

Chapitre 1

Formulation et propriétés mécaniques du béton armé

1.1 Définition

Le **béton** est un mélange dans des proportions préétablies de granulats gros et fins (gravillons ou pierres concassées, sable), de ciment et d'eau et éventuellement des adjuvants (Fig. 1.1). Les adjuvants peuvent être employés dans le béton afin d'améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

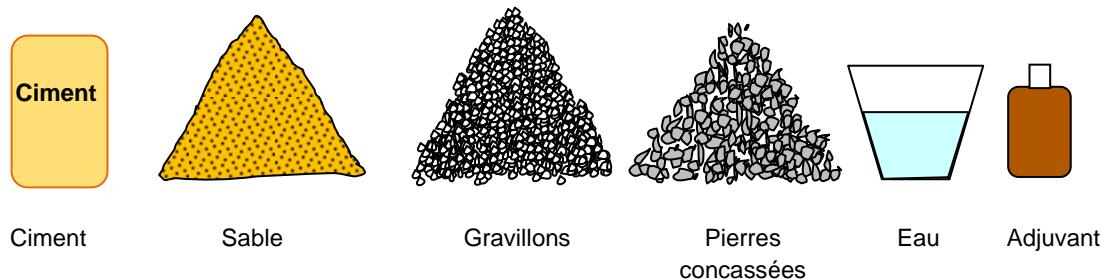


Fig. 1.1 : Les composants du béton

Le **béton armé** peut être défini comme l'enrobage par du béton, d'acières disposés judicieusement. Ces aciers sont appelés **armatures**. On distingue les **armatures longitudinales** disposées suivant l'axe longitudinal de la pièce, des **armatures transversales** disposées dans des plans perpendiculaires à l'axe de la pièce.

1.2 Principe du béton armé

Dans la plupart des structures, certaines parties sont soumises à des contraintes de compression et d'autres à des contraintes de traction. Or le béton est un matériau qui résiste fort bien en compression mais très mal en traction, alors que l'acier y résiste très bien. D'où l'idée de placer des barres d'acier dans les zones où se produisent des efforts de traction dirigées dans le sens de ces efforts; on pourra donc voir apparaître dans ces zones des microfissures du béton sous l'effet des contraintes de traction mais les aciers empêcheront les fissures de s'ouvrir et prendront seuls à leur compte les efforts de traction.

1.3 Historique des règles de conception et de calcul des ouvrages en béton armé

En France :

- Circulaire du Ministère des Travaux Publics de 1906 (France) ;
- Circulaire Ministérielle de 1934 (30 pages) ;
- Règles BA 45 (90 pages) ;
- Règles BA 60 :
- Circulaire Ministérielle de 1964 ;
- Règles CC BA 68 :
- Règles BAEL 80 modifiées en 83, « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites » ;
- Règles BAEL 91 (145 pages) ;
- Eurocode 2 "Règles unifiées communes pour les structures en béton".

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** », en abrégé « C.B.A 93 », ce document est approuvé par le ministère de l'habitat en 1993.

1.4 La méthode des états limites

1.4.1 Définition d'un état limite

Un « état limite » est celui pour lequel une condition requise d'une construction (ou d'un de ses éléments) est strictement satisfaite et cesserait de l'être en cas de modification défavorable d'une action.

1.4.2 Etats limites ultimes et états limites de service

Un ouvrage doit être conçu et calculé de manière à présenter pendant toute sa durée de vie des sécurités suffisantes vis-à-vis :

- de sa ruine ou de celle de l'un de ses éléments,
- d'un comportement en service susceptible d'affecter gravement sa durabilité, son aspect, le confort des usagers.

- Le BAEL distingue deux catégories d'états limites :

➤ **Etats Limites Ultimes (E.L.U.)**

On distingue:

- **Etat limite d'équilibre statique**: stabilité des constructions ;
- **Etat limite ultime de résistance** (symbole E.L.U.R.) : matériaux constitutifs ;
- **Etat limite de stabilité de forme** (symbole E.L.U.S.F.) : non risque de flambement.

➤ **Etats Limites de Services (E.L.S.)**

On distingue:

- **Etat limite de compression du béton** : une contrainte de compression à ne pas dépasser
- **Etat limite de déformation** : flèche maximale.
- **Etat limite d'ouverture de fissures** : risque d'ouverture de fissures.

1.4.3 Domaine d'application des règles BAEL

Ces règles sont applicables à tous les ouvrages et constructions en béton armé, et dont le béton est constitué de granulats naturels normaux, avec un dosage en ciment au moins égal à 300 kg par m³ de béton mis en œuvre.

