

2. Les Matériaux du Béton Armé

2.1 Le Béton (A.2.1)

Le béton est un mélange de ciment, de granulats, d'eau et éventuellement d'adjuvants défini par des normes (y compris pour l'eau...).

Ciments

La production annuelle est en France d'environ 20 millions de tonnes (www.infociments.fr)
On distingue différents types de ciment et différentes classes de résistance.

Classes	Définition
CEM I	Ciment Portland
CEM II	Ciment Portland composé (au laitier, fumée de silice, pouzzolane, cendres volantes, schistes calcinés, calcaire)
CEM III	Ciment de haut fourneau
CEM IV	Ciment pouzzolanique
CEM V	Ciment composé (laitier, cendres)

Résistance minimale	Normal (N)		Rapide (R)	
	A 2 jours	A 28 jours	A 2 jours	A 28 jours
Classe 32,5	/	32,5	≥ 10	32,5
Classe 42,5	≥ 10	42,5	≥ 20	42,5
Classe 52,5	≥ 20	52,5	≥ 30	52,5

Bétons

Un béton est défini par un certain nombre de critères et sera caractérisé par des performances dont la résistance n'est qu'un des aspects.

La norme EN 206-1 s'applique à tous les bétons de structure, y compris ceux réalisés sur chantier, contrairement à la norme NF-P-18.305 qui ne s'appliquait qu'aux bétons prêts à l'emploi. Les Bétons prêts à l'emploi (B.P.E) sont fabriqués industriellement avec les avantages que cela comporte (matériaux stockés correctement, dosages précis (l'ajout d'eau dépend de la teneur en eau des granulats), contrôles systématiques des composants, régularité des caractéristiques du produit...)

On voit sur la marché, au travers du réseau des usines de Béton Prêt à l'Emploi, des bétons de résistance très élevée, regroupés sous le terme de Bétons à Hautes Performances.

En fait ils recouvrent une vaste gamme de bétons; une classification est proposée en fonction de leur résistance, mais ne pas perdre de vue que le mot "performance" englobe des caractéristiques diverses :

- densité
- porosité
- perméabilité ou résistance à la pénétration de l'eau
- résistance aux agents agressifs extérieurs (chimiques notamment)
- résistance aux cycles gel- dégel et au sels de déverglaçage
- résistance à l'abrasion
- tenue au feu
- déformabilité
- retrait, fluage
- maniabilité
- développement accéléré de la résistance
- hydratation retardée
- teneur en air (air entraîné et occlus)
- résistance à la compression (qui n'est que l'une d'entre elles).

Il existe au sens de la norme, trois types de béton :

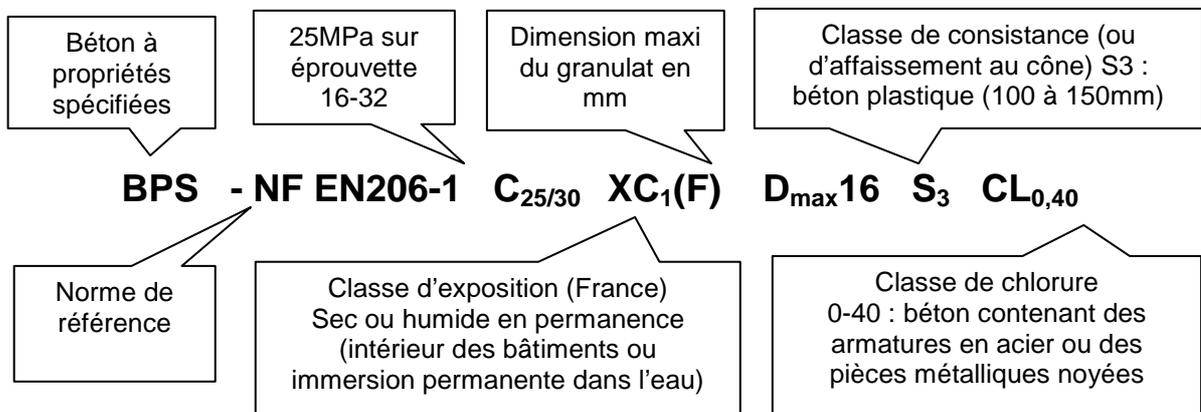
- Les BCP- Bétons à Composition Prescrite
- Les BPS- Bétons à Propriétés Spécifiées
- Les BCPN- Béton à Composition Prescrite dans une Norme

Pour les **BCP Bétons à Composition Prescrite**, la composition et les constituants à utiliser sont spécifiés au producteur par le client prescripteur. Le fournisseur n'est responsable que du respect de la formulation donnée par l'utilisateur. Ils ne doivent donc être commandés que par des prescripteurs réellement compétents dans la formulation des bétons.

