



Les essais sur ciment

Par: Mouats Khaled

Université Mentouri Constantine
<http://mkfreedown.sup.fr/>

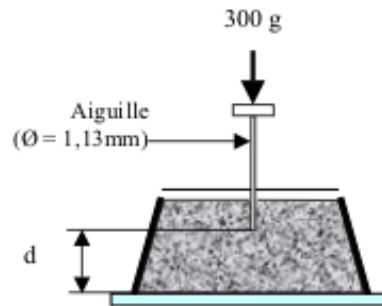
27/02/2009

I. Les essais principaux pour déterminer les caractéristiques des ciments

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, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange a changé de viscosité et se raidit, on dit qu'il se fait **prendre**.

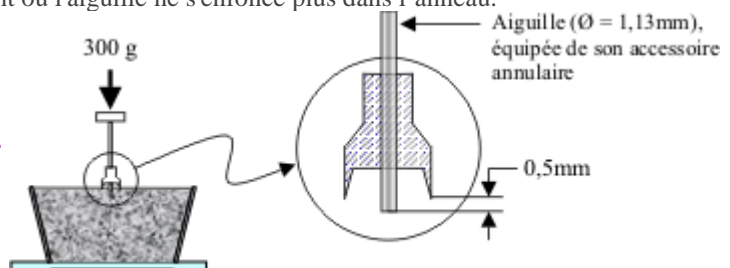
fig 2.3: Détermination du temps de début de **prise**



Le début de **prise** correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ($d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment.

De même, la fin de **prise** correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau.

fig 2.4: Détermination du temps de fin de **prise**



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 a été poussé, plus le temps de **prise** est court,
- la température; alors qu'à zéro degré la **prise** est stoppée, plus la température ambiante 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 (fig 2.5),
- 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 qui a, entre autres inconvénients, une action retardatrice sur la **prise** (fig 2.7)

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.

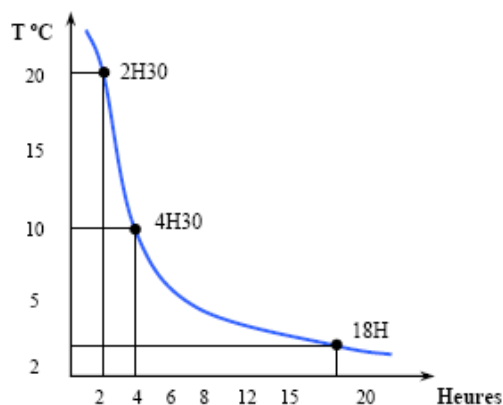


fig 2.5: Evolution du temps de prise en fonction de la température

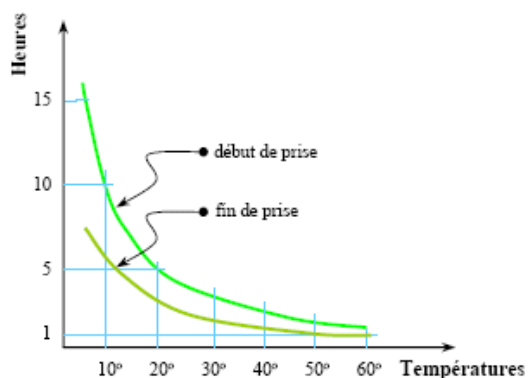
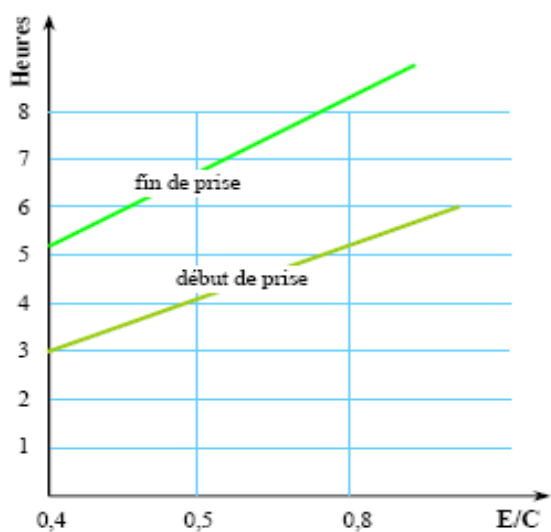


fig 2.6: Influence de la température sur la prise des ciments

fig 2.7: Influence du E/C sur le temps de prise



2. 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.

Comme le phénomène de prise, le durcissement est sensible à la température, ce qui conduit notamment en préfabrication, à chauffer les pièces pour lesquelles on désire avoir des résistances élevées au bout de quelques heures.

Prise et durcissement des constituants du clinker:

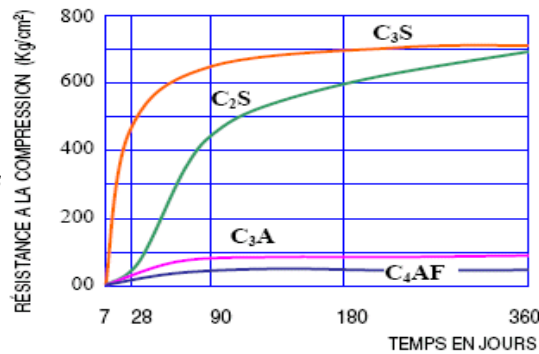
Pour mieux comprendre les propriétés des ciments portland, il est intéressant d'étudier comment réagit en présence d'eau chacun des constituants anhydres du ciment pris isolément.

