

II. Les ciments,

II.1 Introduction :

Le ciment occupe la première place parmi les liants servant à lier les matières solides tels que les granulats et pierres.

Le ciment gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit. Après durcissement, Il conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau.

II.2 Bref historique du ciment

Les Grecs sont les premiers constructeurs à employer la chaux obtenue par cuisson du calcaire. Et les Romains améliorent la technique de la chaux en y ajoutant des cendres volcaniques et des briques pilées et obtiennent ainsi un liant hydraulique, intermédiaire entre une chaux et un véritable ciment.

En 1817, le Français Louis Vicat, découvrit les principes chimiques des ciments et définit leurs règles de fabrication. Aussi en est-il considéré comme l'inventeur bien qu'il n'est pas déposé de brevet.

L'Anglais Joseph Aspdin fait breveter en 1824 le ciment "Portland", obtenu à partir d'un procédé de calcination combinant la cuisson de calcaire et d'argile dans des fours alimentés au charbon. La dénomination "Portland", due simplement à la similarité de couleur et de dureté avec la pierre de Portland (Sud de l'Angleterre), est à l'heure actuelle toujours employée dans l'industrie.

II.3 Principe de fabrication ciment portland :

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau :

1. Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
2. Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
3. Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
4. Fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).

La fabrication de ciment se fait en six étapes principales :

- 1/ l'extraction des matières premières (Argile et calcaire);
- 2/ l'homogénéisation et dosage;
- 3/ le séchage et le broyage ;
- 4/ la cuisson (calcination) dans le four;
- 5/ le refroidissement ;
- 6/ le broyage.