Pour les **BPS Bétons à Propriétés Spécifiées**, les spécifications sont les suivantes :

- o Exigence de conformité à la norme EN 206-1
- o Classe de résistance
- o Classe d'exposition
- o Dimension maximum des granulats
- o Classe de consistance
- o Classe de teneur en chlorures
- o Exigences complémentaires (Prise retardée, résistance à l'abrasion, au gel dégel, aspect...)

Exemple :



Critères de spécification des BPS

Classes de résistance	Notée par exemple C_{25/30} , (C comme Concrete), 25 représente la résistance en compression en MPa à 28 jours sur cylindre 16/32 et 30 celle sur cube 15/15/15. Il existe de nombreuses classes allant de C_{8/10} à C_{100/115} . Les plus courantes étant C_{20/25} et C_{25/30}
Classes d'exposition	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Xo = Absence de risque de corrosion ou d'attaques ▪ Xc = Corrosion par carbonatation ▪ XD = Risque de corrosion par chlorures autres que sel de mer (Sels de déverglaçage, piscines ...) ▪ Xs = Corrosion par chlorures provenant de la mer ▪ XA = Attaques chimiques ▪ XF = Attaques gel dégel
Classes de consistance	<ul style="list-style-type: none"> ▪ S₁ : De 10 à 40 mm (± 10 mm) ▪ S₂ : De 50 à 90 mm (± 20 mm) ▪ S₃ : De 100 à 150 mm (± 30 mm) ▪ S₄ : De 160 à 210 mm (± 30 mm) ▪ S₅ : > 220 mm (± 30 mm)
Classes de teneur en chlorures	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CL_{0,20} = Pour le béton précontraint (un peu trop permissive), ▪ CL_{0,40} = Pour le béton armé courant, ▪ CL_{0,65} = Pour le béton avec ciment CEM III, ▪ CL_{1,00} = Pour le béton non armé. <p>Où 0,20 correspond au % de chlorures autorisés par rapport au poids de ciment</p>

Caractéristiques mécaniques.

Le béton est caractérisé par une bonne résistance à la compression f_{cj} et une résistance médiocre en traction f_{tj} . Un module d'Young qui prend deux valeurs selon que l'on considère des déformations instantanées E_{ij} ou des déformations à long terme, déformations différées, E_{vj} .

Essais de laboratoire

Expérimentalement la résistance à la compression se mesure le plus souvent sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 16cm et de hauteur 32cm.

La résistance à la traction s'obtient soit par essai de traction par fendage (dit essai Brésilien) soit par un essai de flexion sur éprouvette prismatique.

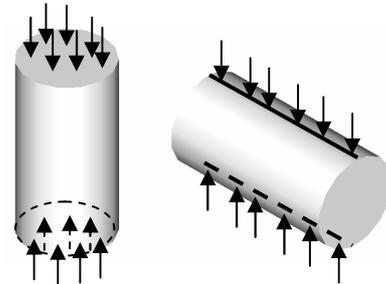


Fig.2.1 Essais de compression et de traction sur éprouvettes 16x32

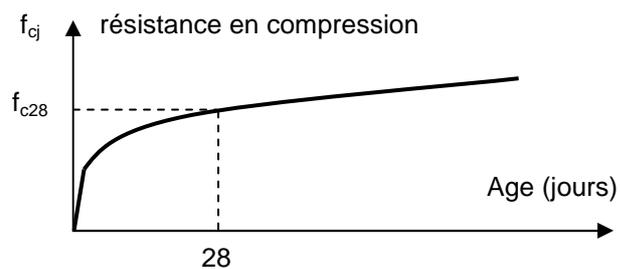
Résistance à la compression (A.2.1,1)

Dans les cas courants, un béton est défini par une valeur de sa résistance à la compression, à l'âge de 28 jours, dite "valeur caractéristique requise". Cette résistance se mesure par des essais de compression simple sur éprouvettes cylindriques de section 200 cm^2 et de hauteur double de leur diamètre (les éprouvettes sont dites "16-32").