Tableau 2.5: Le comportement et le dégagement de chaleur des constituants du clinker

| N° | CONSTITUANTS | COMPORTEMENT DES CONSTITUANTS PURS | CHALEUR DEGAGEE |
|----|--------------|--|-----------------|
| 1 | C_3S | <ul style="list-style-type: none"> Fait prise et durcit rapidement. Haute résistance atteinte à <i>court terme</i> | 120 cal / gr |
| 2 | C_2S | <ul style="list-style-type: none"> Réagit lentement Haute résistance atteinte à <i>long terme</i> | 62 cal / gr |
| 3 | C_3A | <ul style="list-style-type: none"> Prise de façon très désordonnée et rapide Faible résistance <p>(Pour régulariser la prise du C_3A, il faut ajouter du gypse)</p> | 207 cal / gr |
| 4 | C_4AF | <ul style="list-style-type: none"> Faible résistance | 100 cal / gr |

Le graphique ci-dessous montre le développement des résistances dans le temps des constituants purs du ciment portland.

fig 2.8: Le développement des résistances dans le temps des constituants purs du CP.



- C₃S et C₂S – Constituants résistants (représentent ~70% en poids).
- C₃A et C₄AF – Requis comme fondants (représentent ~20% en poids).
- Gypse – Régularisation prise (représentent ~4% en poids)

Dans une poudre de ciment portland en contact avec l'eau, l'aluminate tricalcique (C₃A) réagit en premier, se dissout et se recrystallise. Vient ensuite la réaction d'hydrolyse, de l'alite-Silicate tricalcique (C₃S) forme autour des grains une pellicule de gel et met en même temps des ions Ca²⁺ en solution. L'hydrolyse et la recrystallisation de (C₃A) sont rapides. Cette activité est si grande qu'il faut la retarder car elle conduirait à des prises trop rapides et rendrait le liant inutilisable sur chantier.

Evolution physico-chimique de la pâte de ciment:

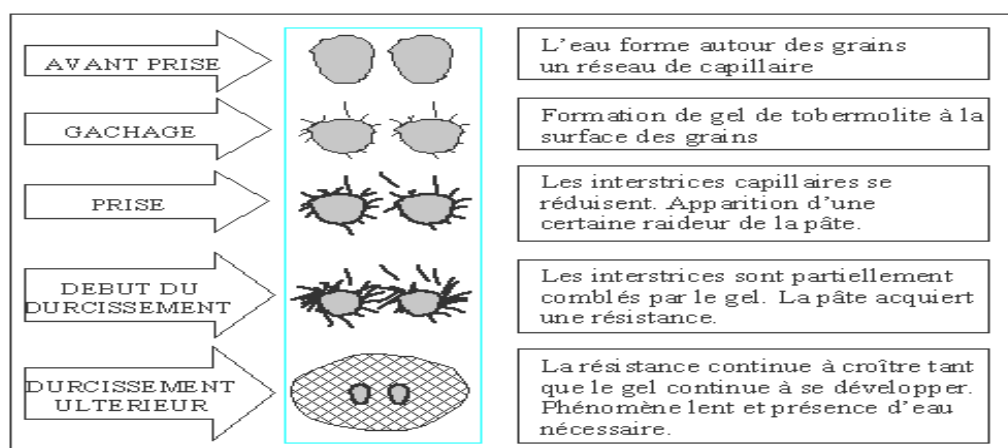
En gâchant le ciment avec l'eau, on obtient une pâte dans laquelle l'eau entoure chaque grain de ciment en formant un réseau capillaire. Les composés anhydres du ciment sont alors attaqués en surface par l'eau pour produire des composés hydratés. Dans le cas des silicates de calcium C₃S et C₂S, la chaux hydratée se dissout et il se dépose des cristaux de Ca(OH)₂ en plaquettes hexagones alors que les silicates de calcium hydratés forment un gel composé de fines aiguilles à la surface du ciment. Ces 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 qui commence. La résistance continue à croître à mesure que le gel devient plus compact, d'une part, parce qu'il y a un accroissement de la cohésion entre les aiguilles et accroissement du feutrage des aiguilles, d'autre part, parce qu'il se formerait des joints de soudure entre les aiguilles de tobermolite des divers grains de ciment.

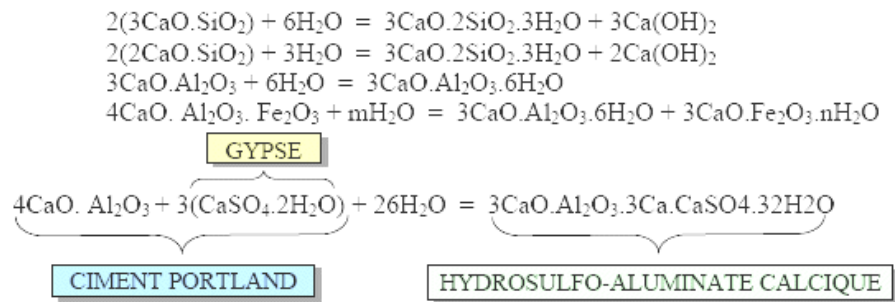
Dans les pâtes de ciment durcies, il reste de ce fait toujours des grains de ciment non hydratés.

L'hydratation des grains de ciment continue non seulement des mois, mais des années durant, pour autant que le gel soit entouré d'eau, car le gel de tobermolite ne peut se former qu'en présence d'eau.

fig 2.9: L'évolution physico-chimique de la pâte de ciment



Quelques réactions chimiques importantes:



Les réactions d'hydratation du ciment Portland sont très complexes. Nous ne considérons que les quelques-unes utiles à connaître pour mieux comprendre les propriétés des ciments portlands.

