton est un matériau composite qui associe d'une matrice en béton (*granulats* liés par un ciment hydraulique) et des armatures en acier intégrées, assurant la résistance aux efforts de traction.

1.5.1. Matrice béton

Le béton est un matériau composite formé de granulats (graviers, pierres concassées, sable) liés par un ciment hydraulique.

1.5.1.1. Ciment :

Le ciment est produit en chauffant un mélange finement broyé de calcaire, d'argile et de sable à 1450 °C dans un four rotatif. Ce processus génère du *clinker*, un produit intermédiaire.

Le clinker est refroidi, puis broyé en une poudre fine. Au contact de l'eau, il s'hydrate pour former une pâte durcissante, essentielle pour solidifier le béton.

Types de ciment courants (Tablrau 1.1):

- **Ciment Portland (CP)** : Standard.
- **CPHR** (Haute Résistance) : utilisé en préfabrication.
- **CPHS** (Résistance aux sulfates) : Pour fondations exposées aux eaux sulfatées.

Tableau 1.1 rassemble les types de ciment avec les classes de résistance

Types de ciments	Désignation
Ciment portland	CPA-CEM I
Ciment portland composé	CPJ-CEM II/A ; CPJ-CEM II/B
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A ; CHF-CEM III/B ; CHF-CEM III/C
Ciment pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A ; CPZ-CEM V/B
Ciment au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A ; CLC-CEM V/B

1.5.1.2. Granulats :

Ils forment le squelette du béton. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés, extraits de roches exploités en carrière ou dragués en rivière ou en mer, puis concassés. Le sable permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats. Les agrégats qui confèrent au béton sa résistance doivent être insensibles au gel et ne pas contenir d'éléments argileux ou d'impureté organique. Le diamètre maximal des grains sera choisi en fonction de l'élément structural, de ses dimensions minimales ainsi que de l'écartement le plus faible de ses barres d'armatures. En général, le diamètre maximal des granulats est admis égal à 32 mm.

1. 5.1.3. Eau de gâchage :

Doit être potable, sans sel (excluant l'eau de mer).

1.5.1.4. Adjuvants ($\leq 0,4$ % du poids du béton) :

- **Plastifiants** : Améliorent la maniabilité et réduisent l'eau nécessaire, augmentant la résistance.
- **Retardateurs** : Prolongent la durée de travail du béton frais (transport longue distance, pompage).
- **Entraîneurs d'air** : Améliorent la résistance au gel-dégel.

1.5.1.5. Additions minérales (≈ 10 % du poids du ciment) :

Cendres volantes, laitier, fillers : Renforcent la durabilité et les performances via leurs propriétés physico-chimiques.

Composition du béton : Définie par le dosage en ciment ($\geq 300 \text{ kg/m}^3$ recommandé pour protéger les armatures). Le Rapport eau/ciment (E/C) : Entre 0,4 et 0,6. Une réduction de l'E/C augmente la résistance. Ces paramètres influent directement sur la résistance mécanique et la durabilité (voir Tableau 1.2 pour les proportions typiques). Le Tableau 1.1 donne un aperçu sur l'ordre de grandeur des proportions de chaque composant du béton.

Tableau 1.2. Ordre de grandeur des proportions des solides et de l'air en masse et en volume

Matériau	Ciment	Granulat	Eau	Air
Volume	7% - 14%	60% - 78%	14% - 22%	1% - 6%
Poids	9% - 18%	63% - 85%	5% - 9%	

1.5.2. Armature en acier

L'acier est un alliage de fer et de carbone (en faible proportion). Dans le béton armé, on utilise principalement des aciers doux, mi-durs et durs.

On utilise pour le béton armé, les ronds lisses (symbole ϕ ou RL), les armatures à haute adhérence (symbole HA) et les treillis soudés (symbole TS) (Figure. 1.4).



(a) Acier rond lisse

(b) Acier à haute adhérence

(c) Treillis soudés

Figure. 1.4: Armature en acier utilisé en béton armé :

Les formes des barres disponibles sont : les barres droites de longueurs standard de 12 m, fils : utilisés pour les éléments préfabriqués, treillis soudés (TS) qui assemblés par de fils croisés soudés prêts à l'emploi (Figure 1.5).



(a) Barres

(b) Fils en bobines

(c) treillis soudés

Fig. 1.5. Formes des aciers pour le béton armé disponibles

Diamètres des barres normalisés :

6, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 25, 32 et 40 mm.

Pour chaque diamètre nominal, sont définis :

- **Section nominale** : Équivalente à celle d'un rond lisse de même diamètre.
- **Périmètre nominal** : Correspondant au périmètre théorique du rond lisse.
- **Masse linéique** : Donnée en fonction du diamètre (voir références techniques).