Elle est notée f_{c28} et s'exprime en MPa et correspond dans la norme à la valeur de la résistance au dessous de laquelle peuvent se situer au plus 5% de la population de tous les résultats des essais sur éprouvette 16x32. Cette résistance caractéristique est donc bien inférieure à la valeur moyenne des résultats d'essai.

Cette résistance varie en fonction de l'âge du béton et le règlement donne des lois d'évolution de f_{cj} (résistance en compression à j jours) en fonction de l'âge "j" en jours.

Fig.2.1.b Evolution de la résistance en compression d'un béton en fonction de son âge



Pour des bétons non traités thermiquement, on admet (BAEL):

$J \leq 28$	$f_{c28} \leq 40\text{ MPa}$	$f_{cj} = j \cdot f_{c28} / (4,76 + 0,83j)$
	$f_{c28} > 40\text{ MPa}$	$f_{cj} = j \cdot f_{c28} / (1,40 + 0,95j)$
$J = 28$	$f_{c28} \leq 40\text{ MPa}$	$f_{cj} = f_{c28}$ pour les calcul de résistance
$28 < J < 60$		$f_{cj} = j \cdot f_{c28} / (4,76 + 0,83j)$ pour les calculs de déformation
$J > 60$		$f_{cj} = 1,1 \cdot f_{c28}$ pour les calculs de déformation

Résistance à la traction du béton (A.2.1,12)

La résistance à la traction du béton à j jours, notée f_{tj} et exprimées en MPa est définie conventionnellement par la relation

$$\boxed{f_{tj} = 0,6 + 0,06 \cdot f_{cj}} \quad \text{si } f_{c28} < 60\text{MPa} \quad \text{et} \quad \boxed{f_{tj} = 0,275 \cdot f_{cj}^{2/3}} \quad \text{si } 60 < f_{c28} < 80\text{MPa}$$

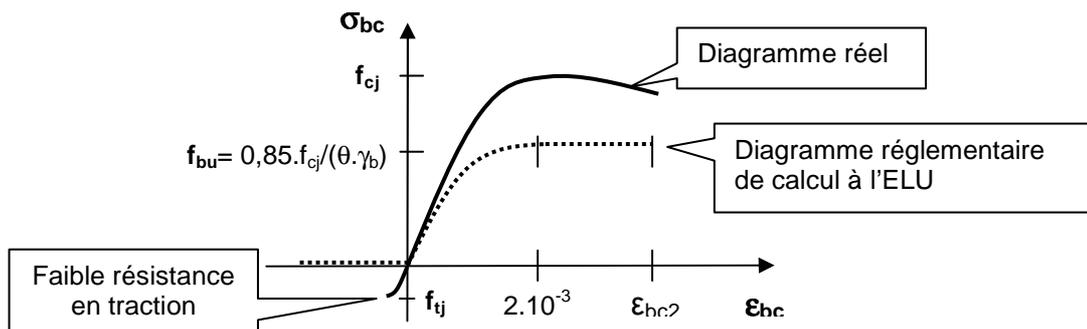
Quelques valeurs

f_{c28} [MPa]	20	25	30	40	60	80
f_{t28} [MPa]	1,8	2,1	2,4	3	4,2	5,1

Déformations longitudinales du béton (A.2.1,2)

Un essai de compression simple sur éprouvette 16x32 permet d'obtenir le diagramme expérimental "contrainte - déformation" du béton ci-dessous. Réglementairement, on applique des coefficients de sécurité sur la résistance du béton et le diagramme qui sera utilisé pour les calculs à l'ELU (Etats Limites Ultimes) sera le diagramme dit "de calcul" (voir chapitre 4, § 4.1). La résistance de calcul à la traction sera négligée.

Le béton est un matériau fragile (par opposition à ductile), il se déforme peu avant rupture. La loi de comportement fait apparaître une zone élastique (quasiment linéaire) et une zone plastique.



$$\epsilon_{bc2} = 3,5 \cdot 10^{-3} \quad \text{si } f_{cj} < 40\text{MPa} \quad \text{et} \quad \epsilon_{bc2} = (4,5 - 0,025 \cdot f_{cj}) \cdot 10^{-3} \quad \text{si } f_{cj} > 40\text{MPa}$$

Fig.2.2 Diagramme expérimental et diagramme de calcul du béton

$\boxed{f_{bu} = 0,85 \cdot f_{cj} / (\theta \cdot \gamma_b)}$ est la résistance en compression pour le calcul à l'ELU avec :

- $\theta = 1$ pour les charges appliquées plus de 24h (0,9 entre 1 et 24h et 0,85 si < 1h)
- $\gamma_b = 1,5$ à l'ELU normal et 1,15 à l'ELU accidentel.