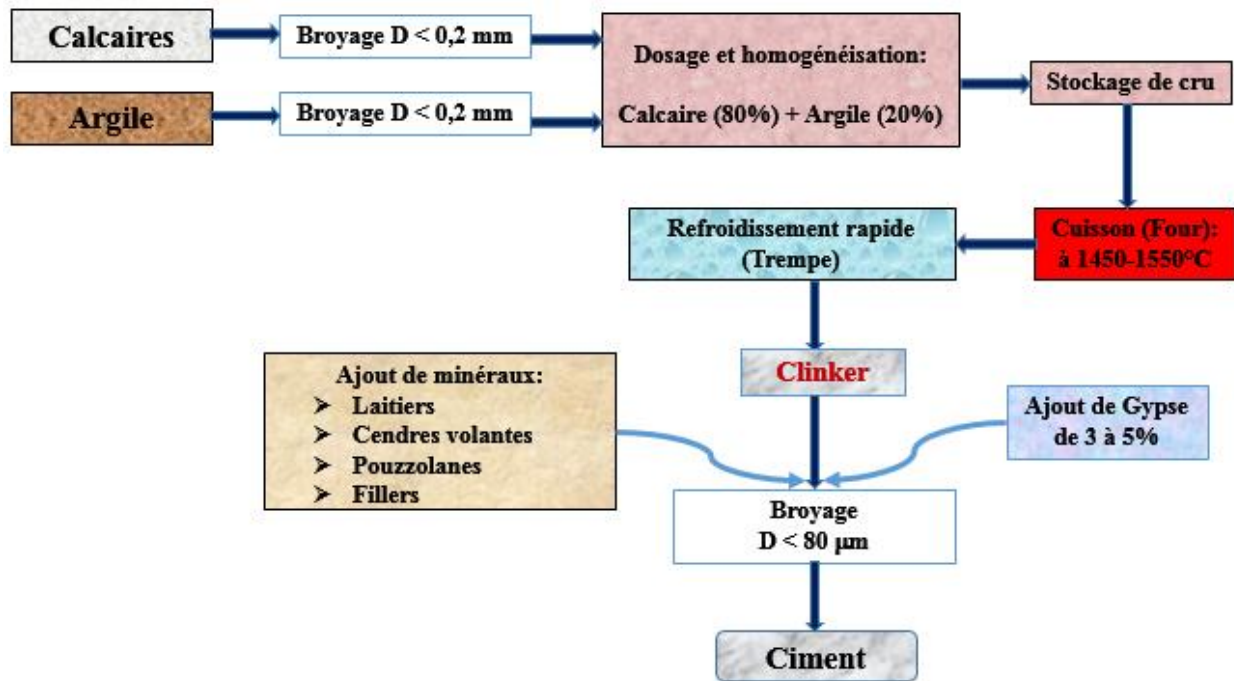
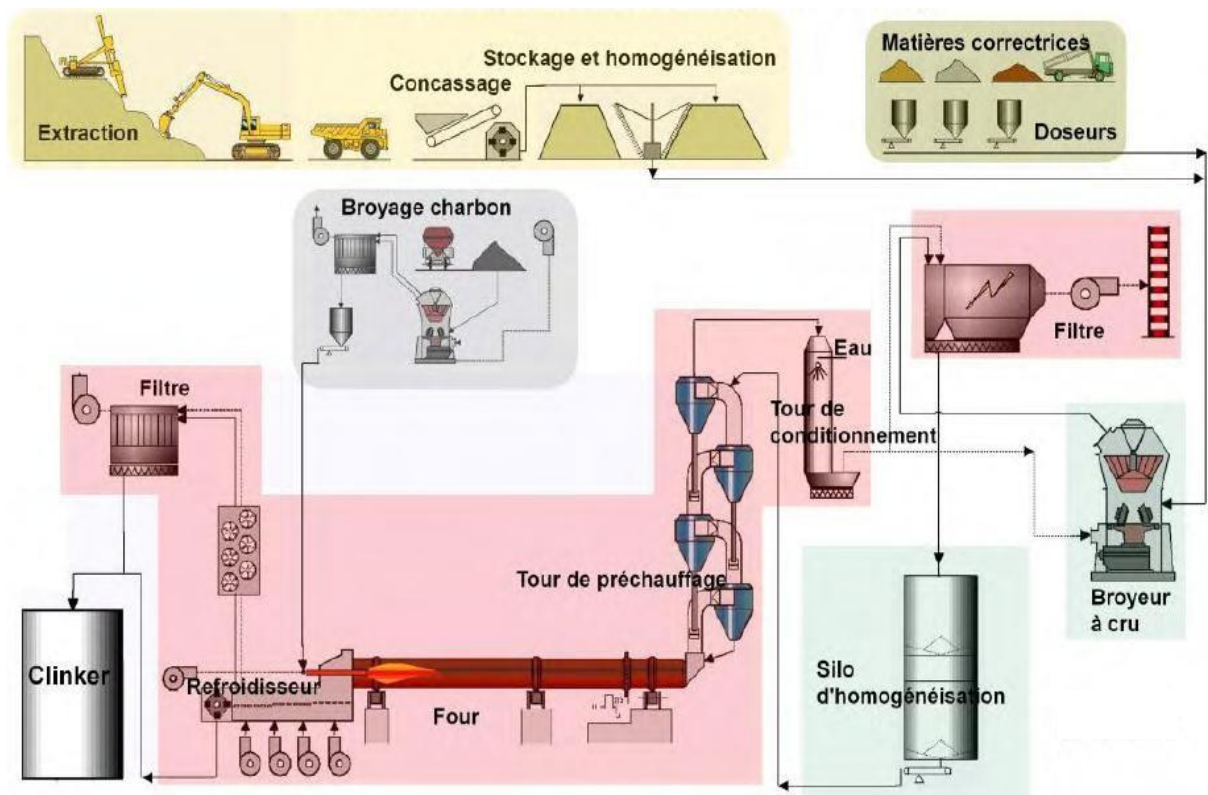


Schéma de la fabrication du ciment



Différentes étapes de fabrication du ciment

II.4 Constituants principaux et additions :

II.5 Constituants du clinker:

À la sortie du four le clinker est composé de :

- Le silicate tricalcique $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$ ($\text{C3S} = 50-70\%$ du clinker) , Alite.