- Restent en dehors du domaine de ces règles : les constructions en béton non armé ou en béton léger, les structures mixtes acier-béton et les éléments soumis à des températures s'écartant des influences climatiques normales, les constructions en béton de résistance caractéristique supérieure à 60 MPa.

1.5 Constituants du béton armé

1.5.1 Le béton

- On a vu au paragraphe 1.1 que le béton est un mélange de : (Tableau 1.1)
 - **pâte pure** (ciment + eau + air);
 - **granulats** (sables, gravillons et plus rarement pierres cassées);
 - **produits d'addition éventuels** (adjuvants).

Tableau 1.1 : Pourcentage en volume absolu des constituants du béton

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
Pourcentage en volume absolu	18 à 28	1 à 6	7 à 14	60 à 78

- La composition du béton a une grande influence sur ses caractéristiques, mais si les caractéristiques attendues sont la plus part du temps bien définies, la mise au point du béton approprié peut s'avérer plus délicate.
- Le béton est préparé soit sur le chantier, soit en centrale à béton.
- Le béton est caractérisé par :
 - une bonne résistance en compression simple,
 - une mauvaise résistance en traction,
 - Masse volumique :
 - La masse volumique béton à granulats courants (normal) → $2200 \div 2400 \text{ kg/m}^3$
 - La masse volumique béton à granulats légers → $700 \div 1500 \text{ kg/m}^3$
 - La masse volumique béton à granulats lourds → $3500 \div 4000 \text{ kg/m}^3$
 - La masse volumique du béton armé → 2500 kg/m^3
 - un coefficient de dilatation thermique identique à celui de l'acier de $10^{-5}/^\circ\text{C}$.

1.5.1.1 Les granulats

- Les granulats est l'ensemble de grains minéraux appelés, fines, sables, gravillons ou cailloux, suivant leur dimension comprise entre **0** et **80mm** (voir Tableau 1.2).
- Pour les granulats utilisés en béton armé, on distingue :
 - ☞ les granulats alluvionnaires dits roulés (forme acquise par l'érosion).
 - ☞ les granulats de carrières aux formes angulaires (obtenus par abattage et concassage).

Tableau 1.2 : Catégories des granulats suivant la grosseur de grains

Appellation	Fines	Sable	Gravillons	Cailloux et pierres cassées
Catégories suivant La grosseur de grains en mm	< 0,080	Fins: 0,080 à 0,315 Moyens: 0,315 à 1,25 Gros: 1,25 à 5	Petits: 5 à 8 Moyens: 8 à 12,5 Gros: 12,5 à 20	Petits: 20 à 31,5 Moyens: 31,5 à 50 Gros: 50 à 80

1.5.1.2 Le ciment

- Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. On distingue différents types de ciment et différentes classes de résistance (voir tableaux 1.3 et 1.4).
- Le choix d'un ciment se fait suivant les critères suivants :
 - Prestations élevées à court terme ex.: CEM I 52.5R ou CEM III/A 52.5R1
 - Température de bétonnage :
 - Temps froid : CEM I 52.5 ou CEM I 42.5
 - Temps chaud : CEM III/C 32.5
 - Présence de sulfates ex.: CPJ CEM II/B-S 42.5N-ES

Tableau 1.3 : différents types de ciments courants

Types de ciments	Désignations
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 CLK-CEM III/C
Ciment pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A CPZ-CEM IV/B
Ciment au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A CLC-CEM V/B

Tableau 1.4 : Différentes classes de ciments courants

Classe	Résistance à la compression (MPa) (norme EN 196-1)			
	au jeune âge		à 28 jours	
	2 jours	7 jours	mini	maxi
32,5		(17,5)	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	≥ 10		$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
42,5	≥ 10		$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 R	≥ 20		$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
52,5	≥ 20		$\geq 52,5$	
52,5 R	≥ 30		$\geq 52,5$	

R : début de durcissement rapide

1.5.2 L'acier

L'acier est un alliage de fer et carbone en faible pourcentage. Les aciers utilisés dans le béton armé sont **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) (Fig. 1.2).