Un élément de béton comprimé admet dès l'application de la charge une déformation instantanée. Mais au cours du temps, cette déformation va continuer à croître du fait du fluage (déformation dans le temps, sous charge constante) et sera même trois fois plus importante que la déformation instantanée.

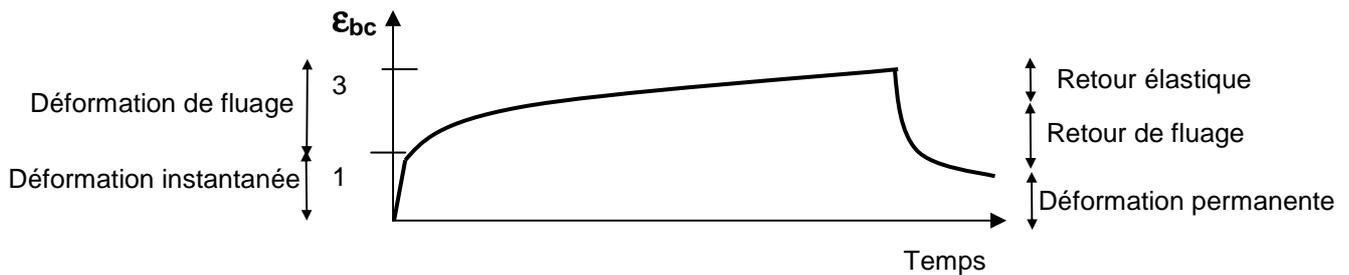


Fig.2.3 Déformations instantanée et différée (due au fluage)

Déformations instantanées	Déformations différées
<p>Sous des contraintes normales d'une durée d'application inférieure à 24 heures, on admet à l'âge de j jours, un module de déformation instantanée du béton de:</p> $E_{ij} = 11000.f_{cj}^{1/3}$	<p>Les déformations différées du béton comprennent le retrait et le fluage. Le module de déformation différée correspondant à des charges de longue durée d'application (réglementairement plus de 24 heures) est:</p> $E_{vj} = 3700.f_{cj}^{1/3} \quad \text{si } f_{cj} < 60\text{MPa}$ $E_{vj} = 4400.f_{cj}^{1/3} \quad \text{si } 60 < f_{c28} < 80\text{MPa, sans fumée de silice}$ $E_{vj} = 6100.f_{cj}^{1/3} \quad \text{si } 60 < f_{c28} < 80\text{MPa, avec fumée de silice}$
<p>avec f_{cj} en MPa et pour les bétons à haute résistance, sous réserve que la proportion volumique de granulat soit supérieure à 66%.</p>	

Quelques valeurs en MPa		
f_{c28}	E_{ij}	E_{vj}
25	32160	10820
30	34180	11500
40	37620	12650
60	43060	17220
80	47400	18960

Retrait

Le raccourcissement unitaire (ϵ) du au retrait, dans le cas de pièces non massives à l'air libre est estimé à : (ces valeurs tiennent compte d'un pourcentage moyen d'armatures).

$1,5 \cdot 10^{-4}$	Dans les climats très humides
$2 \cdot 10^{-4}$	Dans les climats humides (France sauf quart Sud Est)
$3 \cdot 10^{-4}$	Dans les climats tempérés secs (quart Sud Est de la France)
$4 \cdot 10^{-4}$	En climat chaud et sec
$5 \cdot 10^{-4}$	En climat très sec ou désertique

Remarque 1. Pour limiter les effets du retrait dans les dalles de grandes dimensions la phase de bétonnage s'effectue parfois en laissant des lacunes de coulage qui seront coulé plusieurs semaines plus tard, une fois l'essentiel du retrait effectué.

Remarque 2. Dans les dallages des joints (parfois sciés) sont réalisés pour que les fissures de retrait se trouvent localisés en fond de joint, et donc invisibles.