3 La finesse de mouture (finesse de Blaine)

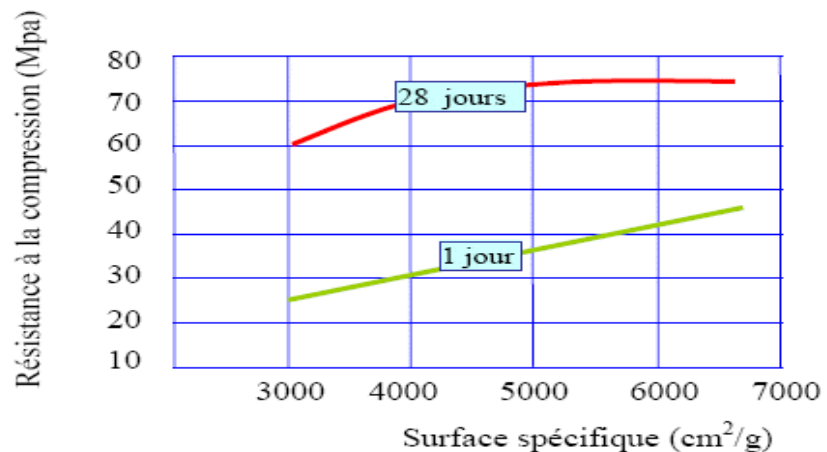
Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm²/g). Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm²/g.

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes, par contre plus le ciment est sensible à l'éventellement et plus le retrait est important. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée.

La surface massique de ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment de référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est longue: Dans les conditions normalisées décrites, la surface est proportionnelle à \sqrt{t} .

L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé «Perméabilimètre de Blaine». Cet appareil est schématisé sur fig 2.11. Il se compose pour l'essentiel d'une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester et d'un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur (n° 4) d'une huile légère. La cellule est équipée d'une grille en sa partie inférieure. Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini.

fig 2.10: Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression



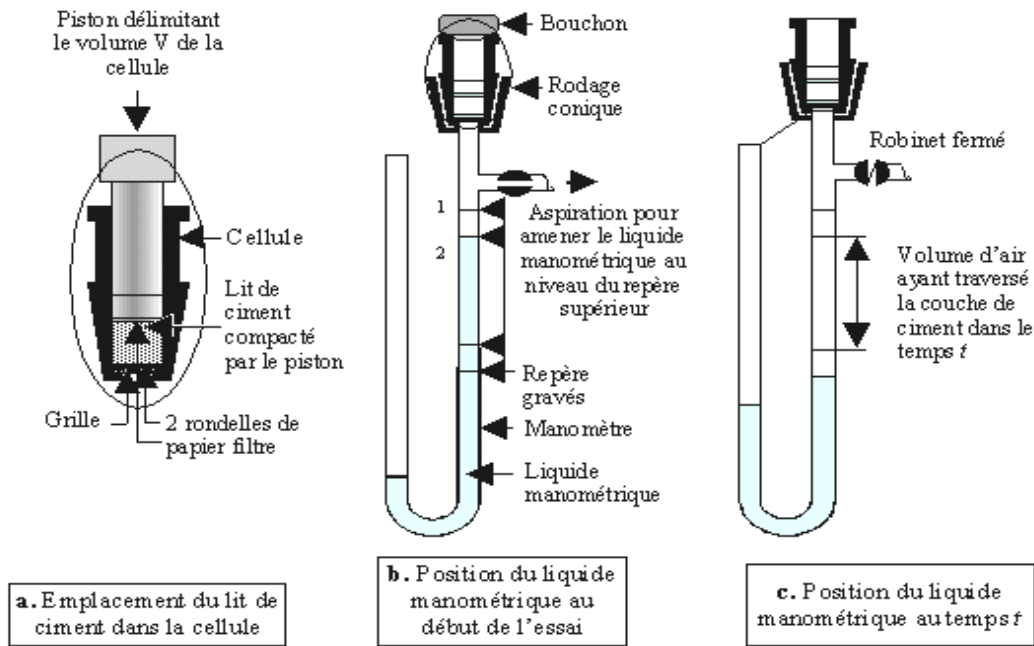


fig 2.11: Principe de fonctionnement de perméabilimètre de *Blaine*.

4. 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.

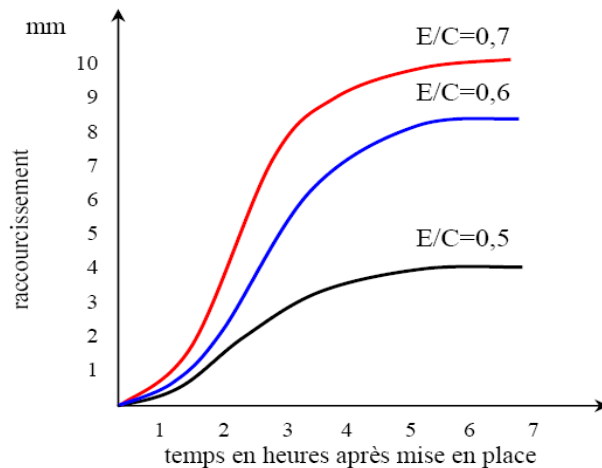
En fait il existe plusieurs types de **retrait**:

- Le **retrait** avant prise dû essentiellement à la perte prématurée d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation et dont l'amplitude est dix fois celle du **retrait** hydraulique classique. Ce **retrait** qui provoque des contraintes de traction supérieures à la résistance du béton à la traction, qui est alors pratiquement nulle, se traduit par l'apparition, à la surface du béton encore plastique, de grosses crevasses peu profondes, pouvant être refermées par talochage,
- le **retrait** hydraulique, qui découle d'une part de la **contraction Le Chatelier** (le volume des hydrates est inférieur au volume des constituants de départ) et d'autre part du **retrait** de dessiccation (contraction au séchage), est de l'ordre de 0,2 à 0,4 mm/m pour les bétons. Dans le cas de béton à faible rapport E/C, la dessiccation d'origine "endogène" (consommation de l'eau de gâchage pour hydratation) peut être prépondérante sur la dessiccation par échange avec le milieu externe,
- le **retrait** thermique, qui est dû à la contraction du béton lors de son refroidissement.

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

- la nature du ciment
- le dosage en eau (fig 2.12)
- la propreté des **sables**
- la forme et la dimension des granulats

fig 2.12: Influence du E/C sur le **retrait** plastique des mortier.

