

Le Contenu de chapitre 3:

Dans ce chapitre, nous étudierons en détail le matériau de construction qu'est le ciment. Tout d'abord, nous aborderons les différents modes de fabrication du ciment portland .

En suite , nous verrons quels sont les constituants principaux du clinker, composant essentiel du ciment, ainsi que les autres constituants du ciment tels que les calcaires, le laitier, les fillers etc...

Ensuite, nous classifierons les ciments suivant leur composition et leur résistance .

Enfin, nous étudierons les caractéristiques physiques et mécaniques du ciment portland telles que, la prise, le retrait, la résistance à la compressionetc.

Dans la rubrique Expériences, nous décrirons quelques essais qui vous permettront de mesurer en laboratoire les caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.

III.1.Généralité :C'est le matériau du 20^{ème} siècle, l'anglais Joseph Aspdin qui en 1824 fait breveter le ciment Portland. Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 – 1550 °C, température de fusion. Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante.

III.2 Principe de fabrication ciment portland :La fabrication de ciment se réduit aux trois opérations suivantes:

- préparation du cru
- cuisson
- broyage et conditionnement

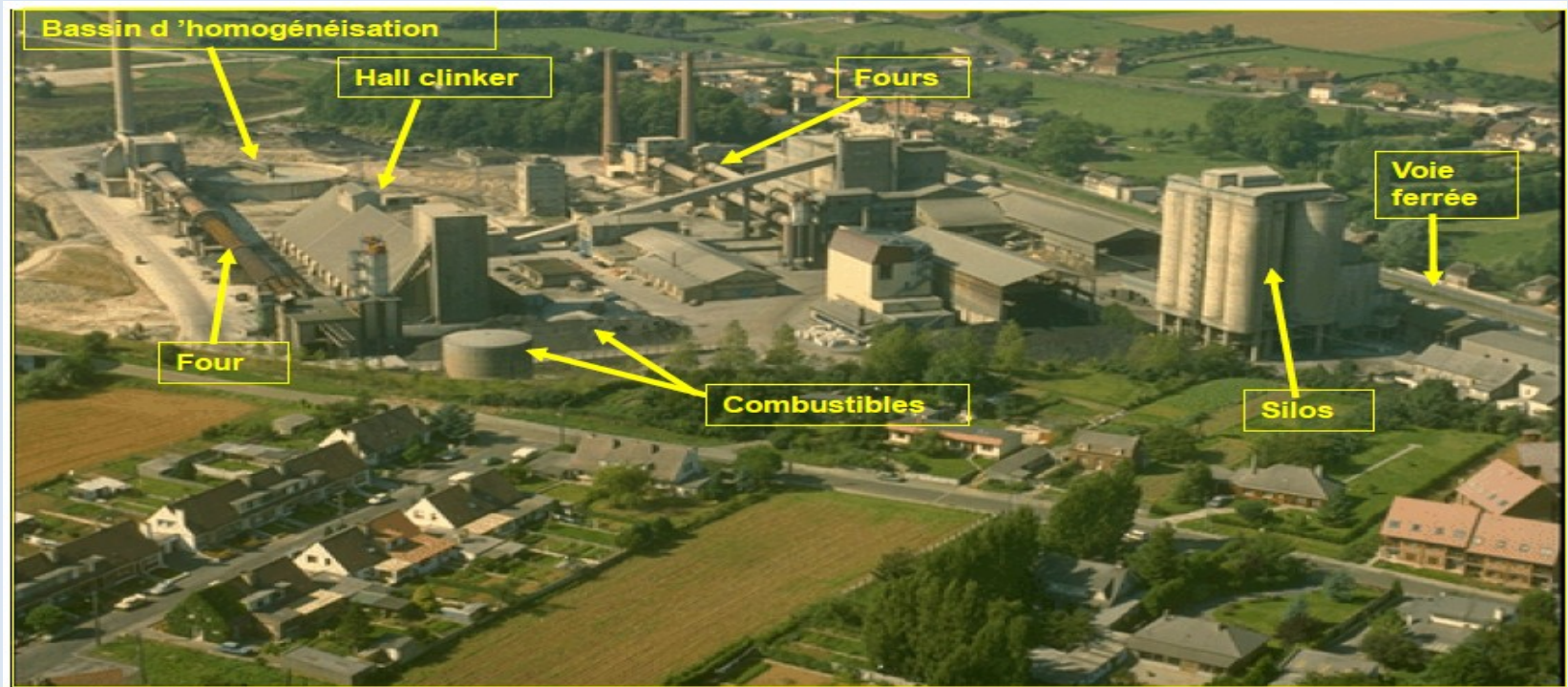
le constituant principal du ciment est le clinker qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié 80% de calcaire et 20% d'argile, Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau: voie humide , voie semi-humide , voie sèche , voie semi-sèche

La composé de base des ciments est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), et l'oxyde de fer (Fe_2O_3). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés.

Donc le principe de la fabrication du ciment est le suivant: calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température ($1450\text{ }^\circ\text{C}$) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker.

Un mélange d'argile et de calcaire est chauffé. Au début, on provoque le départ de l'eau de mouillage, au delà de $100\text{ }^\circ\text{C}$. A partir de $400\text{ }^\circ\text{C}$ commence la composition en gaz carbonique (CO_2) et en chaux (CaO), du calcaire qui est le carbonate de calcium (CaCO_3).

Le mélange est porté à 1450-1550 °C, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions.