Le tableau 1.3 donne la section nominale et la masse linéique correspondant aux différents diamètres nominaux.

Tableau 1.3 : Tableau des sections d'acier.

		Section totale d'acier en $\text{cm}^2 = n \cdot \frac{\pi D^2}{4}$									
		Nombre des barres (n)									
Diamètre de la barre D (mm)	Masse Kg/m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	0.222	0.28	0.57	0.85	1.13	1.41	1.7	1.98	2.26	2.54	2.83
8	0.395	0.50	1.01	1.51	2.01	2.51	3.02	3.52	4.02	4.52	5.03
10	0.617	0.79	1.57	2.36	3.14	3.93	4.71	5.50	6.28	7.07	7.85
12	0.888	1.13	2.26	3.39	4.52	5.56	6.79	7.92	9.05	10.18	11.31
14	1.210	1.54	3.08	4.62	6.16	7.70	9.24	10.78	12.31	13.85	15.39
16	1.580	2.01	4.02	6.03	8.04	10.05	12.06	14.07	16.08	18.10	20.11
20	2.466	3.14	6.28	9.42	12.57	15.71	18.85	21.99	25.13	28.27	31.42
25	3.850	4.91	9.82	14.73	19.63	24.54	29.45	34.36	39.27	44.18	49.09
32	6.313	8.04	16.08	24.13	32.17	40.21	48.25	56.30	64.34	72.38	80.42
40	9.864	12.57	25.13	37.70	50.26	62.83	75.40	87.96	100.53	113.09	125.66

1.6 Caractéristiques mécaniques des constituants du béton armé

1.6.1. Le béton

1.6.1.1 Résistances caractéristiques

a. Résistance caractéristique à la compression (f_{cj})

La résistance caractéristique à la compression du béton, notée f_{cj} , correspond à sa capacité à supporter une charge de compression après « j » jours de durcissement. La résistance de référence est prise à 28j dite valeur caractéristique requise (ou spécifiée). Cette résistance dépend de conditions de fabrication du béton, de la classe du ciment utilisé et de dosage en ciment par m^3 .

La résistance caractéristique à la compression est obtenue expérimentalement par l'application de l'essai de compression directe (Figure 1.6) sur un cylindre normalisé ($\emptyset 16 \text{ cm} \times 32 \text{ cm}$). L'essai de compression est effectué par l'utilisation d'une machine de compression qui permet de mesurer la force de compression, la valeur est la vitesse de déformation ainsi que la contrainte de rupture (Figure 1.6).



Figure. 1.6. Essai de compression sur éprouvette cylindrique

La contrainte de compression est donnée par la relation suivante :

$$f_{cj} = \frac{F_r}{S} \text{ (en MPa)} \quad (\text{Eq.1.1})$$

où F_r = charge de rupture (en kN), et la surface du cylindre est donnée par :

$$S = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 16^2}{4} = 200 \text{ cm}^2 \quad (\text{Eq.1.2})$$

pour $F_r = 500 \text{ kN}$, $f_{cj} = 25 \text{ MPa}$

L'essai de compression simple sur éprouvette 16x32 provoque des déformations (Voir Figure 1.7):

- Déformation relative longitudinale (Equation Eq.1.3) :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l' - l}{l} \quad (\text{Eq.1.3})$$

ε' déformation relative transversale (Equation Eq.1.4) :

$$\varepsilon' = \frac{\Delta d}{d} = \frac{d' - d}{d} \quad (\text{Eq.1.4})$$

ν : coefficient de poisson (Equation Eq.1.5):

$$\nu = \frac{\text{déformation relative transversale}}{\text{déformation relative longitudinale}} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \quad (\text{Eq.1.5})$$

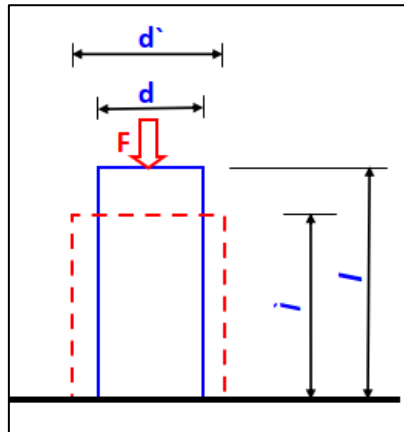


Fig. 1.7 : Détermination des déformations relatives longitudinale et transversale
L'essai de compression du béton permet d'obtenir le diagramme expérimental "contrainte - déformation" du béton ci-dessous (voir Fig. 1.7).