2.2 L'Acier (A.2.2)

Au cours des premières décennies de l'histoire du béton armé, les armatures étaient constituées de barres d'acier doux, lisses, de section circulaire dont la limite d'élasticité était habituellement comprise entre 215 et 235 MPa. Ce type d'acier n'est pratiquement plus utilisé. On utilise désormais des aciers de limite d'élasticité plus élevée afin de réduire les sections d'armatures. Pour améliorer l'adhérence des armatures au béton on crée à la fabrication des aspérités en saillie ou en creux. Les aspérités en saillie inclinées par rapport à l'axe de la barre sont appelées « verrous ». Les aspérités en creux sont appelées « empreintes ». Ces aciers sont dits à Haute Adhérence (HA) et ont couramment une limite élastique de 500MPa.

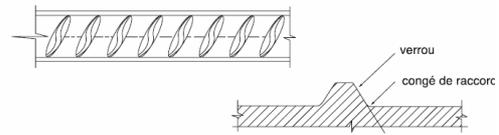


Figure n° 1: schéma d'un acier à verrous.

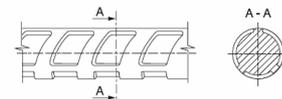


Figure n° 2: schéma d'un acier à empreintes.

Production des aciers pour béton

La haute limite d'élasticité peut être obtenue par différents moyens :

- en jouant sur la composition chimique, en particulier en augmentant la teneur en carbone. Ce type d'acier présente des inconvénients notamment dans les domaines de l'aptitude au façonnage et au soudage. Il est maintenant abandonné en Europe;
- par écrouissage, par étirage et ou laminage à froid de barres ou fils d'acier doux ;
- par traitement thermique (trempe et autorevenu) de barres ou fils d'acier doux. Les aciers se présentent sous forme de barres de grande longueur (souvent 12 m) ou de fils en couronnes.

Les cycles de productions utilisés aujourd'hui sont en annexe.

Les diamètres commerciaux des barres indépendantes sont (en mm)

6 8 10 12 14 16 20 25 32 40

En barres droites, les longueurs courantes de livraison sont comprises entre 12 et 18 m. Les treillis soudés sont livrés sous forme de panneaux de dimensions 2,40x6,00 pour la plupart. (voir annexe). Pour les barres de diamètre 6, 8, 10 et 12 mm, la livraison est également possible en couronne. Dans ce cas les armatures sont redressées à l'aide d'une machine appelée "redresseuse".

Normes et documents de définition

Les produits en acier pour béton armé sont essentiellement définis par des normes. Les nuances définies dans ces normes sont désignées par des lettres Fe E, Fe TE (acier tréfilé), TLE (acier à très haute limite élastique) suivies d'un nombre indiquant la valeur spécifiée de limite d'élasticité exprimée en MPa. Exemples : Fe E 235 ou Fe E 500.

De plus les barres et fils à haute adhérence, bénéficiant d'une homologation font l'objet d'une fiche d'identification.

Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques servant de base aux calculs des éléments de béton armé sont:

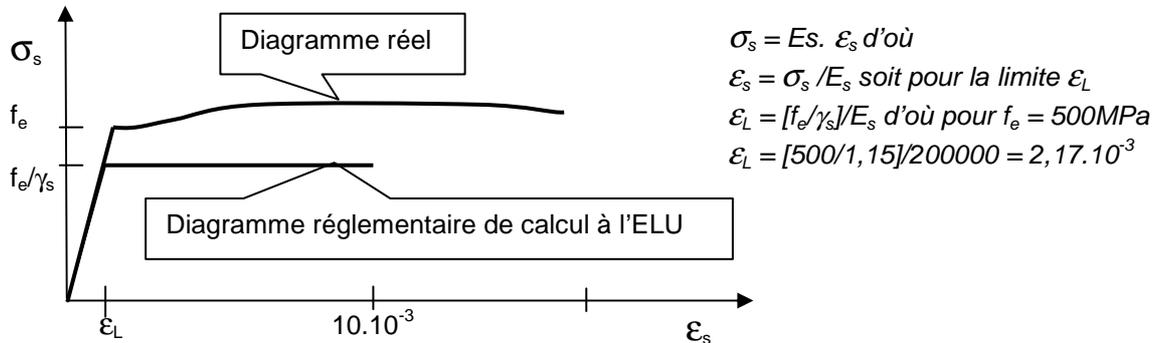
La **limite élastique** garantie notée f_e : Fe E 500 pour **$f_e = 500$ MPa**

Suivant les types d'acier, cette limite peut être apparente (acier doux, naturellement durs) ou fixée conventionnellement à $2 \cdot 10^{-3}$ d'allongement rémanent (fils tréfilés lisses).

Le **module d'élasticité** de l'acier est pris égal à **$E_s = 200.000$ MPa**

Le **diagramme contrainte déformation** de l'acier.