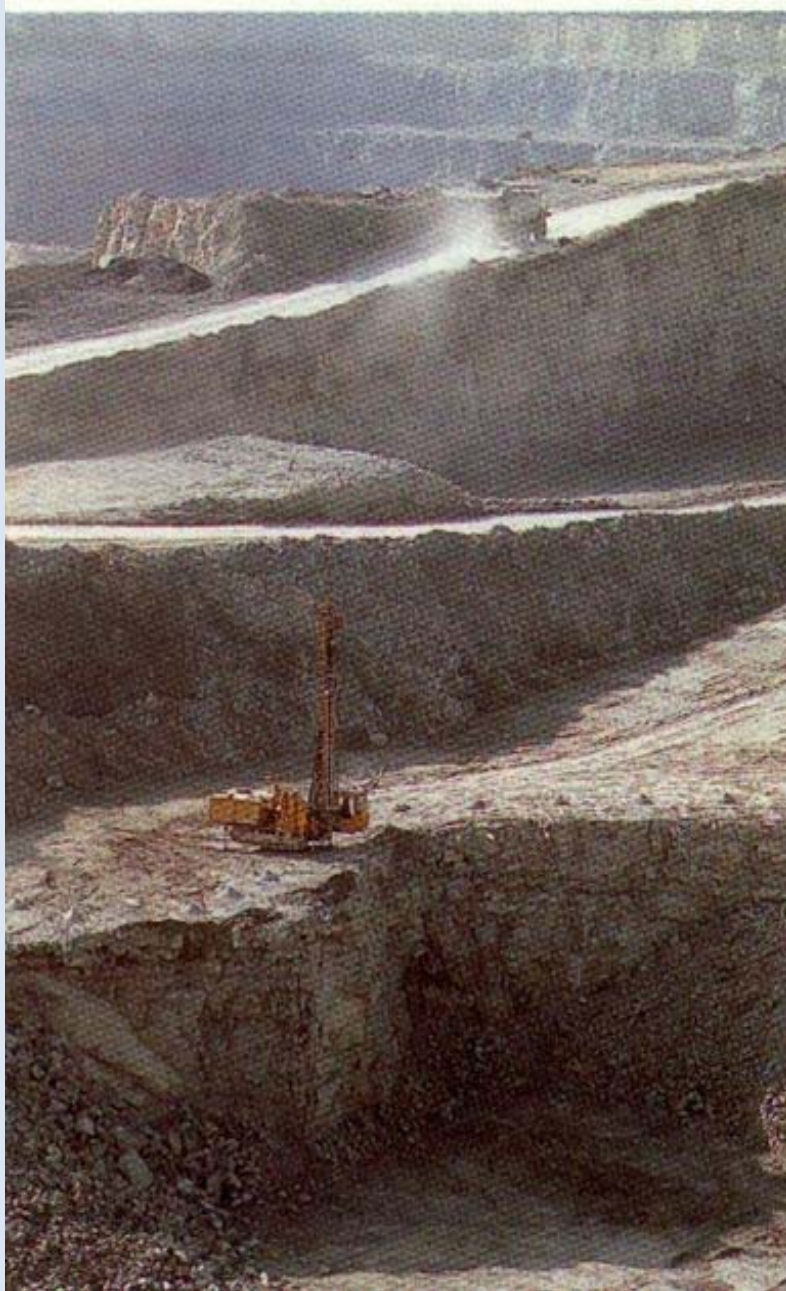


Vue aérienne d'une cimenterie

a.Extraction et concassage:

Les matières premières sont extraites de carrières généralement à ciel ouvert.

On a recours actuellement à l'utilisation d'explosifs (tirs de mine) pour faciliter l'extraction de la roche.



Les blocs obtenus sont transportés vers l'atelier de concassage et réduits dans en éléments d'une dimension maximale de 50 mm. Ces concasseurs sont situés parfois sur les lieux même de l'extraction.