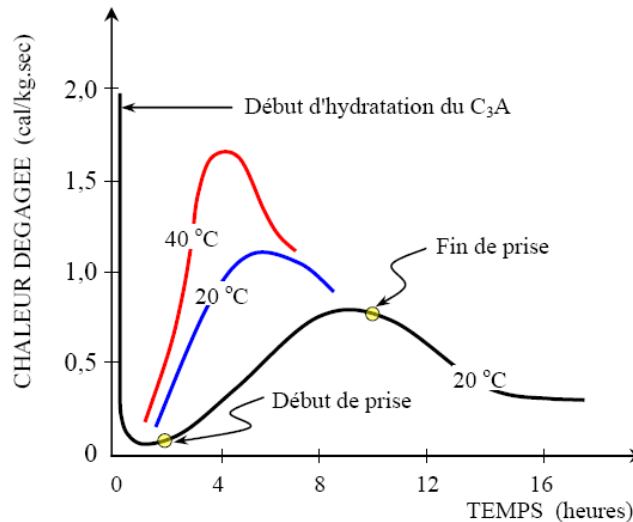


5. Chaleur d'hydratation

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier:

- la finesse de mouture: plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée
- la nature des constituants: les ciments CPA comportant presque exclusivement du clinker dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires
- la nature minéralogique du clinker: plus les teneurs en aluminat tricalcique (C_3A) et silicate tricalcique (C_3A et C_3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte
- la température extérieure.

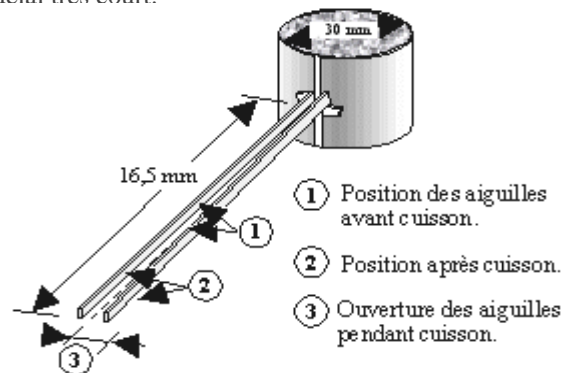
fig 2.13: Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CP



6. Stabilité de volume

La réaction d'hydratation est accélérée par un traitement thermique de la pâte, de façon à pouvoir constater l'expansion éventuelle du ciment dans un délai très court.

fig 2.13: Aiguilles de Le Châtelier



Un essai permet de s'assurer que le ciment ne contient pas de substances susceptibles de provoquer une expansion dangereuse au cours du temps.

On simule l'effet du temps en accélérant les processus de durcissement par une cuisson à 100 °C pendant 2 heures d'une pâte durcie de ciment à consistance normale âgée de 24 heures. Pour mesurer l'expansion, on utilise les aiguilles de Le Châtelier (fig 2.13). La différence d'ouverture des aiguilles avant et après cuisson doit rester inférieure à 10 mm.

Ouverture d'aiguille causée par cuisson à 10 mm.

L'essai d'étuvage a été supprimé pour les ciments Portland, car depuis de nombreuses années, il n'y a jamais eu de ciment Portland défectueux selon cet essai. On continue par contre à utiliser ce type d'essai pour contrôler la stabilité de volume des chaux hydrauliques.

Aujourd'hui on contrôle la pureté et la stabilité des ciments portland par voie chimique tels:

- Perte au feu
- Insoluble
- Teneur en SO₃, en MgO, en C₃A etc..

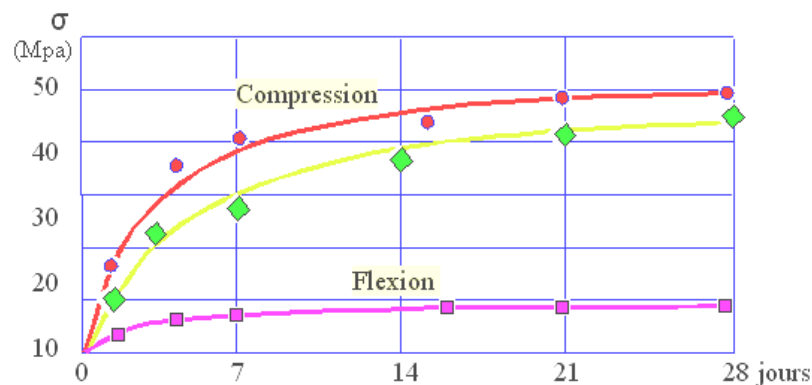
7. Résistance à la compression

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en Mpa.

Le mortier utilisé est réalisé conformément à la norme EN 196-1. Le sable utilisé est un sable appelé "sable normaliser CEN EN 196-1".

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

fig 2.14: Résistance du mortier normal



II. Expériences

1. Masse volumique absolue

Objectif de l'essai

Il s'agit de mesurer la masse volumique absolue du ciment anhydre qui varie en fonction de la composition du ciment, tout en restant comprise entre 3,0 et 3,2 g/cm³.

Principe de l'essai: (avec le pycnomètre)

On repère en comparant la masse (m_c) d'un volume connu de ciment (V_c) à la masse (m_t) d'un même volume d'un liquide dont la masse volumique (ρ_t) est connue. La masse (ρ_c) s'en déduit en écrivant:
$$\rho_c = \rho_t \frac{m_c}{m_t}$$

Principe de la mesure: (avec le chantelier) – Volumétre.

Il consiste à mesurer le déplacement du niveau de liquide contenu dans un récipient à col étroit, lorsqu'on y introduit la poudre dont on cherche la masse volumique absolue.

La méthode nécessite également une balance au décigramme, volumétre et un liquide inerte vis-à-vis de la poudre: ce sera par exemple du tetrachlorure de carbone, si la poudre est du ciment (ou bien on peut remplacer le tetrachlorure par le pétrole).