- Le silicate bicalcique 2CaO , SiO_2 ($\text{C}_2\text{S} = 10\text{-}30\%$ du clinker), Bélite.
- L'aluminate tricalcique 3CaO , Al_2O_3 ($\text{C}_3\text{A} = 2\text{-}15\%$ du clinker), célide.
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique) 4CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ($\text{C}_4\text{AF} = 5\text{-}15\%$ du clinker), Férite.

II.6 Ajouts cimentaires

Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute des quantités d'ajouts afin de modifier ces propriétés hydrauliques, pouzzolaniques et physiques (accroissement de la compacité).

Exemple on ajoute le gypse (max = 5%) pour régulariser la prise du ciment.



Ajouts cimentaires

II.7 Classification et Caractéristiques des ajouts cimentaires

Selon la norme NF EN 206-1, il existe deux types d'addition:

🔴 Les additions de type I:

Ce sont des matériaux quasiment *inertes*, organiques, naturels ou synthétiques qui, par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment portland (maniabilité, Compacité etc....). Parmi ces additifs on distingue :

1/ Fillers :

Ce sont des matières minérales obtenus par broyage de certaines roches (calcaires, Basaltes, laitiers, Bentonites, ...). Ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment.

2/ Calcaires (*L*; *LL*) :

Il s'agit de calcaire finement broyé dont la quantité de carbone organique est limitée :

- $L : \leq 0,20\%$
- $LL : \leq 0,50\%$

🔴 Les additions de type II:

Ce sont des matériaux finement broyés à caractère inorganique, pouzzolanique ou hydraulique latent. Parmi ces additifs on distingue :

1/ Cendres volantes (*V*, *W*) *Fly ash* :

Elles sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les fumées des chaudières alimentées au charbon pulvérisé.

- Les cendres volantes peuvent être de nature siliceuse (V) ou calcique (W).



Cendre volante

2/ Fumée de silice (D):

Elle provient de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique. La proportion de fumée de silice dans le ciment est limitée à 10 % en masse, selon NA 442 et EN 197-1 (NA 442, 2000 ; EN 197-1, 1996).



Fumée de silice

3/ Laitier *granulé* des hauts fourneaux (S):

Obtenu par refroidissement rapide (trempe) du laitier fondu. Les particules de laitier, dont le diamètre est inférieur à 10 μm , contribuent à la résistance du béton aux jeunes âges. Les particules dont les diamètres sont compris entre 10 et 45 μm contribuent au développement des résistances ultérieures.



Laitier granulé de haut fourneau avant broyage

Les ciments aux laitiers résistent mieux aux agressions chimiques (attaques sulfatiques, chlorure).

4/ Pouzzolanes naturelles (P, Q):

Ce sont des substances naturelles siliceuses ou silico-alumineuses. Elles se présentent en deux sortes :

- ✓ Des substances d'origine volcanique (verre volcanique, ponce, rhyolite, tuf, zéolite).

- ✓ Des argiles et des schistes activés thermiquement (calcinés).
- Elles sont naturellement actives (P) ou activées thermiquement (Q).



Pouzzolane naturelle

5/ Schiste calciné (T) :

Le schiste calciné, et en particulier le schiste bitumineux calciné, est produit dans un four à une température d'environ 800°C. En raison de son mode de fabrication, il contient des phases de clinker et des oxydes à caractère pouzzolanique.

6/ Méta kaolin :

Le méta kaolin est obtenu par calcination d'argile kaolinitique ($T^\circ = 650$ et 850°C), suivie d'un broyage permettant d'atteindre une finesse très élevée. Le matériau obtenu présente une pouzzolanité élevée et peut être considéré comme une addition très active.

Remarque : en fonction de la nature des constituants utilisés et de leur dosage, **il existe une grande variété de types de ciments.**

II.8 Les principales catégories de ciment portland :

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale. Suivant leur nature et leur proportion, 27 familles de produits réparties en 5 types.