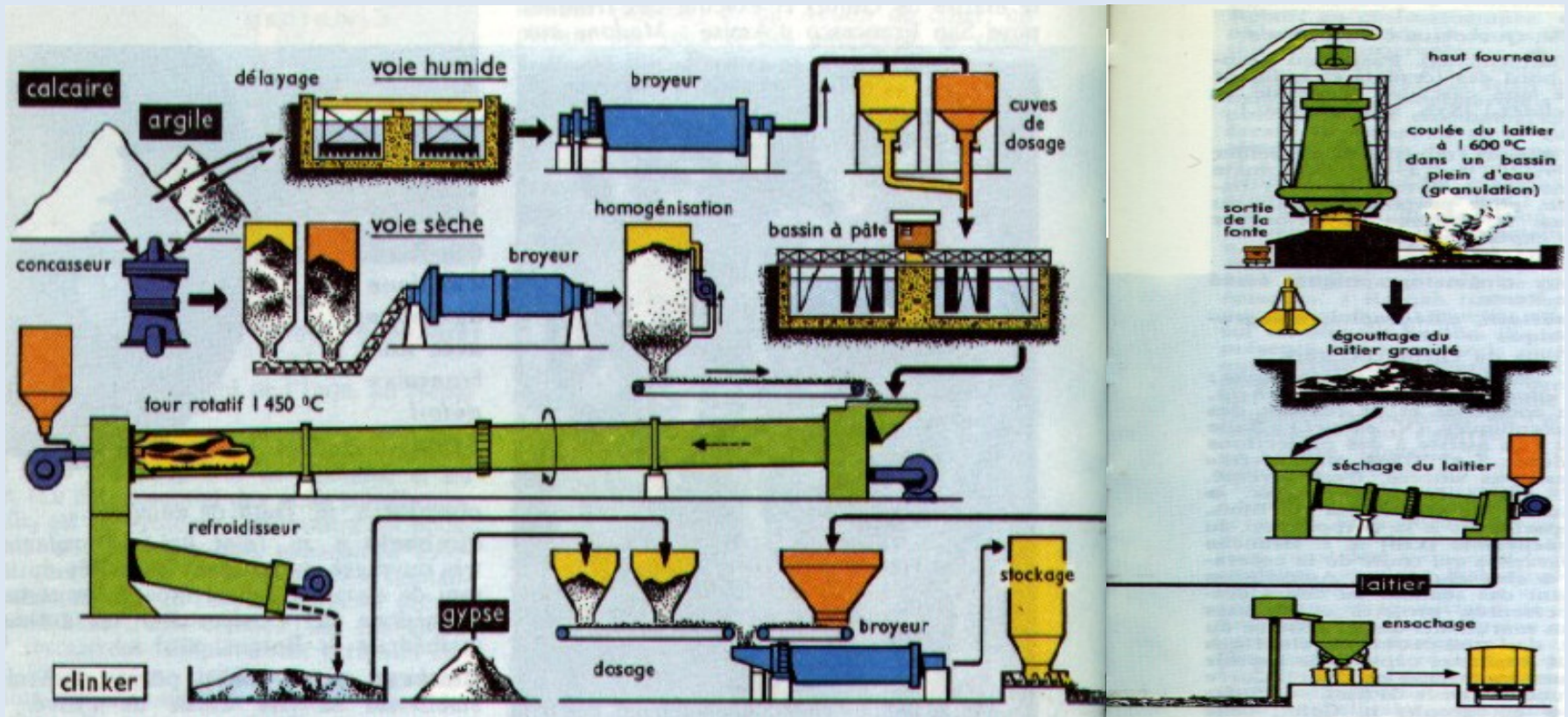


b. préparation de la matière première: Les grains de calcaire et d'argile sont mélangés par broyage et délayage, dans les proportions définies, en un mélange très fin . A cette occasion, des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant des ajouts en faible proportion: oxyde de fer,...). Le cru est préparé automatiquement sous forme de poudre(voie sèche) ou de pâte (voie semi-humide ou humide), en fonction de la technique de fabrication utilisée.

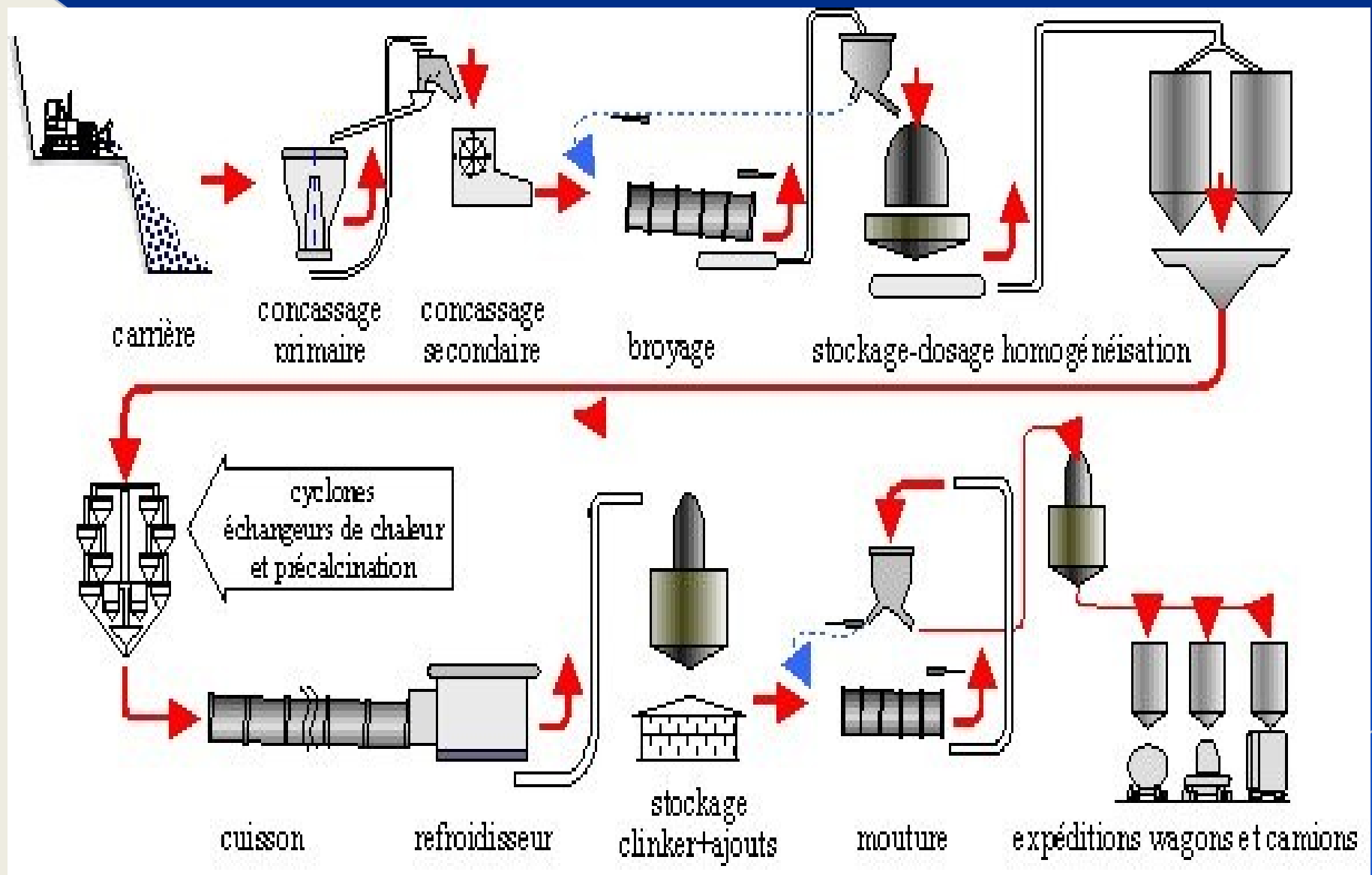
i.Voie sèche: est la technique la plus utilisée aujourd'hui. La matière première est préparée sous forme de poudre. La préhomogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des deux constituants essentiels du ciment .



A la sortie du hall, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs, qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre .

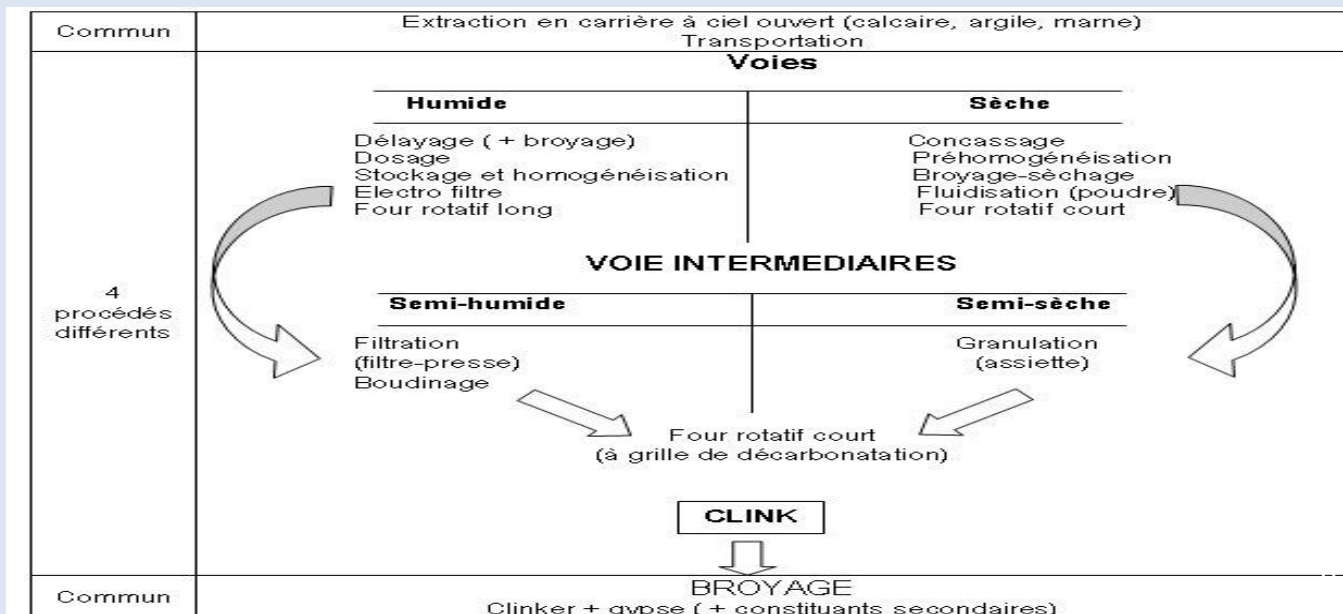


Cette poudre "le cru", est une nouvelle fois homogénéisé par fluidisation, corrigée si nécessaire puis stockée en silo avant introduction au four. L'homogénéisation et le stockage sont réalisés dans la même tour qui comporte à sa partie supérieure un silo d'homogénéisation dans lequel le cru est brassé par air comprimé, il est ensuite stocké dans le silo à la partie inférieure de la tour.



ii. Autres techniques de préparation de la matière : Les autres techniques de préparation sont moins employées. Elles consistent à agglomérer la matière sous forme de granules (voie semi-sèche) ou à la transformer en une pâte fluide (voie semi-humide ou humide).

iii. Voie humide : Les blocs sont déversés dans un bassin de délayage (alimenté d'eau), à l'intérieur duquel tourne qui divise la matière. La pâte ainsi obtenue qui est encore grossière est ensuite broyée et envoyée dans des bassins de stockage pour y être Homogénéisée mécaniquement.



c. Cuisson ou calcination :

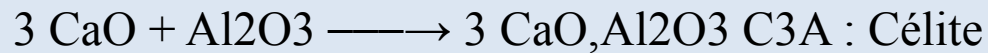
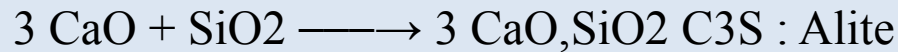
Quelque soit la technique élaborée pour la préparation du cru, les installations de cuisson sont similaires et comportent deux parties :

Un échangeur de chaleur comportant 4 à 5 cyclones. La poudre se réchauffe au contact des gaz chauds sortant de ce four et décarbonate en partie. Une décarbonatation plus complète peut être obtenue par l'ajout d'un foyer complémentaire situé dans le cyclone inférieur (précalcination).

La poudre est ainsi portée d'environ 80 à 1000 °C en un temps très court. Il s'agit dans la deuxième partie, d'un four horizontal cylindrique en tôle d'acier avec revêtement réfractaire intérieur de 60 à 150 mètres de long et de 4 à 5 mètres de diamètre, légèrement incliné et tournant à environ 1 tour /minute.



Le cru pénètre à l'amont du four où s'achève la décarbonatation et progresse jusqu'à la zone de clinkérisation (1450 °C). Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile (silicates d'alumine et d'oxyde de fer), se combinent avec la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux.



La cuisson est une opération forte consommatrice d'énergie. La source de chaleur est apportée par une tuyère qui peut brûler différents combustibles : gaz naturel, fuel, charbon. A la sortie du four, le clinker tombe sur des refroidisseurs à grille qui ramènent sa température à 70 °C; ce choc thermique donne naissance à des granules de diamètres entre 1 et 10 mm.

d. Broyage: Il est ensuite véhiculé vers les trémies des broyeurs où il est finement broyé avec 3 à 5% de gypse afin de régulariser la prise. Dans certains cas, en plus du gypse, on ajoute d'autres constituants tel que le laitier de Haut-fourneau, les pouzzolanes, les cendres volantes ou les fillers pour l'obtention de diverses catégories de ciment.

Les compositions chimiques et minéralogiques du clinker sont comprises dans les limites suivantes :

Éléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₅	MgO	Na ₂ O + K ₂ O
(%)	62- 67	19 - 25	2 - 9	1- 5	0 - 3	0 ÷ 1,5

Les grains de ciment étant récupérés à la sortie du broyeur sont expédiés vers des silos de stockage. Ces silos sont cylindriques et de capacité pouvant aller jusqu'à 10.000 tonnes. Le ciment qui est produit à un prix unitaire relativement bas, supporte mal, en coût, de longs transports.