Équipement nécessaire

- Un volumétre d'une contenance minimale de 50 cm³.
- Un récipient contenant de l'eau à 20 ± 1 °C.
- Un liquide qui ne doit pas être réactif avec le ciment, du toluène par exemple (le tetrachlorure, le benzène, cancérigène, le pétrole, ne doit plus être utilisé).

- Une balance. La précision de la balance devra être adaptée à la masse de l'échantillon utilisé.
- Un thermomètre, précis à 0,1 °C, permettant de connaître la température du laboratoire.

Conduite de l'essai: (Mode opératoire).

Remplir l'appareil de tétrachlorure de carbone jusqu'à ce que le niveau parvienne entre les divisions zéro et 1.

Éviter de mouiller les parois lors du remplissage. Immerger le volumétre dans un récipient contenant de l'eau à 20±1 °C. Pendant l'équilibrage de température, peser une masse de ciment de 64 g à 0,1 g près.

Repérer exactement le niveau atteint N_0 .

Verser le ciment très lentement (en ¼ d'heure environ) dans l'appareil en prenant garde à ne pas laisser de dépôt sur les parois.

Déplacer le volumétre contenant le ciment, de récipient et le poser sur la table.

Boucher le volumétre, l'incliner à 45° par rapport à la table et le faire rouler avec un mouvement de va-et-vient de manière à faciliter le départ de l'air. Replacer l'appareil dans le bain et lire le niveau N_1 du liquide après équilibrage de température.

La **masse volumique** absolue est donnée par le rapport:
$$P_c = \frac{64}{N_1 - N_0} \cdot \text{g/cm}^3$$

2. Mesure de la finesse

Objectif de l'essai

Les ciments se présentent sous forme de poudre finement divisée. Cette finesse est une caractéristique importante: lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète.

La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique: c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est généralement exprimée en cm² de surface des grains de ciment par gramme de poudre. L'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface.

Principe de l'essai

L'essai a pour but de calculer le débit d'air susceptible de passer à travers la poudre.

La surface massique du ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est long. Dans les conditions normalisées décrites, la

surface est proportionnelle à \sqrt{t}

Équipement nécessaire

- Un appareil appelé «Perméabilimètre de **Blaine**». Il se compose pour l'essentiel d'une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester et d'un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur d'une huile légère. La cellule est équipée d'une grille en sa partie inférieure. Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini.
- Une balance précise à 0,001 g.
- Un chronomètre précis à 0,2 s près.
- Du ciment de référence de surface massique (S_0) et de **masse volumique** (ρ_0) connues.
- Des rondelles de papier filtre adaptées au diamètre de la cellule.
- Du mercure pour mesurer le volume V de la couche tassée.
- Un thermomètre précis à 0,1 °C près pour mesurer la température de l'air.

Conduite de l'essai (Mode opératoire).

Le liant hydraulique dont on désire mesurer la surface spécifique doit être à porosité constante (égale à 0,500).

- Méthode : peser à 0,01 g près, une masse m de liant telle que, compte tenu de son volume V après tassement dans la cellule, sa porosité soit égale à 0,500.

- La masse de matière à prendre s'écrit: $m = (1 - e) \rho V$

ρ - masse volumique

V – volume utile de la cellule.

Placer la grille au fond de la cellule. Appliquer sur cette grille, au moyen d'une tige à face inférieure plane et d'une équerre, un disque neuf de papier filtre.

Verser le liant dans la cellule en utilisant un entonnoir.

Donner quelques légères secousses à la cellule pour niveler la couche supérieure du liant, puis placer sur celui-ci un autre disque neuf de papier filtre.

Tasser avec précaution au moyen du piston en évitant la remontée de la poudre au-dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule.

Retirer le piston lentement (Il est commode de pratiquer une légère rotation alternative).

Vérifier le niveau du liquide du manomètre qui doit affleurer au trait inférieur. Enduire de vaseline la partie rondée de la cellule et la placer sur son ajustage en lui imprimant un léger mouvement de rotation pour répartir la vaseline; veiller au cours de cette opération à ne pas altérer le tassement de la couche.

Aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait supérieur. Fermer le robinet. Mettre en marche un chronomètre sensible au cinquième de seconde quand le niveau de liquide atteint le deuxième trait.

L'arrêter quand le niveau de liquide atteint le troisième trait.

Noter le temps écoulé t ainsi que la température de la pièce.

Faire trois mesures et prendre la moyenne arithmétique des trois temps.

La surface spécifique est calculé par la formule:

. S – Surface spécifique (cm^2/g).

. k – Constante de l'appareil.

. e – Porosité de la couche tassée

. t – Temps mesuré en secondes.

. ρ Masse volumique (g/cm^3).

. η Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises).

$$S = k \frac{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho(1-e)\sqrt{\eta}}$$

Étalonnage de l'appareil:

(a) Détermination du volume V de la couche tassée.

Enduire la paroi intérieure de la cellule d'une très mince pellicule d'huile pour éviter l'amalgame. Placer la grille au fond de la cellule, puis deux disques de papier filtre appliqués sur la grille. Remplir la cellule jusqu'au bord avec du mercure, en chassant les bulles d'air adhérant aux parois. Niveler la surface de mercure en appliquant une lamelle de verre sur le sommet de la cellule. Puis recueillir dans un récipient taré le mercure se trouvant dans la cellule, et peser à 0,01 g près – soit (m_1) la masse en gramme du mercure utilisé.

Préparer ensuite la cellule dans les conditions prévues pour l'essai, avec une quantité de ciment portland telle que la couche obtenue soit suffisamment comprimée (2,8 à 3 g), (Il est nécessaire que la poudre soit plus compacte pour l'étalonnage que pour les essais, afin d'éviter son tassement par le mercure), et refaire avec du mercure les opérations décrites à l'article précédent - soit (m_2) la masse, en gramme, du mercure utilisé.