II.9 Classification des ciments en fonction de leur composition :

Les normes NA 442 et EN 197-1 définie cinq grandes catégories (types) de ciments courants. Ils sont classés en fonction de leur composition, Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne:

- ☛ **CEM I** : Ciment portland pur (CPA - dans la notation française),
- ☛ **CEM II** : Ciment portland composé (CPJ),
- ☛ **CEM III**: Ciment de haut fourneau (CHF),
- ☛ **CEM IV** : Ciment pouzzolanique (CPZ),
- ☛ **CEM V** : Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

Tableau 1 : Différents types de ciment et leur composition

	CEM I	CEM II /A	CEM II /B	CEM II /A-M	CEM II /B-M	CEM III /A	CEM III /B	CEM III /C	CEM IV /A	CEM IV /B	CEM V /A	CEM V /B
Clinker portland (K)	95-100	80-94	65-79	80-94	65-79	35-64	20-34	5-19	65-89	45-64	40-64	20+48
Calcaire (LL)		6-20	21-35	6-20	21-35							
Laitier de haut fourneau (S)						36-65	66-80	81-65			18-30	31-50
Fumée de silice (D)									11-35	36-55		
Pouzzolanes naturelles (P)											18-30	31-50
Cendres volantes siliceuses (V)												
Schistes calcinés (T)												
Gypses (CS)	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5

II.10 Classification des ciments en fonction de leur résistance normale :

Trois classes de résistance normale sont couvertes: **32,5, 42,5 et 52,5**

- ✓ Pour chaque classe de résistance normale, une sous-classe de résistance aux jeunes âges est définie (L, N et R).
- ✓ Pour tous les types de ciments, la résistance à la compression, déterminée selon EN196- 1 (résistance en compression sur éprouvette normée) doit satisfaire aux spécifications du tableau suivant.

Tableau 2 : Spécification physiques et mécaniques des ciments (EN 197-1)

Classe de résistance	Résistance à la compression MPa				Temps de début de prise min	Stabilité (expansion) mm
	Résistance à court terme		Résistance courante			
	2 jours	7 jours	28 jours			
32,5 N	---	= 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≥ 10
32,5 R	≥ 10,0	---				
42,5 N	≥ 10,1	---	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 20,0	---				
52,5 N	≥ 20,1	---	≥ 52,5	---	≥ 45	
52,5 R	≥ 30,0	---				

II.11 Principales Propriétés du ciment :

II.12 Propriétés physiques

II.13 Masse volumique apparente

Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus). Elle est en moyenne de 1 000 kg/m³.

II.14 Masse volumique absolue

Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de 2 900 à 3 150 kg/m³ suivant le type de ciment.

II.15 Finesse de mouture (Surface spécifique)

L'hydratation du ciment commence sur la surface des grains, donc c'est la superficie totale des grains qui représente le matériau disponible pour l'hydratation. La vitesse d'hydratation dépend donc de la finesse des grains de ciment. Pour avoir une hydratation rapide et une résistance élevée à court terme, une finesse importante du ciment est exigée.

La finesse de mouture (finesse de Blaine) est exprimée en (cm^2/g) et déterminée par la méthode de Blaine « **Perméabilimètre de Blaine** », conformément à la norme NF EN 196-6. Sa valeur est généralement comprise entre 2 800 et 5 000 cm^2/g .