III.3. Les autres constituants des ciment : Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute les autres constituants associés au clinker grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques. Les constituants les plus utilisés sont:

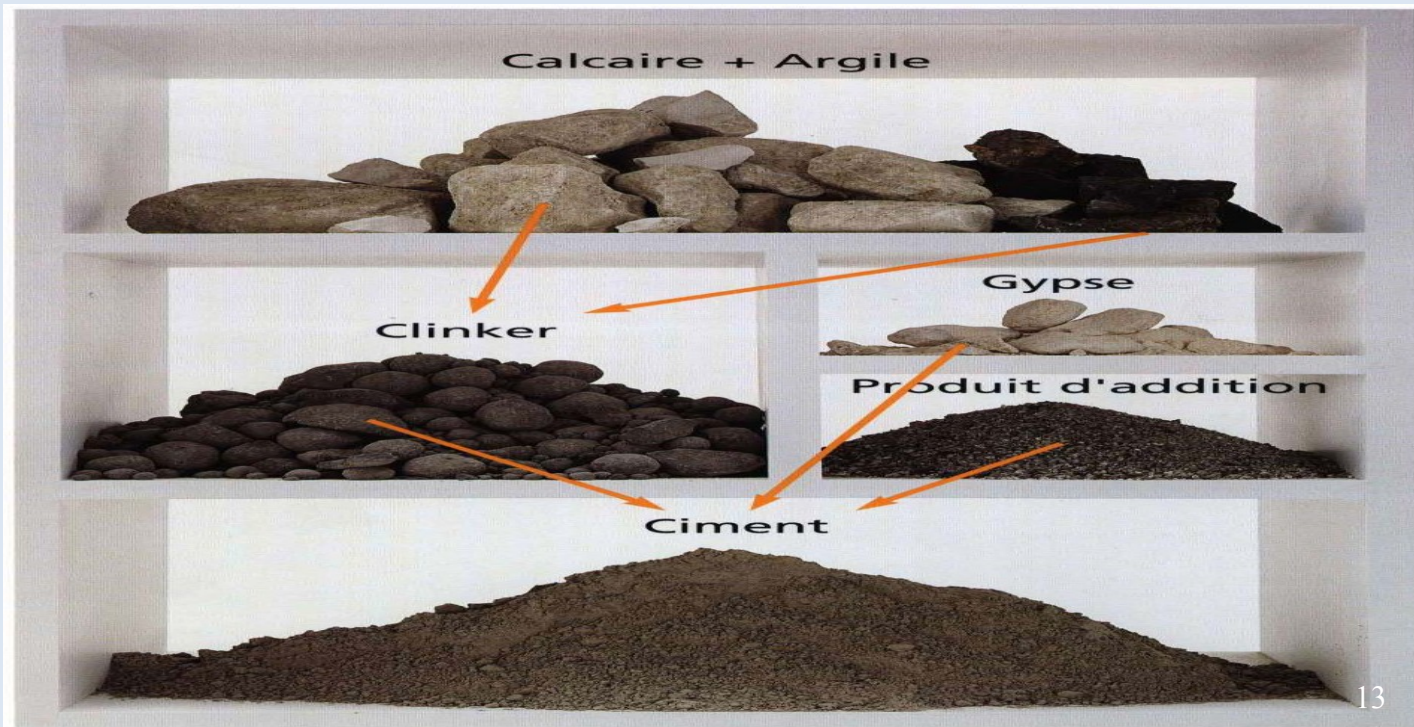
Calcaires: Les calcaires sont considérés comme un des constituants principaux du ciment. Ils doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO₃ supérieure à 75% en masse.

Schistes calcinés: des schistes que l'on porte à une température d'environ 800 °C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques ¹²

Laitier granulé de haut fourneau: Le laitier est un sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques. Il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines déchets provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.

Cendres volantes (V ou W): Elles sont les produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques.

Fillers: Ce sont des “constituants secondaires” des ciments, donc ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment. Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).



III.4 Les principales catégories de ciment.

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

III.4.1 Classification des ciments en fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation Algérienne est indiquée entre parenthèse):

- CEM I: Ciment portland (CPA - dans la notation algérienne).**
- 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).**

III.4.2 Classification des ciments en fonction de leur résistance normale :

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous classes “R” sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32.5, classe 42.5 , classe 52.5 . dans le tableau suivant ,les valeurs entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu’elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées.

Tableau : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition

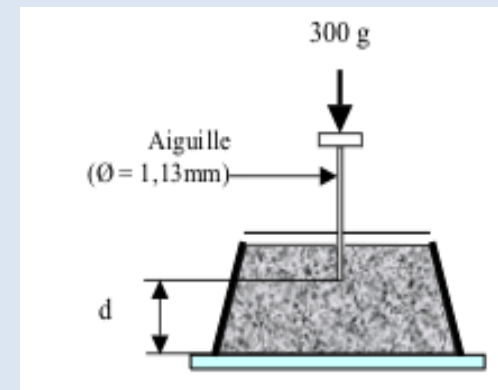
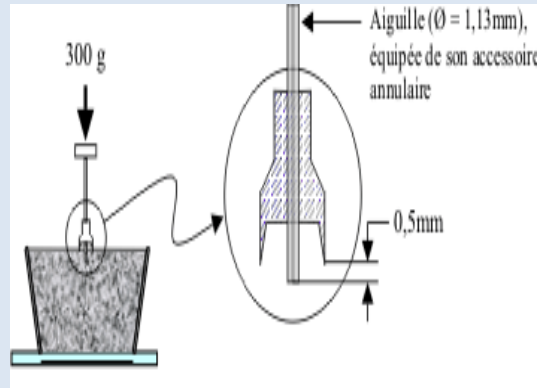
	Cim. Portland	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pozzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
Clinker (K)	/95%	/80% ≤94%	/65% ≤79%	/35% ≤64%	/20% ≤34%	/5% ≤19%	/65% ≤90%	/45% ≤64%	/40% ≤64%	/20% ≤39%
Laitier (S)	*	6%≤	21%≤	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18% ≤30%	/31% ≤50%
Pouzzolanes (Z)	*	total	total	*	*	*	10% ≤ total	36% ≤ total	18%≤ total	31%≤ total
Cendre siliceuses (V)	*	≤20%	≤35%	*	*	*	≤35% (fumée ≤10%)	≤55% (fumée ≤10%)	≤30%	≤50%
Fumée de silice (D)	*	(fumée	(fumée	*	*	*			*	*
Cendres calciques (W)	*	de	de	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*	≤10%)	≤10%)	*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tableau : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1				Retrait à 28 jours	Début de prise	Stabilité
	au jeune âge		à 28 jours		P 15-433	EN 196-3	EN 196-3
	2 jours	7 jours	mini.	maxi.	($\mu\text{m}/\text{m}$)	(min)	(min)
32,5		(17,5)	/32,5 (30)	$\leq 52,5$	≤ 800	/90	≤ 10
32,5 R	/13,5 (12)	/	/32,5 (30)	$\leq 52,5$	$\leq 1\ 000$	/90	≤ 10
42,5	/12,5 (10)		/42,5 (40)	$\leq 62,5$	$\leq 1\ 000$	/60	≤ 10
42,5 R	/20 (18)		/42,5 (40)	$\leq 62,5$	$\leq 1\ 000$	/60	≤ 10
52,5	/20 (18)		/52,5 (50)			/60	≤ 10
52,5 R	/30 (28)		/52,5 (50)			/60	≤ 10