- **Diagramme contrainte-déformation**

Dans les calculs aux ELU, lorsqu'on n'a pas besoin d'une évaluation précise des déformations, on peut adopter le diagramme parabole-rectangle (Fig. 1.8).

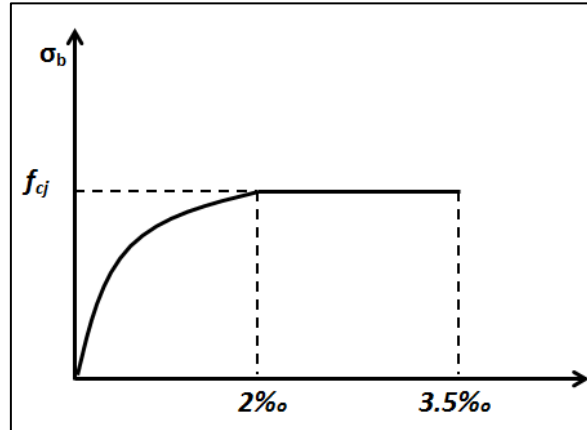


Figure. 1.8. Diagramme caractéristique contrainte déformation du béton.

La résistance de calcul du béton est déterminée par la relation suivante :

$$f_{bc} = 0.85 \cdot \frac{f_{cj}}{\theta \cdot \gamma_b} \quad (\text{Eq.1.6})$$

γ_b : le coefficient de sécurité égale à 1,5 (cas courant) et 1,15 (cas accidentel).

θ : Coefficient dépendant de la durée d'application de la charge avec :

$\theta = 1$ si la durée > 2h.

$\theta = 0.9$ si : 24 h la durée 1h.

$\theta = 0.85$ si : la durée 1h.

Pour un nombre de jours $j < 28$, la résistance f_{cj} des bétons suit les lois données par les règles de BAEL et BPEL :

$$\text{Bétons de résistance courante : } f_{cj} = \frac{j}{4.76 + 0.83j} f_{c28} \text{ pour } f_{c28} \leq 40 \text{ MPa} \quad (\text{Eq.1.7})$$

$$\text{Bétons de haute résistance : } f_{cj} = \frac{j}{1.4 + 0.95j} f_{c28} \text{ pour } f_{c28} > 40 \text{ MPa} \quad (\text{Eq.1.8})$$

$$\text{Pour } j \geq 28 \rightarrow f_{cj} = 1.1 f_{c28} \quad (\text{Eq.1.9})$$

- **b. Résistances caractéristiques à la traction :**

La résistance caractéristique à la traction f_{tj} du béton à j jours est définie par :

$$f_{tj} = 0.6 + 0.06 f_{cj} \quad (\text{Eq.1.10})$$

Avec, f_{cj} est la résistance caractéristique à la compression à j jours exprimée en MPa.

1.6.1.2 Déformation instantanée

- **Déformation longitudinale**

A défaut de résultats expérimentaux probants, on adopte pour le module de déformation longitudinale instantanée du béton E_{ij} une valeur conventionnelle égale à :

$$E_{ij} = 11000 f_{cj}^{\frac{1}{3}} (\text{MPa}) \quad (\text{Eq.1.11})$$

Le module de déformation longitudinale différée E_{vj} est donné par :

$$E_{vj} = 3700 f_{cj}^{\frac{1}{3}} (\text{MPa}) \quad (\text{Eq.1.12})$$

- **Déformation transversale**

$\mu = 0.2$ en zones non fissurées

$\mu = 0$ en zones fissurées

1.6.2. Acier

L'acier, alliage principalement composé de fer et d'une faible proportion de carbone, combine résistance mécanique en traction/compression et capacité de déformation. Le fer confère une base solide et une flexibilité, permettant au matériau de se déformer sans rupture, facilitant ainsi sa mise en forme. Le carbone renforce notablement la résistance, mais augmente la rigidité, réduisant la souplesse. La composition de l'acier résulte donc d'un équilibre entre ces deux caractéristiques.

1.6.2.1. Caractères mécaniques :

Les justifications mécaniques reposent principalement sur deux caractéristiques :

- La limite d'élasticité garantie (f_e), spécifique à chaque type d'acier.
- Le module d'élasticité longitudinale (E_s), pratiquement identique pour tous les aciers et pris égal à 200 000 MPa.

Le comportement de l'acier sous sollicitation est représenté par son diagramme contraintes-déformations en traction sur la Figure 1.9 (le diagramme est symétrique en compression).