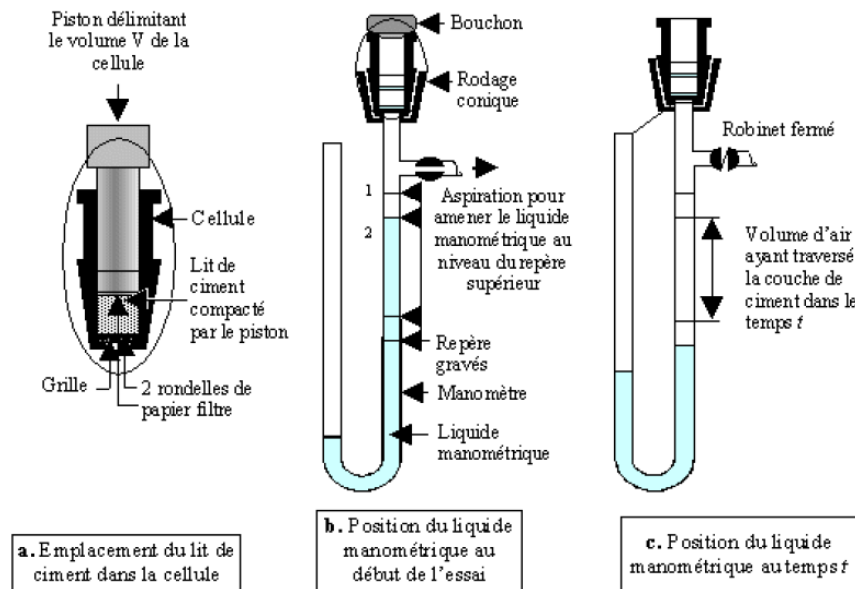
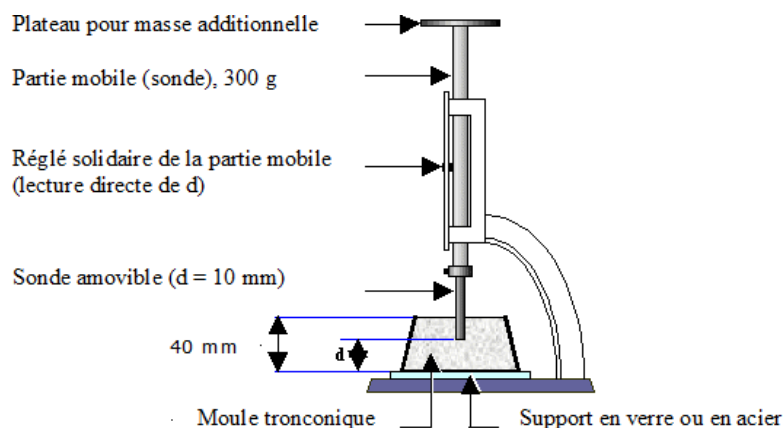


Schéma de perméabilimètre de Blaine

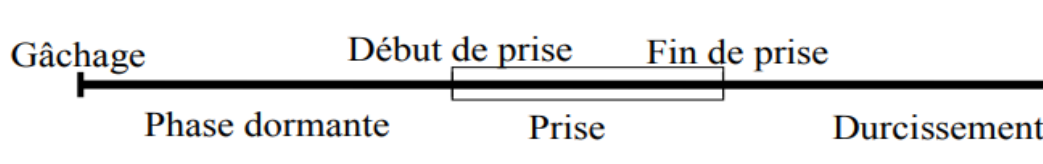
II.16 La consistance :

La consistance est le pourcentage optimal d'eau qui permet d'obtenir une pâte de ciment de consistance normale. On utilise généralement l'appareil de "Vicat" pour mesurer cette consistance et selon la norme NF EN 196-3 : 2017.



Appareil Vicat**Détermination du temps de début et fin de prise****Début et fin de prise :**

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps.



Le **début et fin de prise** de ciment sont déterminés par l'Appareil de Vicat.

- ☛ **Début de prise** : correspond au moment où l'on observe une augmentation de la **viscosité**, ou raidissement de la pâte. C.à.d. le changement d'un état fluide de la pâte cimentaire à un état plastique.
- ☛ **Fin de prise** : correspond au moment de la transformation progressive de la pâte de ciment en un bloc rigide.

Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres :

- ☛ Type du ciment,
- ☛ Finesse de mouture du ciment; plus la finesse est élevée, plus le temps de prise est court,
- ☛ Température ambiante; alors qu'à zéro degré la prise est stoppée, plus la température est élevée plus la prise est rapide.
- ☛ L'excès d'eau de gâchage à une action retardatrice sur la prise

II.17 Le durcissement :

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment. Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter.

II.18 Le retrait :

Le retrait est la diminution du volume apparent de la matière ; il est mesuré sur des éprouvettes, de mortiers normalisés, de dimensions : $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, conservées à l'air de température $T = 20^\circ\text{C}$ et d'humidité relative de 80%.

Il existe plusieurs types de retrait :

- ☛ Retrait avant prise dû essentiellement à la perte prématurée d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation.
- ☛ Retrait hydraulique, qui découle d'une part de la contraction Le Chatelier (le volume des hydrates est inférieur au volume des constituants de départ).
- ☛ Retrait thermique, qui est dû à la contraction du mortier lors de son refroidissement.

L'importance du retrait hydraulique, en général, est en fonction de nombreux paramètres parmi lesquels :

- ✓ La nature du ciment;
- ✓ Le dosage en eau, rapport E/C ;
- ✓ La propreté des sables.
- ✓ La forme et la dimension des granulats.

II.19 Expansion (gonflement):

Les volumes des pâtes de ciment, les mortiers et les bétons gonflent en présence d'humidité ou d'eau. L'expansion est mesurée selon NF EN 196-3, on utilisant le même appareil que celle du retrait. Les principales causes de l'expansion sont :

- Excès de gypse,
- Excès de la chaux libre (CaO).
- Excès de magnésium libre (MgO).

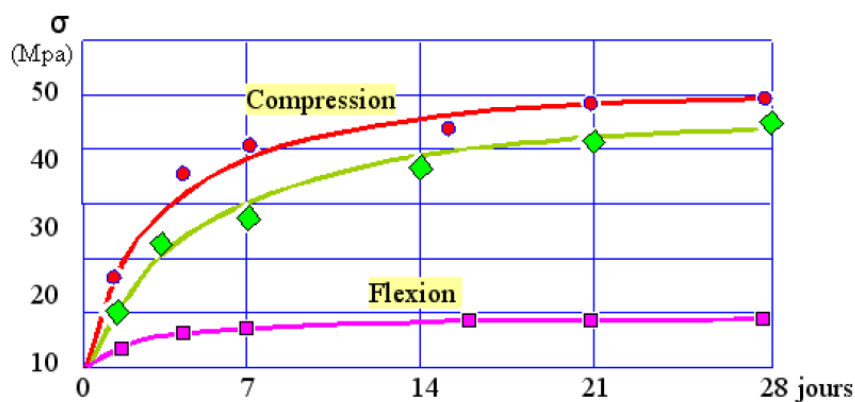
II.20 Propriétés mécaniques

Les résistances mécaniques des ciments, en compression, en traction par flexion, sont déterminées sur des éprouvettes ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) en mortier normal à 28 jours d'âge. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Les figures 3.9 (a) et (b) montrent l'évolution des résistances des différents produits d'hydratation du ciment.

II.21 Résistance à la compression :

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier normalisé, à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) et conformément à la norme EN 196-1. Elles sont exprimées en (MPa).

Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales.



Résistances d'un mortier normal

II.22 Nomenclature et emplois des ciments

La gamme étendue de compositions, de résistances, de vitesse de prise et de durcissement répond aux usages très divers qui sont faits du béton sur chantier ou en usine, pour la réalisation de bâtiments, ou de structures de génie civil.