III.5. Les caractéristiques du ciment portland :

III.5.1 La 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. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée. Mais au bout d'un certain temps,, le mélange a changé de viscosité et se raidit, on dit qu'il se fait priser.



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

- la nature du ciment,
- la finesse de mouture du ciment; plus son broyage, plus le temps de prise est court.
- la température; alors qu'à zéro degré la prise est stoppée, plus la température est élevée plus la prise est rapide, pour un ciment donné le début de prise sera de 18 heures à 2 °C, de 5 heures à 10 °C, de 3h 30 à 20 °C et de 30 min à 35 °C .
- la présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton qui ralentit la prise.
- l'excès d'eau de gâchage (inconvenients) ,est une action retardatrice sur la prise

En fonction de leur classe de résistance, les normes spécifient un temps de prise minimum qui est, à la température de 20 °C, de: 1 h 30 pour les ciments de classes 35 et 45. 1 h pour les ciments des classes 55 et HP.

Il est à noter que pratiquement tous les ciments ont des temps de prise largement supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3 h pour la majorité des ciments

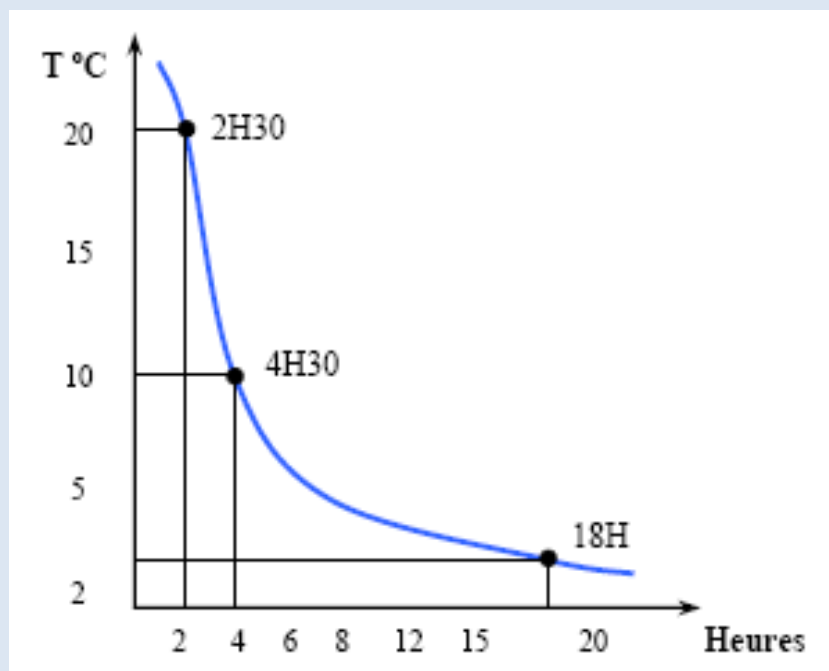


Fig : Evolution du temps de prise en fonction de la température

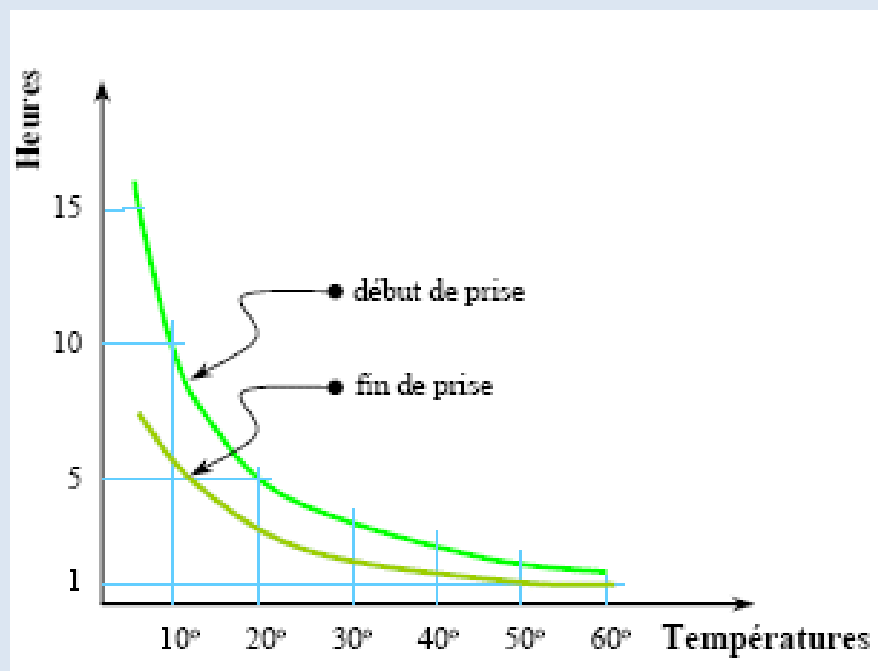


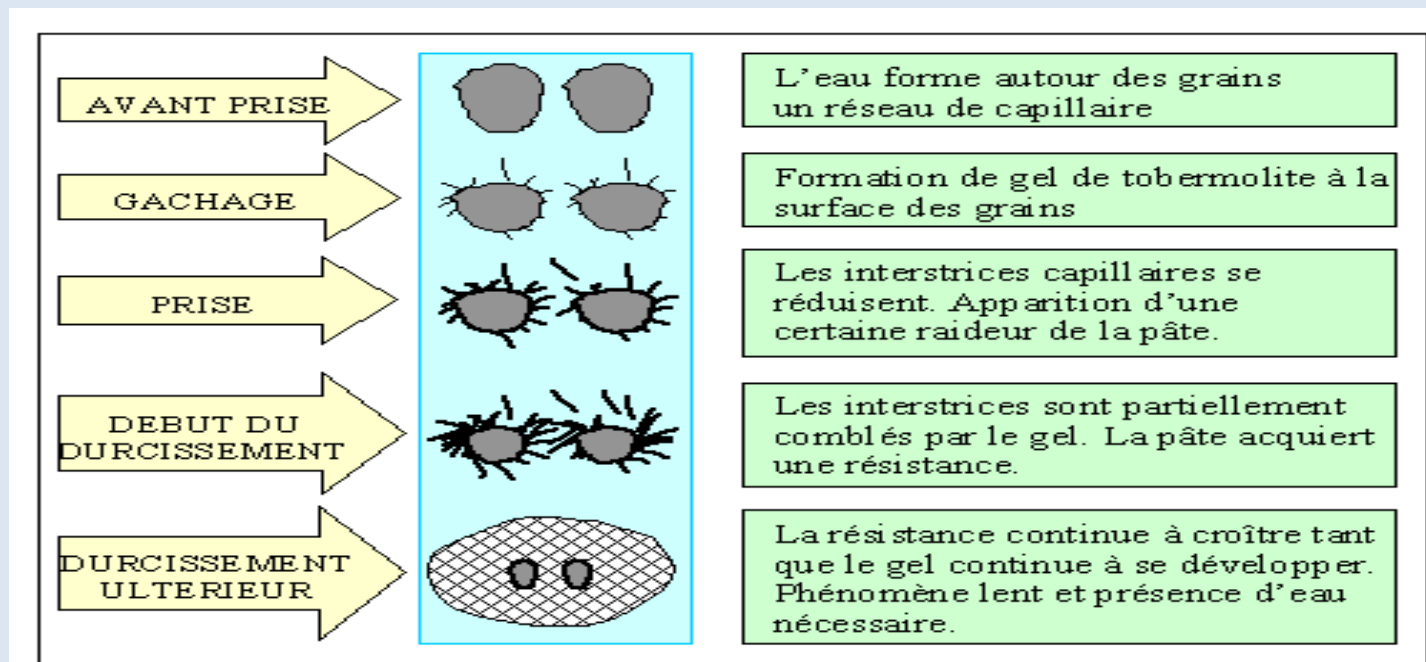
Fig : Influence du E/C sur le temps de prise

III.5.2 Evolution physico-chimique de la pâte de ciment:

En gâchant le ciment avec l'eau, on obtient une pâte dans laquelle l'eau entoure chaque grain de ciment en formant un réseau capillaire. Les composés anhydres du ciment sont alors attaqués en surface par l'eau pour produire des composés hydratés.

aiguilles se développent en dimension et en nombre tout en réduisant les interstices capillaires entre les grains. Quand les aiguilles entre les grains de ciment se rapprochent, la pâte devient plus raide. Cette rigidité est au début faible et peut encore être facilement détruite mécaniquement. C'est le début de la prise.