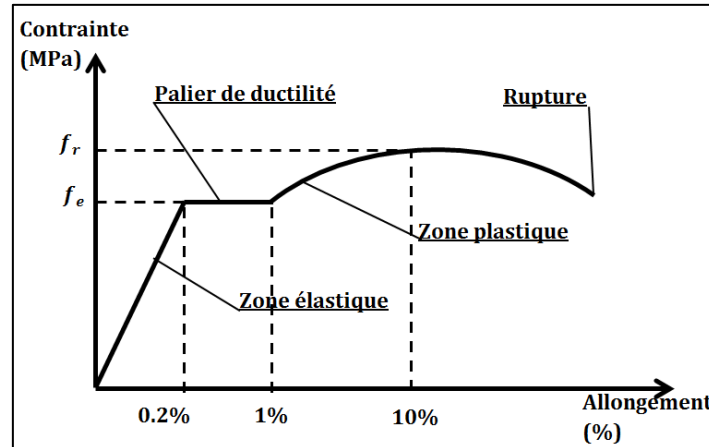


Figure. 1.9. Diagramme Contrainte-allongement de l'essai de traction sur acier.

1.6.2. 1. Le diagramme conventionnel contrainte-déformation

Le diagramme contrainte-déformation conventionnel de l'acier, utilisé pour les calculs structurels, il s'appuie sur la limite d'élasticité garantie (f_e) et nécessite de vérifier la contrainte correspondant à un allongement de 10 ‰. Ce diagramme est conçu pour faciliter les calculs, qui permettant une évaluation pratique des contraintes et des déformations dans les structures en acier, tout en assurant une cohérence avec les propriétés mécaniques réelles du matériau (Figure. 1.10). Il se décompose en phases clés:

- **Domaine élastique linéaire (OA) :** ce domaine présente une relation proportionnelle entre les contraintes et les déformations qui correspondent selon l'équation suivante :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

(Eq.1.13)

La Limite d'élasticité (f_e) présente la contrainte maximale avant apparition de déformations permanentes.

- **Plateau d'écoulement (AB) :**

Phase plastique où la déformation augmente à contrainte constante (f_e) avec déformations permanentes irréversibles.

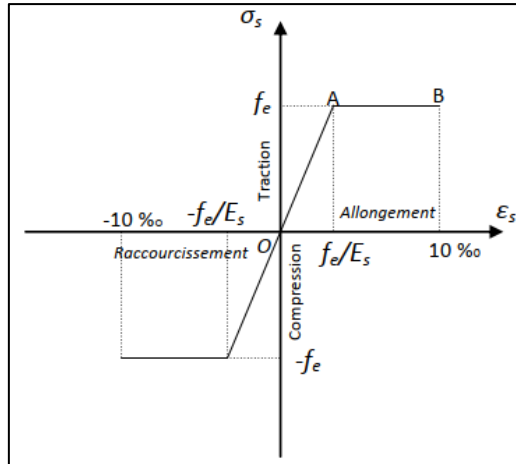


Figure. 1.10: Diagramme conventionnel déformations-contraintes de l'acier

1.6.2. 1. Nuance d'acier

Les nuances d'acier suivantes sont couramment utilisées dans la construction, caractérisées par leur limite d'élasticité et leurs propriétés mécaniques :

- **FeE215**
 - Acier doux à faible résistance.
 - Limite d'élasticité garantie : $f_e = 215 \text{ MPa}$.
 - Résistance à la rupture: $\sigma_r \geq 330 \text{ MPa}$ avec allongement de 22%
 - Utilisé pour des applications peu sollicitées ou nécessitant une mise en forme aisée (ex : structures légères).
- **Fe E 235**
 - Acier doux, capacité à se déformer sans rompre, idéale pour les structures soumises à des charges dynamiques ou des chocs.
 - Limite d'élasticité : $f_e = 235 \text{ MPa}$.
 - Résistance à la rupture: $\sigma_r \geq 410 \text{ MPa}$ avec allongement de 22%
 - Utilisé pour : construction métallique (poutres, profilés), éléments de fixation (boulons, vis), structures nécessitant une bonne soudabilité).
- **Fe E 400**
 - Acier de moyenne à haute résistance.
 - Limite d'élasticité : **400 MPa**.
 - Résistance à la rupture: $\sigma_r \geq 480 \text{ MPa}$ avec allongement de 14%
 - Offre un bon compromis entre résistance et ductilité.
 - Utilisé dans les structures soumises à des charges modérées à élevées.
- **Fe E 500**
 - Acier à **très haute résistance**.
 - Limite d'élasticité : **500 MPa**.
 - Résistance à la rupture: $\sigma_r \geq 550 \text{ MPa}$ avec allongement de 12%
 - Idéal pour les ouvrages exigeants (ponts, bâtiments de grande hauteur) ou les zones fortement sollicitées.
 - Réponds aux normes modernes d'optimisation des sections d'acier (réduction des coûts et du poids).