Comme pour le béton, il faut distinguer le diagramme contrainte - déformation réel du diagramme conventionnel de calcul à l'ELU qui sera utilisé pour le dimensionnement des éléments de béton armé.

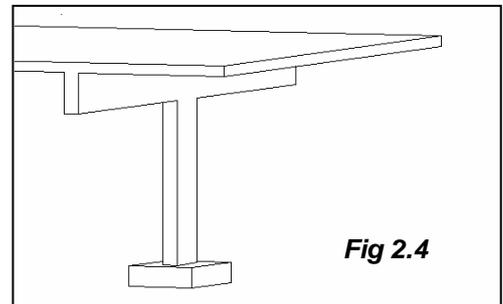


A l'ELU normal $\gamma_s = 1,15$ et à l'ELUU accidentel $\gamma_s = 1$

Fig.2.5 Diagramme expérimental contraintes – déformations en traction simple et diagramme conventionnel de calcul.

2.3. Application. Déformation d'un poteau en compression.

Un poteau en béton armé de section 30x40 supporte une charge verticale de 0,7 MN. Sa hauteur est de 2,50m. La résistance du béton est prise égale à $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$. Quel sera le raccourcissement à long terme de ce poteau (situé à Grenoble et dont le béton a plus de trois mois) ?



Solution :

La résistance du béton à $j > 60$ est prise, pour le calcul des déformations, égale à $f_{cj} = 1,1 \times 25 = 27,5 \text{ MPa}$

Le module d'Young à considérer est le module de déformation différée $E_{vj} = 3700 \cdot f_{cj}^{1/3} = 3700 \times 27,5^{1/3} = 11168 \text{ MPa}$

On applique la loi de Hooke (sans tenir compte de la présence des aciers) $\sigma_{bc} = E_{vj} \cdot \varepsilon_{bc}$ avec $\sigma_{bc} = 0,7 / (0,3 \times 0,4)$ et $\varepsilon_{bc} = dh / 2,50$ d'où $dh = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ soit 1,3 mm de déformation due à la charge.

Pour le retrait, le raccourcissement sera $3 \cdot 10^{-4} = dh / 2,50$ d'où $dh = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,75 \text{ mm}$

Le raccourcissement global est donc de $1,3 + 0,75 = \boxed{2,05 \text{ mm}}$

Annexe 1

Tableau des sections des barres indépendantes

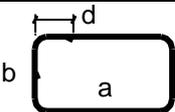
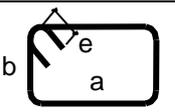
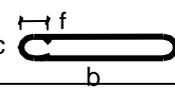
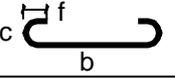
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
HA 6	0,28	0,57	0,85	1,13	1,41	1,70	1,98	2,26	2,54
HA 8	0,50	1,01	1,51	2,01	2,51	3,02	3,52	4,02	4,52
HA 10	0,79	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,50	6,28	7,07
HA 12	1,13	2,26	3,39	4,52	5,65	6,79	7,92	9,05	10,18
HA 14	1,54	3,08	4,62	6,16	7,70	9,24	10,78	12,32	13,85
HA 16	2,01	4,02	6,03	8,04	10,05	12,06	14,07	16,08	18,10
HA 20	3,14	6,28	9,42	12,57	15,71	18,85	21,99	25,13	28,27
HA 25	4,91	9,82	14,73	19,63	24,54	29,45	34,36	39,27	44,18
HA 32	8,04	16,08	24,13	32,17	40,21	48,25	56,30	64,34	72,38
HA 40	12,57	25,13	37,70	50,27	62,83	75,40	87,96	100,53	113,10

La masse volumique de l'acier est 7800kg/m^3

Annexe 3

Longueurs développées des cadres, étriers, épingles et U

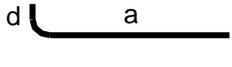
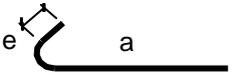
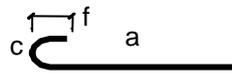
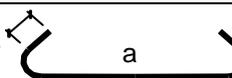
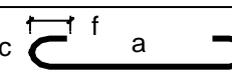
Longueurs développées pour des longueurs hors tout a, b, c, d, e, f en mm