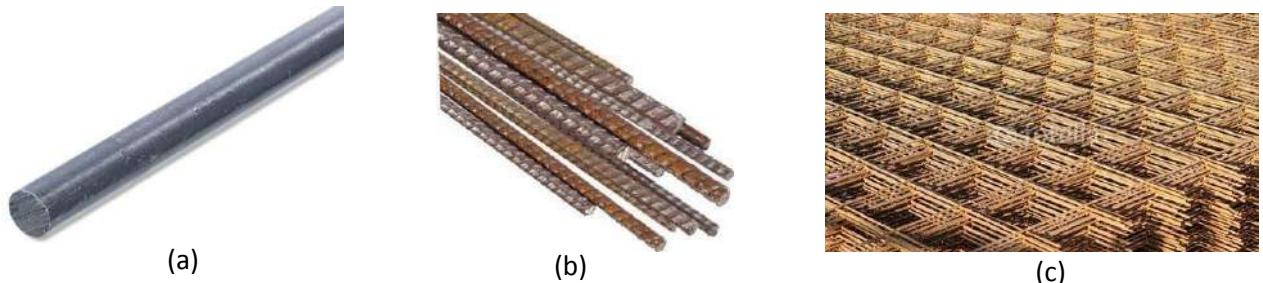


Fig. 1.2: Les aciers utilisés en béton armé : a. Acier rond lisse, b. Acier à haute adhérence, c. Treillis soudés

- On trouve les aciers pour le béton armé sous trois formes : barres, fils et treillis soudés (Fig. 1.3).
- En barres droites, les longueurs courantes de livraison sont de 12 m.

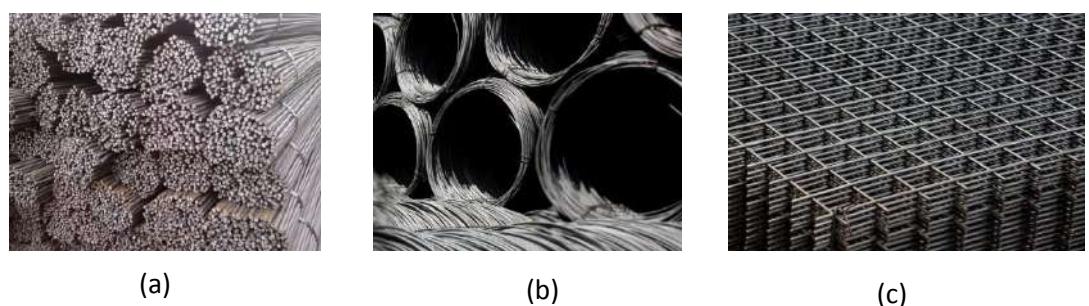


Fig. 1.3: Les formes des aciers pour le béton armé sur le marché : a. barres, b. fils en bobines, c. treillis soudés

- Les diamètres normalisés d'armatures courantes sont : 6,8, 10, 12, 14, 16, 20, 25, 32 et 40 mm.
- Au diamètre nominal correspondent une section nominale et un périmètre nominal (section et périmètre d'un rond lisse de diamètre égal au diamètre nominal).
- Le tableau 1.5 donne la section nominale et la masse linéique correspondant aux différents diamètres nominaux.

Tableau 1.5 : Tableau des sections d'acier.

Diamètres	Masse kg/m	Sections totale d'acier en cm ²									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	0,222	0,28	0,57	0,85	1,13	1,41	1,70	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	5,65	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

Exemple : La section totale de 6 HA12 est de 6.79 cm².

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:

Elle est désignée par f_{cj} (résistance à la compression à "j" jours). Dans le cas courant, pour l'établissement des projets, la résistance de référence est prise à **28j** dite valeur caractéristique requise (ou spécifiée). Elle est notée f_{c28} et choisie en fonction des conditions de fabrication du béton, de la classe du ciment utilisé et de son dosage au m³.

Elle se mesure par compression axiale de cylindres de béton Ø16x32 cm. La section **S** est de 200 cm² (Fig.1.4). La compression se fait par le biais d'une presse hydraulique (Fig. 1.5).

La résistance à la compression du béton est définie à (**j**) jours, à partir de la charge (F_r) conduisant à sa rupture :

$$f_{cj} \text{ (MPa)} = \frac{F_r}{S}$$

Exemple : $f_{cj} = 25 \text{ MPa}$

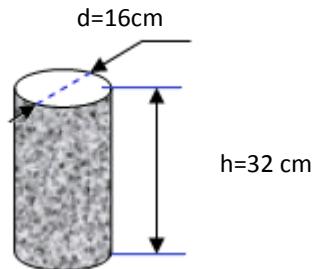


Fig. 1.4 : Eprouvettes cylindriques (diamètre 16 cm, hauteur 32 cm),

Fig. 1.5 : Ecrasement d'éprouvettes de béton avec une presse hydraulique

- L'essai de compression simple sur éprouvette 16x32 provoque des déformations (Voir Fig. 1.6):