Le volume de la couche tassée est obtenu par la formule:

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_{\text{Hg}}}$$

V – Volume del acouche tassée (cm³).

m₁ et m₂ – Masse de mercure (g)

ρ.Hg Masse volumique du mercure à la température d'essai (g/cm³) (voir en annexe, les valeurs ρ.Hg)

Répéter la détermination de façon à obtenir deux valeurs différents de moins de 0,01 cm³ et adopter leur moyenne.

(b) Détermination de la constante k de l'appareil.

Avec une poudre étalon de surface spécifique et de **masse volumique** connues, opérer selon le processus décrit à l'article précédent.

Calculer k en appliquant la formule fondamentale:

$$K = \frac{S \cdot \rho \cdot (1 - e) \cdot \sqrt{\eta}}{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}$$

La valeur adoptée sera la moyenne arithmétique résultant de trois **prises** d'échantillons différentes.

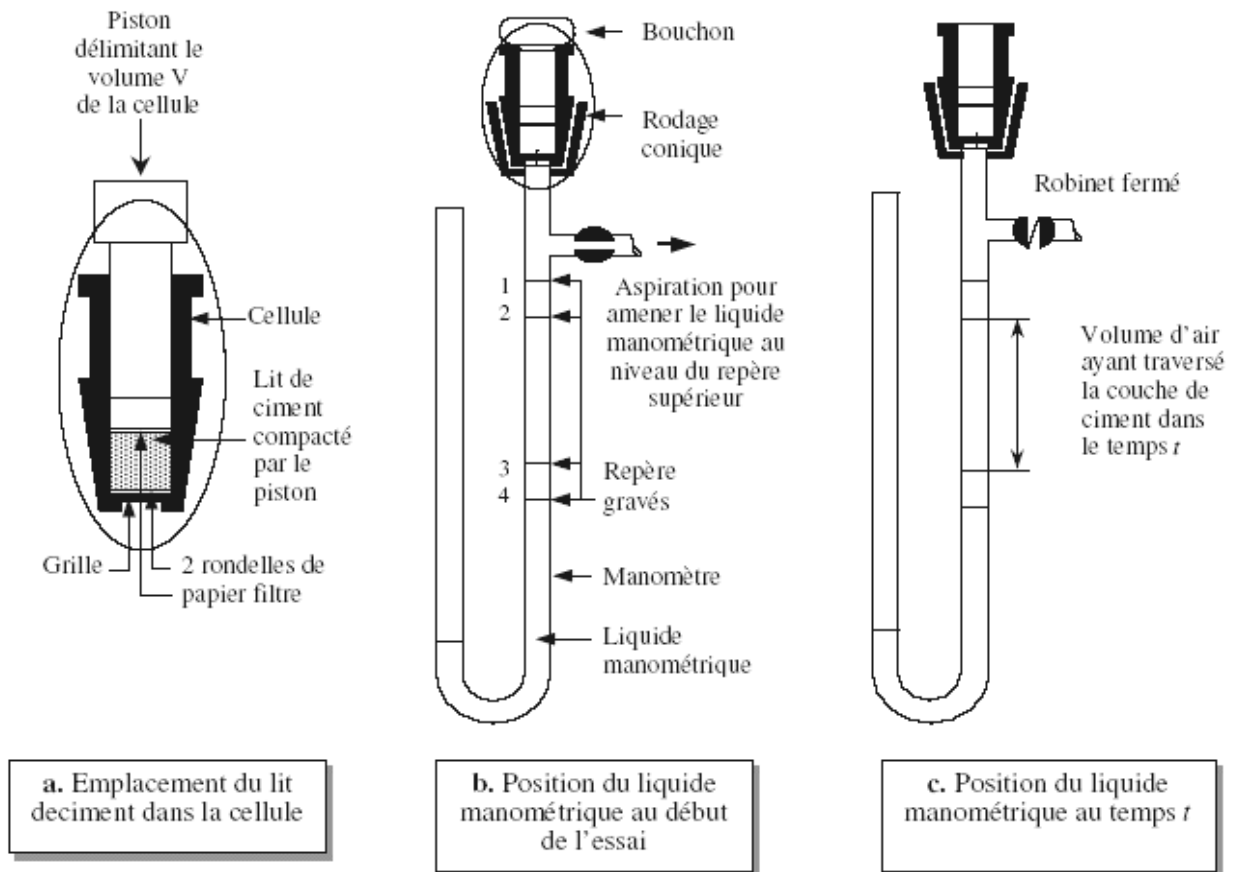


Fig.2.7.2: Principe de fonctionnement du perméabilimètre de *Blaine*

3. Mesure des temps de début et de prise

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**.

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.

Equipement nécessaire

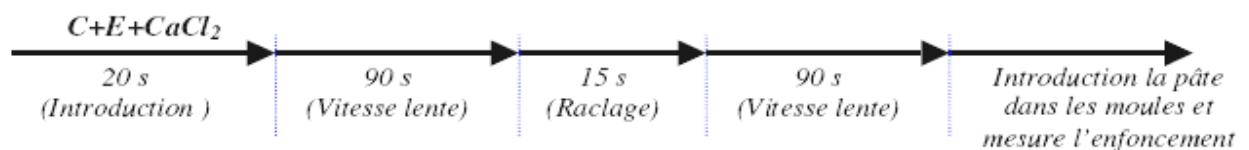
- Salle climatisée: L'essai doit se dérouler dans une salle, dont la température est de $20^\circ\text{ C} \pm 1^\circ\text{ C}$ et dont l'humidité relative est supérieure à 90%. A défaut d'une telle humidité relative, l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue 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.