		HA	6	8	10	12	14	16	20
		Diam. mandrin	32	40	50	63	80	80	160
Cadre avec retour à 90°		d =	92	108	135	164	194	216	300
		$L = 2(a+b) +$	113	124	156	187	217	249	307
Cadre avec retour à 135°		e =	72	78	85	104	124	136	200
		$L = 2(a+b) +$	103	102	103	125	151	164	248
Etrier		f =	72	78	85	104	124	136	200
		c =	44	56	70	87	108	112	200
		$L = 2b +$	191	214	243	299	367	388	648
Epingle		f =	72	78	85	107	124	136	200
		c =	44	56	70	87	108	112	200
		$L = b +$	175	195	218	269	327	350	565
U		$L = 2a + b$	28	37	46	56	68	73	117

Les crochets normalisés ont des retours droits de 10Φ pour un angle à 90° et de 5Φ pour un angle $\geq 135^\circ$

Longueurs développées des barres avec crochets

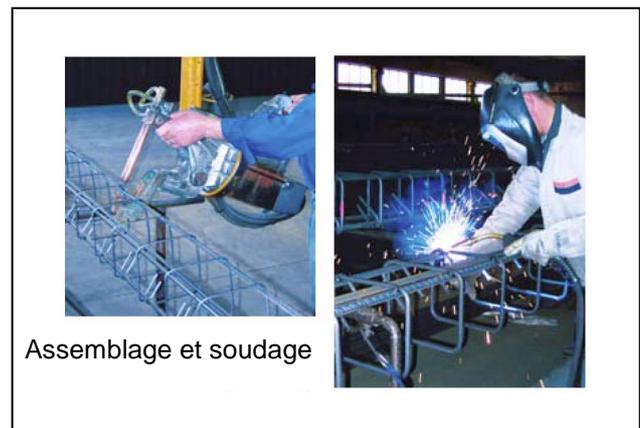
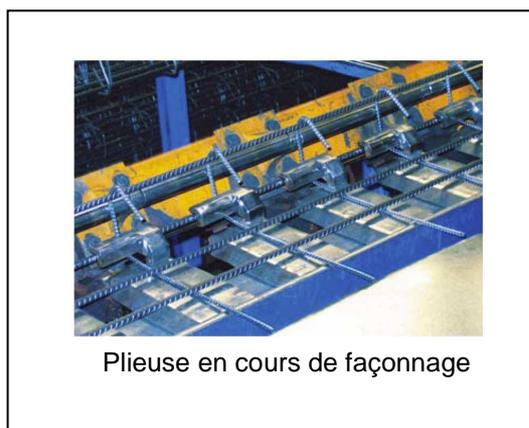
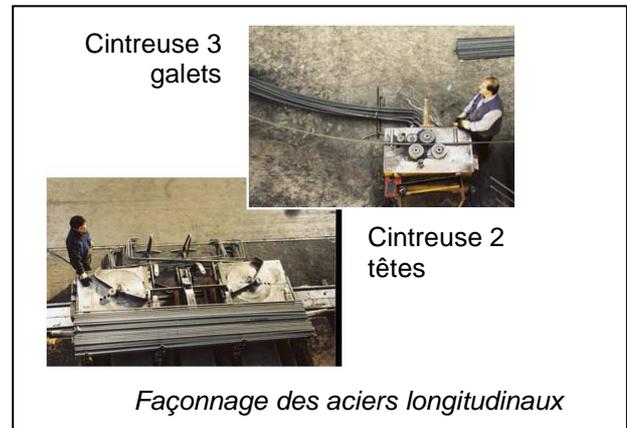
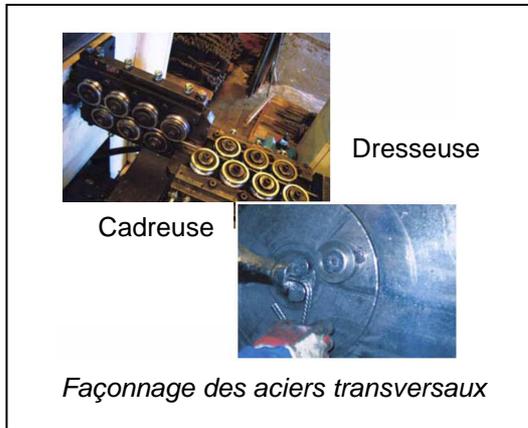
Longueurs développées L (en mm) pour un retour droit de 5Φ (minimum normalisé)