- ε : déformation relative longitudinale

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l' - l}{l}$$

- ε' : déformation relative transversale

$$\varepsilon' = \frac{\Delta d}{d} = \frac{d' - d}{d}$$

- ν : coefficient de poisson,

$$\nu = \frac{\text{déformation relative transversale}}{\text{déformation relative longitudinale}} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$$

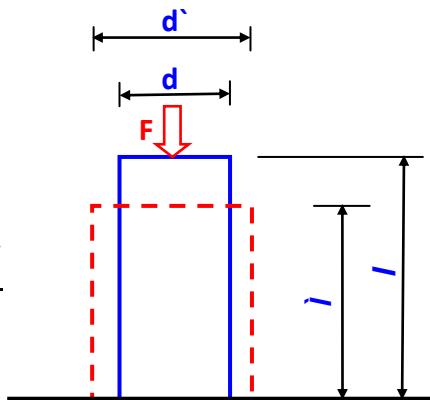


Fig. 1.6 : Détermination des déformations relatives : longitudinale et transversale

- L'essai de compression du béton permet d'obtenir le diagramme expérimental "contrainte - déformation" du béton ci-dessous (voir Fig. 1.7).

- La résistance du béton augmente avec l'âge (voir Fig. 1.8).

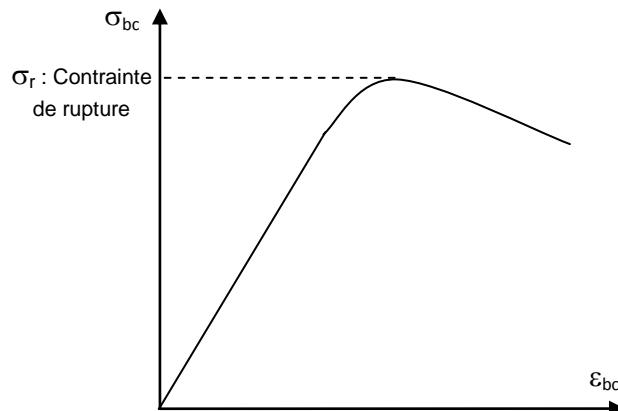


Fig. 1.7 : Diagramme contrainte-déformation du béton en compression.

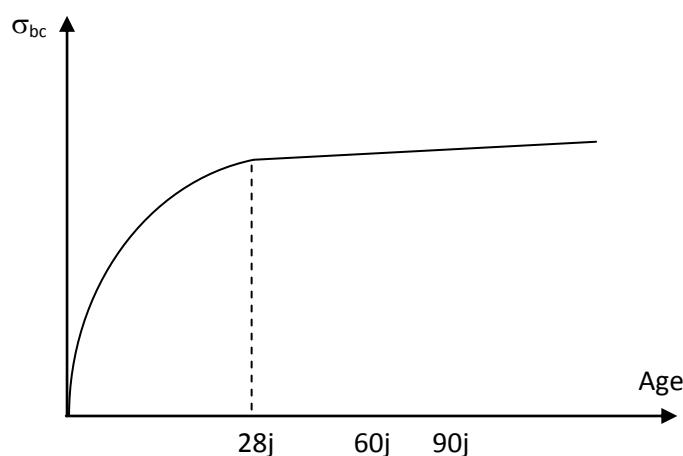


Fig. 1.8 : Diagramme de la résistance à la compression du béton en fonction de l'âge.

- Pour des calculs en phase de réalisation, on adoptera les valeurs des résistances à j jours, définies à partir de f_{c28} , par :

f_{cj}	$f_{c28} \leq 40 \text{ MPa}$	f_{cj}	$40 \text{ MPa} < f_{c28} < 60 \text{ MPa}$
$j < 60$	$\frac{j}{4.76 + 0.83j} \cdot f_{c28}$	$J \leq 28$	$\frac{j}{1.40 + 0.95j} \cdot f_{c28}$
$j \geq 60$	$1.10 f_{c28}$	$28 < j < 60$	Béton à Haute Résistance, voir (B.A.E.L. A.2.1,11)

b. Résistance caractéristique à la traction:

Elle est désignée par f_{tj} (résistance à la traction à " j " jours). Elle est conventionnellement définie a partir de la résistance à la compression par la relation:

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj}$$

- **Exemple** avec $f_{cj} = 25 \text{ MPa}$: $f_{tj} = 0,6 + 0,06 \times 25 = 2,1 \text{ MPa}$

1.6.1.2 Déformation du béton

➤ **Déformation longitudinale** (A.2.1, 2)

On distingue:

- le module de déformation instantanée (durée d'application des charges < 24 heures)(symbole E_{ij}) :

$$E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3} (\text{MPa})$$

- le module de déformation différée (longue durée d'application) (symbole E_{vj})

$$E_{vj} = 3700 f_{cj}^{1/3} (\text{MPa})$$

➤ **Déformation transversale** (A.2.1, 2)

Le coefficient de Poisson est pris égal à:

- $\nu = 0,20$ pour la justification aux E.L.S. (section non fissurée)
- $\nu = 0$ dans le cas des E.L.U (section fissurée).