Conduite de essai

Le mode opératoire de l'essai est fixé par la norme EN 196-3. Il s'agit de confectionner une pâte de **consistance** normalisée:

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. On versera l'eau avec l'accélérateur de **prise** dissous dans la cuve du **malaxeur**, contenant le ciment, on déclenchera les deux chronomètres, (un pour la gâchée, un autre pour base du temps, pour la manipulation).

| Opérations | Introduction du ciment | Introduction de l'eau | Mettre enroute | Raclage de la cuve | Mettre enroute |
|----------------------|------------------------|-----------------------|----------------|--------------------|----------------|
| 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 une 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 l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés (~ 10-15 mn) jusqu'à ce que $d = 4\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$.

Cet instant mesuré à 5 mn près est le temps de début de **prise** pour le ciment concerné (étudié)

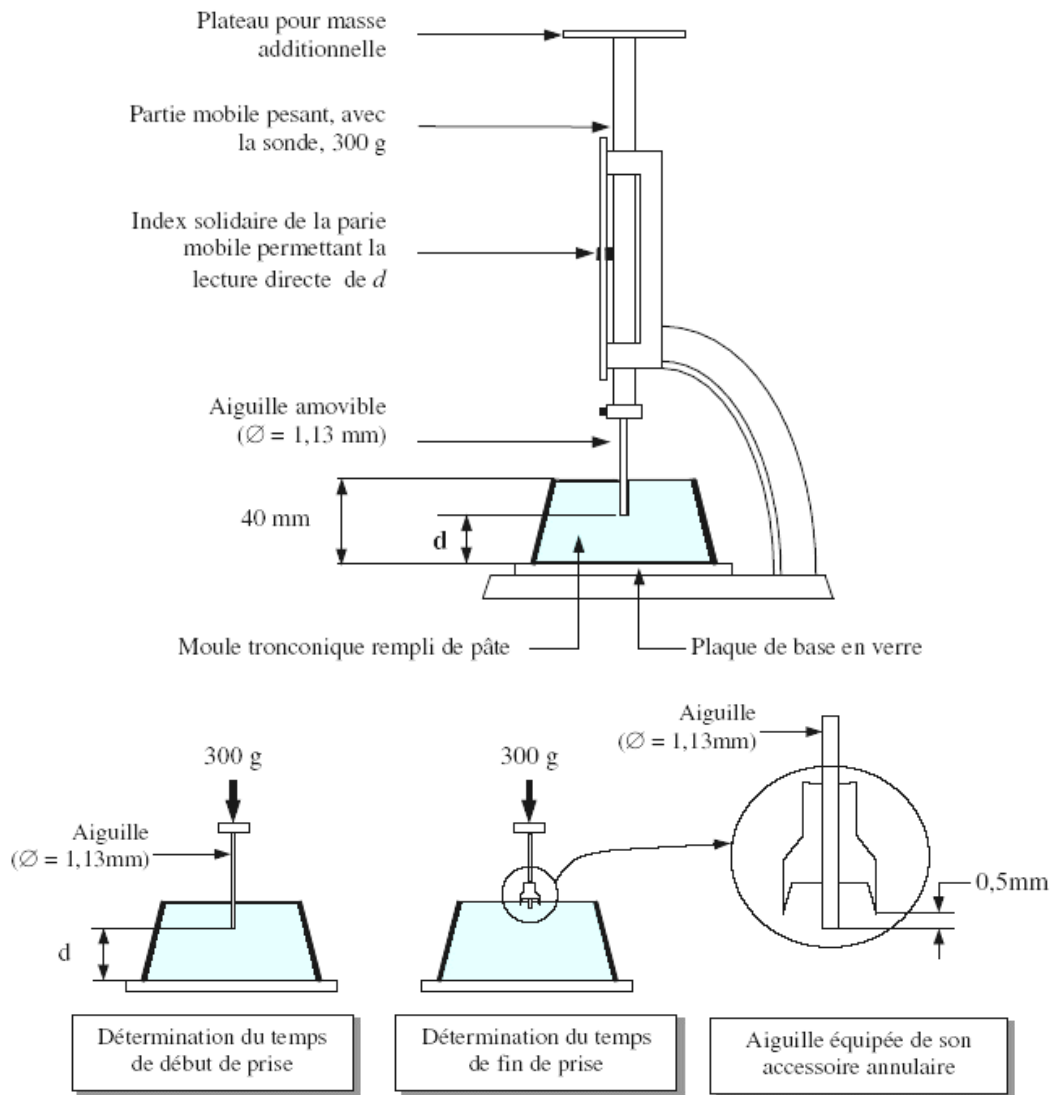


Fig 1: Appareil de Vicat muni de l'aiguille amovible

4. Mesure la consistance de la pâte

Objectif de l'essai

La **consistance** de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. Il y a deux types d'essai, qui permettent d'apprécier cette **consistance**.

1. L'essai de **consistance** effectué avec l'appareil de Vicat conformément à la norme 196-3.
2. L'essai d'écoulement au cône, conformément à la norme NF P-18-358.

La **consistance** de la pâte de ciment est une caractéristique, qui évolue au cours de temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la **consistance** en fonction des différents paramètres, il faut pouvoir partir d'une **consistance** qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées.

L'objectif de cet essai est de définir une telle **consistance** dite « CONSISTANCE NORMALISEE ».

Principe de essai

La **consistance** est évaluée ici en mesurant l'enfoncement dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la **consistance** est plus fluide. La **consistance** évaluée de cette manière sera appelée « CONSISTANCE VICAT ».

Equipement nécessaire

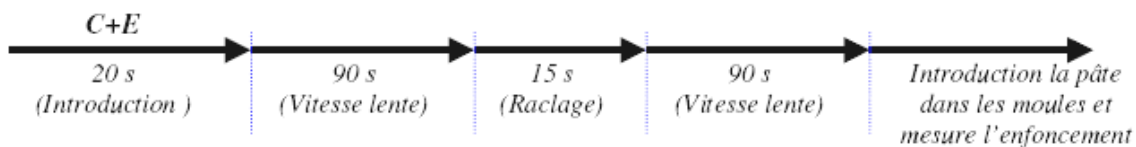
- Un **malaxeur** avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente 140 tr/mn et rapide 285 tr/mn) .
- Un appareil de VICAT. L'appareil est composé d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde 10 mm de diamètre. La partie coulissante a une masse totale de 700 g (y compris la sonde amovible).
- Une balance permettant de peser à 1 g près.
- Une Chronomètre précis à 1 s près.