Après quelques heures, les interstices capillaires sont partiellement comblés par le gel. La pâte de ciment acquiert une certaine résistance. C'est le durcissement.



III.5.3 Le retrait : La pâte de ciment se rétracte dans l'air sec (alors qu'au contraire elle gonfle dans l'eau), ce phénomène se poursuivant dans le temps et ceci pendant des durées d'autant plus longues que les pièces sont massives. C'est le retrait qui est cause des fissures que l'on observe dans des pièces en béton.

L'importance du retrait, en dehors du facteur de temps, est fonction de nombreux paramètres parmi lesquels:

- la nature du ciment
- le dosage en eau .
- la propreté des sables
- la forme et la dimension des granulats

III.6. Mesure des temps de début et de prise.

III.6.1.Objectif de l'essai :Il est nécessaire de connaître les début et fin de prise des pâtes de ciment (des liants hydrauliques) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés. Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques: Le début de prise et la fin de prise.

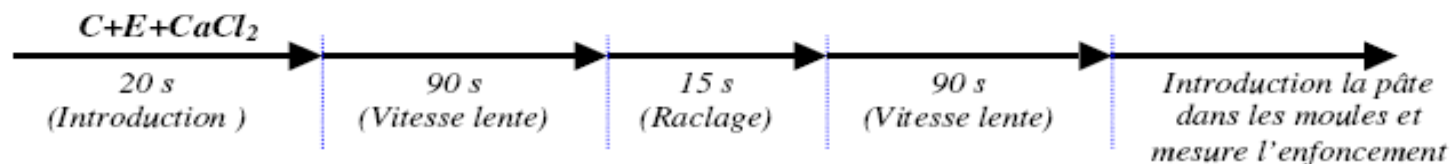
III.6.2.Principe de essai :L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée; l'appareil utilisé est appareil de VICAT équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre. Quand sous l'effet d'une charge de 300 g l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{ mm}$ on dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé « TEMPS DE DEBUT DE PRISE ». Le « TEMPS DE FIN DE PRISE» est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm.

III.6.3.Equipement nécessaire :

- Salle climatisée: L'essai doit se dérouler dans une salle, dont la température est de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et dont l'humidité relative est supérieure à 90%. l'échantillon testé pourra, être entreposé dans de l'eau maintenue à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.
- Malaxeur normalisé : avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente 140 tr/mn et rapide 285 tr/mn).
- Appareil de VICAT (du nom de l'ingénieur français). L'appareil est composé d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre.
- Balance précise à 0,1 g près.
- Chronomètre précise à 0,1 s près.