1.6.2 L'acier

- Le caractère mécanique qui sert de base aux justifications est la limite d'élasticité garantie désignée par f_e . Elle varie en fonction du type d'acier.
- Le module d'élasticité longitudinale E_s est pratiquement constant quel que soit l'acier utilisé et est pris égal à : $E_s = 200\,000 \text{ MPa}$.

- Le diagramme conventionnel déformations-constraints pour la traction et la compression a l'allure présentée dans la figure Fig. 1.9, sachant que les valeurs de limite élastique sont les mêmes en traction et en compression.

➤ Cas de la traction

- Droite OA (domaine élastique)
 - Proportionnalité déformations-constraints
 - Coordonnées du point A

$$\begin{cases} \varepsilon_s = f_e / E_s \\ \sigma_s = f_e \end{cases}$$
- Horizontale AB d'ordonnée $\sigma_s = f_e$ (domaine plastique)
 - La position du point B correspond à un allongement de **10 %o**

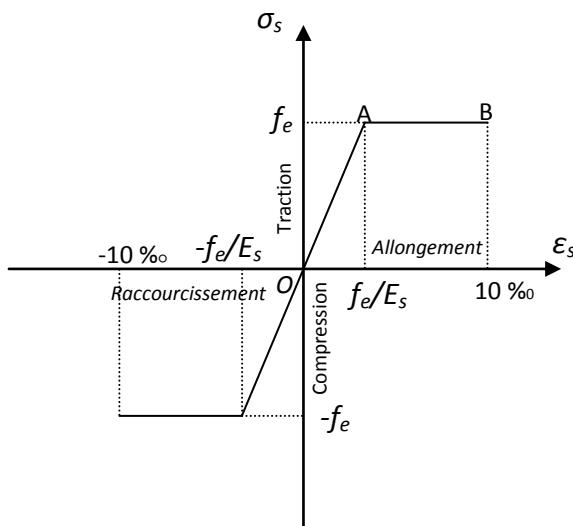


Fig. 1.9: Diagramme conventionnel déformations-constraints de l'acier

➤ Cas de la compression

Le diagramme correspondant est symétrique à celui de la traction par rapport à O.

Les nuances d'acier :

- Il existe **4 nuances** principales qui correspondent à des qualités de limite élastique et de résistance différentes (voir tableaux 1.6 et 1.7).

a. Aciers en barres**Tableau 1.6 :** Les caractéristiques des nuances principales des aciers en barres utilisés en béton armé

Caractéristiques	Types d'acier			
	Doux et lisses	A Haute Adhérence (symbole		
Dénomination	FeE215	Fe E 235	Fe E 400	Fe E 500
Limite élastique f_e en MPa	215	235	400	500
Resistance à la rupture σ_r en MPa	≥ 330	≥ 410	≥ 480	≥ 550
Allongement à la rupture	22%		14%	12%
Coefficient de scellement, symbole ψ_s	1		1,5	
Coefficient de fissuration, symbole η	1		1,6	
Diamètres courants en mm	6-8-10-12		6-8-10-12-14-16-20-25-32-40	

b. Treillis soudés**Tableau 1.7 :** Les caractéristiques des treillis soudés utilisés en béton armé

Caractéristiques	Types de treillis	
	Lisses (symbole T.S.L.)	A Haute Adhérence (symbole T.S.H.A.)
Limite élastique f_e en MPa	500 (tous diamètres)	500 (tous diamètres)
Resistance à la rupture σ_r en MPa	550	550
Allongement à la rupture	8%	8%
Coefficient de scellement, symbole ψ_s	1	1,5
Coefficient de fissuration, symbole η	1	1,3 pour $0 < 6$ mm 1,6 pour $0 \geq 6$ mm
Diamètres courants	3,5 mm à 9 mm avec un pas de 0,5 mm	- 3,5 à 12 mm avec un pas de 0,5 mm