	HA	6	8	10	12	14	16	20	25	32	40
	Mandrin	63	80	100	125	160	160	200	250	320	400
	d = e = f =	65	84	105	129	157	168	210	263	336	420
	c	75	96	120	149	188	192	240	300	384	480
	$L = a +$	47	61	76	93	113	122	153	191	244	306
	$L = a +$	74	96	120	147	181	191	239	299	383	478
	$L = a +$	101	130	163	201	249	260	326	407	521	651
	$L = a +$	93	122	153	186	225	244	306	382	489	611
	$L = a +$	148	191	239	294	362	383	478	598	765	957
	$L = a +$	202	260	326	401	499	521	651	814	1042	1302

Annexe 4

Façonnage et assemblage des armatures

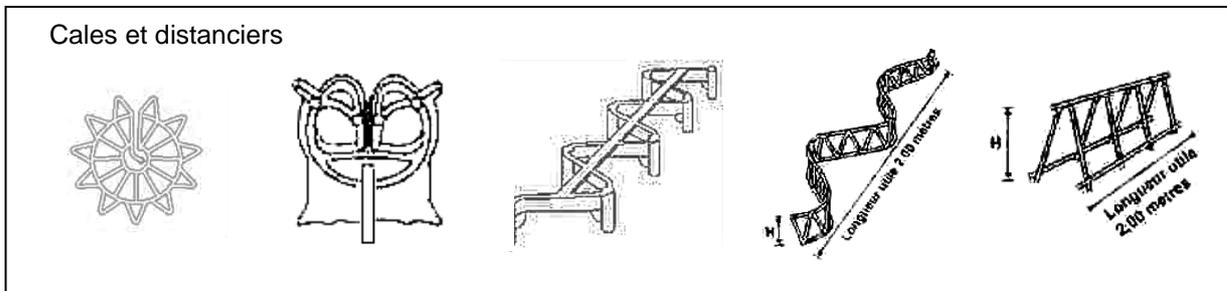
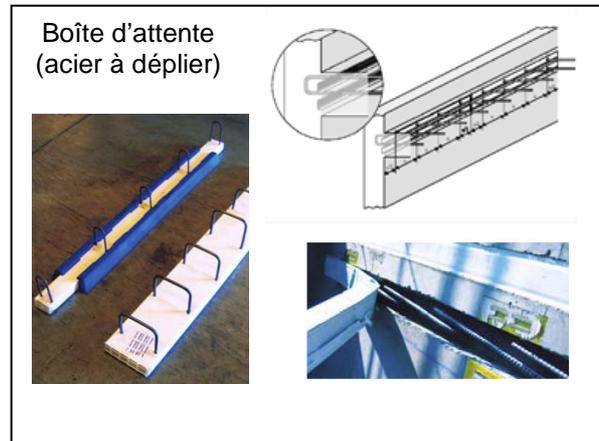
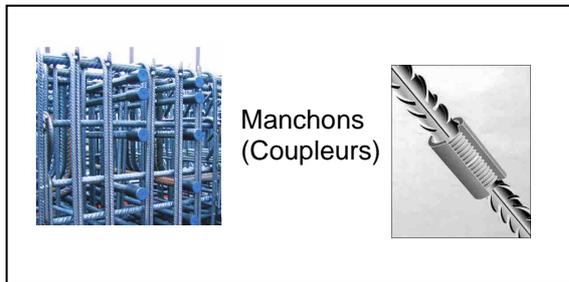
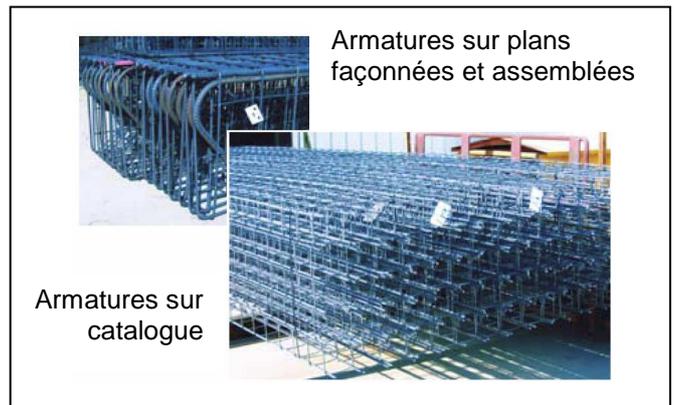
Images Cimbéton



Annexe 5

Armatures de béton armé

Images Cimbéton



Annexe 6

Fabrication des aciers