III.6.4. Conduite de essai: On préparera 2 Kg de ciment, une pâte pure de rapport E/C=0,26. Ceci permettra de préparer 5 moules. Pour accélérer les phénomènes, on dissolvera dans l'eau de gâchée du chlorure de calcium (CaCl_2) en prenant comme poids de CaCl_2 , 2% du poids d'eau calculé pour la gâchée.

Opérations	Introduction du ciment	Introduction de l'eau	Mettre en route	Raclage de la cuve	Mettre en route
Durée des opérations		5 à 10 s	90 s	15 s	90 s
Etat du malaxeur	Arrête		Vitesse lente	Arrête	Vitesse lente



La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de vicat.

Quatre minutes après le début du malaxage, l'aiguille est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse). L'aiguille alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.

Recommencer 'opération à des intervalles de temps convenablement espacés ($\sim 10-15$ mn) jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$.

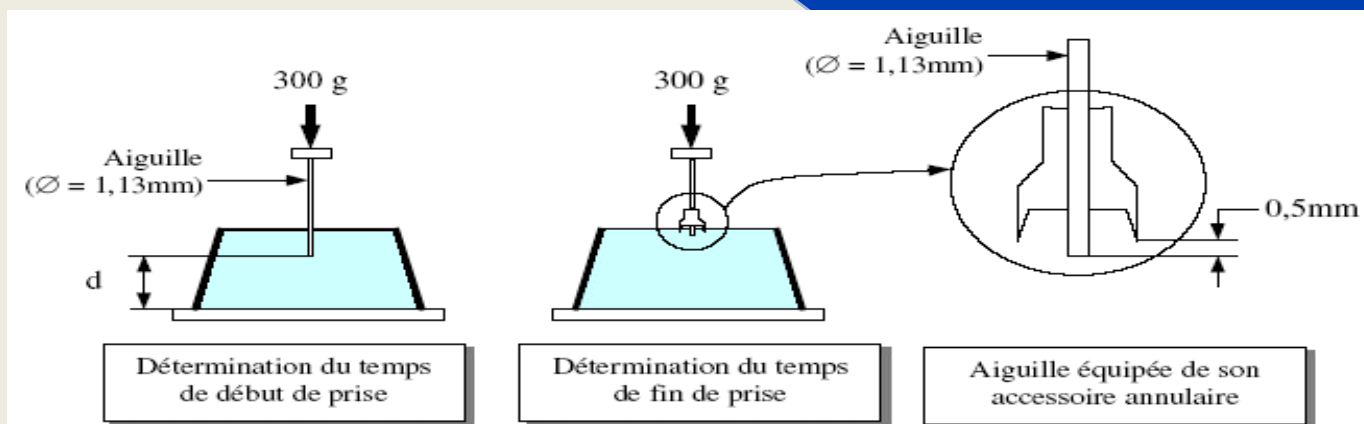
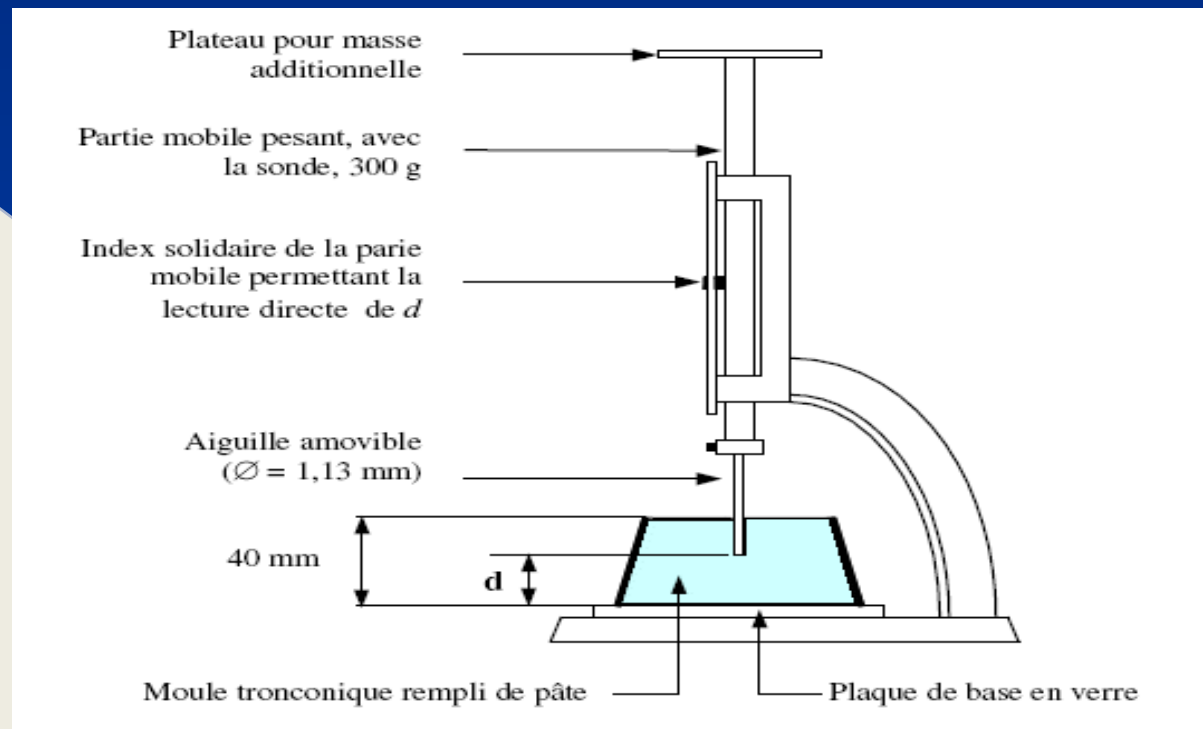


Fig 1: Appareil de Vicat muni de l'aiguille amovible