II.23 Principe de dénomination normalisée

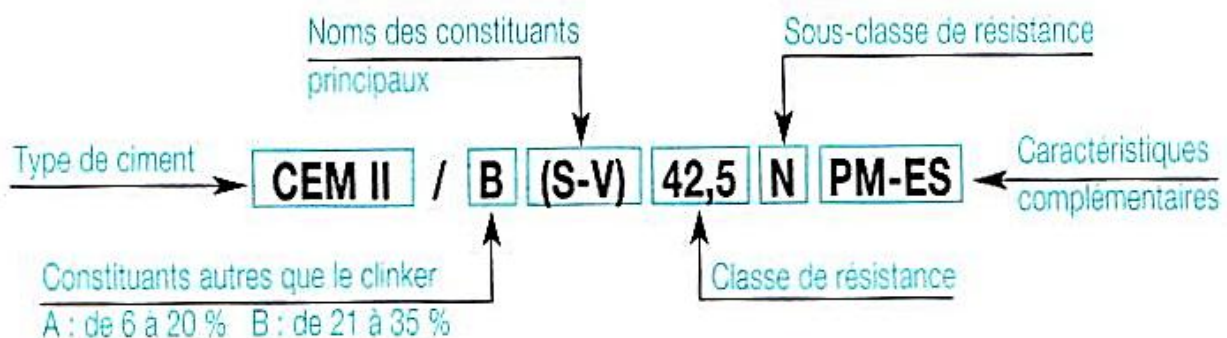
La dénomination d'un ciment suit le principe suivant :

- 1- type de ciment : CEM I à CEM V
- 2- classe de ciment : A, B ou C suivant les proportions de clinker
- 3- nombre de constituants autre que le clinker : rien = un seul constituants - M = au moins deux constituants
- 4- la nature des constituants autres que le clinker
- 5- la classe de résistance à long terme du ciment (32,5 - 45 - 52,5 MPa)
- 6- la classe de résistance à court terme du ciment : L = faible - N = normale ou ordinaire - R = élevée
- 7- la certification CE
- 8- les spécifications complémentaires : PM = Ciment Prise Mer = pour travaux à la mer - ES = Ciment pour travaux en Eaux à haute teneur en Sulfates - CP1 ou CP2 = Ciment à teneur en sulfures limitée pour bétons précontraints.
- 9- le marquage NF

II.24 Nomenclature des ciments

La nomenclature des ciments se fait suivant deux critères principaux :

- ☛ La résistance mécanique à 28 jours
- ☛ La teneur en clinker



Avec:

- 1- Teneur en clinker (**K**), constituant principale du ciment:
Plus élevée (**A**), moins élevée (**B**) ou faible (**C**).
- 2- Constituant secondaires :
Laitier de haut fourneau (**S**),
Calcaire (**L**, **LL**),
Fumée de silice (**D**),
Pouzzolane : Naturelle (**P**) ou naturelle calciné (**Q**),
Cendres volantes : siliceuse (**V**) et calcique (**W**),
Schiste calciné (**T**),

- 3- Développement de la résistance à court terme : Normale (**N**) et Rapide (**R**).
- 4- Classe de résistance à la compression à 28 jours en MPa : **32,5 , 42,5 et 52,5**.
- 5- Caractéristiques particulières (Norme EN 197-1) :
 - Chaleur d'hydrations modérée (**LH**, Low Heat),
 - Ciment résistant aux sulfates (**SR**).
 - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (**ES**, suivant NF P 15-319),
 - Ciments pour travaux à la mer (**PM**),
 - Ciments à teneur en sulfures limités pour béton précontraint (**CP**, suivant NF P 15-318).
- 6- Marquage et certifications :
 - Conformité européenne réglementaires (**CE**),
 - Marque de certification Algérienne (**NA**)
 - et Marque de certification française délivrée par AFNOR (**NF**).

CEM II /A - LL 32,5 R CE CP2 NF

- CEM II : Ciment de type 2
- A : Contenant 80 à 94% de clinker
- LL : contenant 6 à 20% de fine calcaire à moins de 0,5% de carbone organique
- 32,5 : de 32,5 de résistance caractéristique à 28 jours
- R : à durcissement rapide
- CE : possède un certificat de conformité CE
- CP2 : à teneur en sulfate limitée
- NF : certifié conforme à la marque NF.



II.25 Choix des ciments.

Le choix du ciment le plus approprié dépend des exigences climatiques, résistance à des agents agressifs.

- ✓ Dans les travaux en maçonnerie (mortiers de joints, d'enduits). Il est préférable d'utiliser au mieux des ciments à maçonner ou encore des mortiers bâtards à la chaux hydraulique.
- ✓ Pour le béton armé (ossatures, ouvrages d'art...) les liants les plus indiqués sont les **ciments portlands artificiels ordinaires**.
- ✓ Pour les travaux en fondation ou en souterrain, surtout si le milieu est agressif, les ciments les plus utilisés sont les **ciments de laitier, ternaires et sur sulfatés**.
- ✓ Pour les ouvrages massifs (barrages), il faut utiliser des portlands à faible chaleur d'hydratation tels que les ciments siliceux faible en alumine, les **ciments à base de laitier, les ciments ternaires et les ciments pouzzolaniques**.

- ✓ Pour les travaux en prise à la mer les ciments utilisés sont les **ciments alumineux** on peut utiliser également des portlands artificiels spéciaux dont la teneur en aluminat tricalcique est limitée, et les **ciments à base de laitier, ternaïres, pouzzolaniques**.

II.26 Utilisation des ciments

En Algérie, Le Groupe GICA produit le Ciment Portland, pour répondre aux besoins du secteur de la construction et du BTP.

<p>CEM II 32,5 :</p> <p>Ce ciment est idéal pour les travaux courants de maçonnerie.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Crépissage de mur. - Chape 	
<p>CEM II 42,5 N ou CEM II 42,5 R :</p> <p>Il convient pour la fabrication de mortiers et tous travaux de béton armé, développant des résistances moyennes.</p> <p>Il est aussi utilisé dans le secteur du bâtiment (Habitations, Immeubles administratifs et d'écoles).</p>	
<p>CEM I 52.5 N</p> <p>Il est utilisé pour les grands travaux nécessitant une haute résistance.</p>	
<p>CEM II 42.5 SR 5 et CEM II 42.5 SR 3</p> <p>Le Ciment CRS (ciment résistant aux sulfates) est constitué de : 95% de clinker, des constituants secondaires (de 0 à 5%) peuvent être incorporés dans ce ciment et du sulfate de calcium sous forme de gypse est rajouté en tant que régulateur de prise.</p>	

II.27 Normalisation

Les ciments possédant des caractéristiques font l'objet de normes spécifiques :

- ☛ Ciments pour travaux à la mer (PM) : **Norme NF P 15-317** ; 2010
- ☛ Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (ES) : **Norme NF P 15-319** ;

- ☛ Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint (CP) : **Norme NF P 15-318**;
- ☛ Ciments de haut fourneau à faible résistance à court terme : **Norme NF EN 197-4** ;
- ☛ Ciments sursulfatés (CSS) : **Norme NF P 15-313**.

- ☛ **NF EN 196-1**, "Méthodes d'essais des ciments – partie 1 : Détermination de la résistance", 1996, 31 p.
- ☛ **NF EN 196-3**, "Méthodes d'essais – partie 3 : détermination du temps de prise et de stabilité", 1996, 13 p.
- ☛ **NF EN 196-6**, "Méthodes d'essais des ciments – partie 6 : détermination de la finesse", 1996, 17 p.
- ☛ **NF EN 197-1, Avril 2012** : Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

La norme **NF EN 197-1** est subdivisée en trois rubriques :

- 1- Une partie descriptive qui définit les constituants du ciment et délimite les différents types de ciments ;
 - 2- Une partie qui fixe les classes de résistance, les spécifications mécaniques et physico chimiques ;
 - 3- Une partie consacrée aux critères de conformité, aux procédures de vérification et aux seuils de garantie.
- ☛ **NA 442**, "Liants hydrauliques – Ciments courants : Composition, spécifications et critère de conformité", IANOR, Alger, 2000, 30p.

I. Référence Bibliographiques