Conduite de l'essai

500 g de ciment sont pesés et introduits dans la cuve du **malaxeur**. La quantité d'eau choisie est ajoutée au ciment en un temps compris entre 5 et 10 secondes.

Mettre immédiatement le **malaxeur** en route à la vitesse lente pendant 90 s. Arrêter la machine pendant 15 s et ramener, dans la gâchée avec une petite truelle, la pâte adhérant à la cuve et se trouvant au delà de la zone de malaxage. Remettre la machine en route pour une durée de 90s à vitesse lente.

| 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, la sonde est amenée à la surface supérieure de l'échantillon (moule tronconique) et relâchée sans élan. La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), on mesure la distance d séparant l'extrémité de la sonde et de la plaque de base.

Cette distance (d) caractérise la **consistance** de la pâte étudiée.

- Si (d) = $6\text{mm} \pm 1\text{mm}$, on dit que la **consistance** de la pâte étudiée est normalisée. (Consistance normalisée).
- Si (d) n'atteint pas cette valeur (c.a.d. $d > 7\text{mm}$ ou $d < 5\text{mm}$), il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la **consistance**.

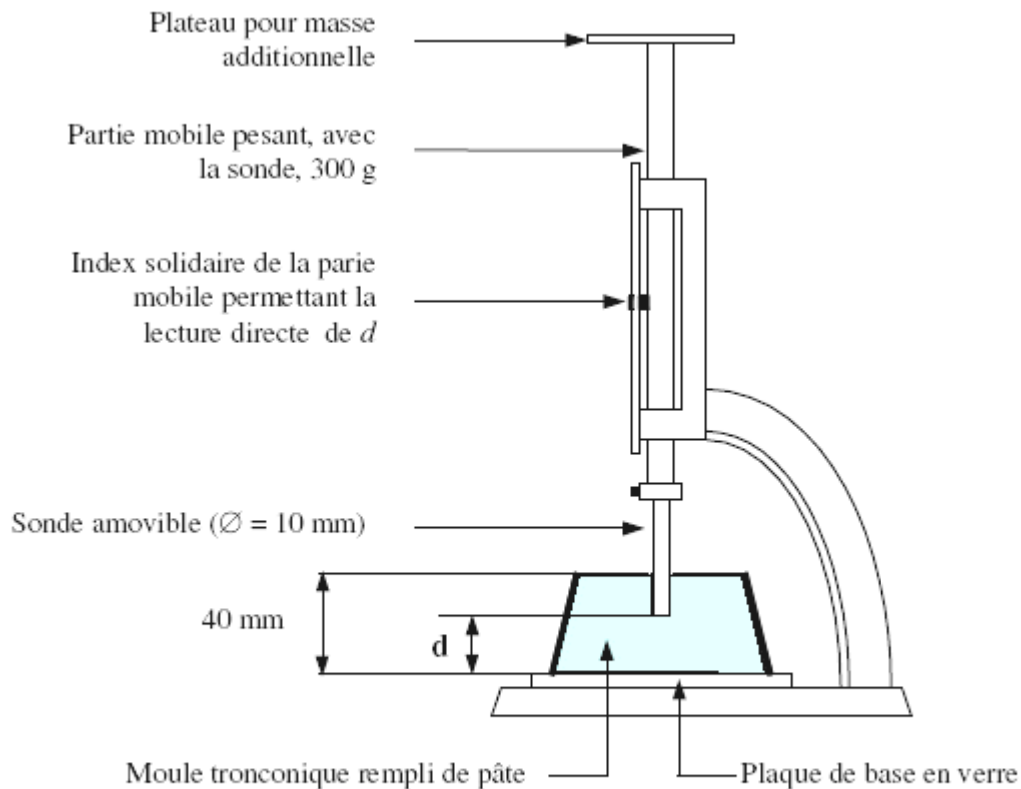


Fig 1: *Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance*

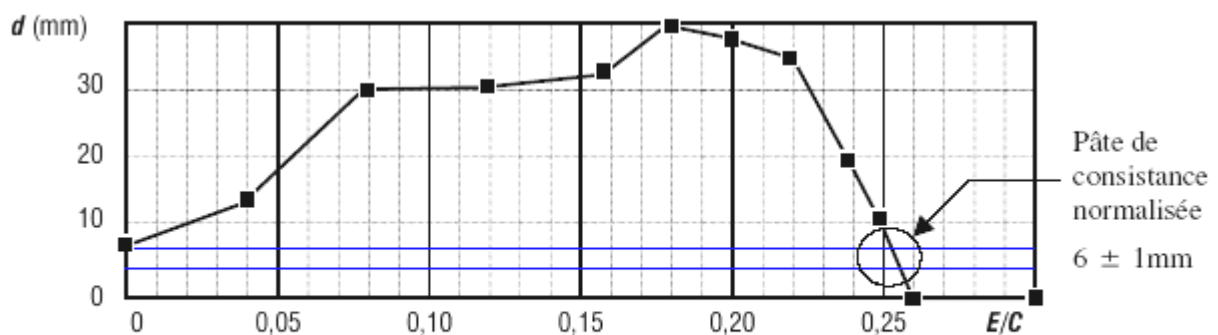


Fig: *Evolution de la consistance d'une pâte de ciment en fonction de E/C*

5. DÉTERMINATION DE LA STABILITÉ (EN 196-3)

Objectif de l'essai

Il s'agit d'apprécier l'augmentation de volume que seraient susceptible de provoquer, au cours de la réaction d'hydratation, les oxydes de calcium ou de magnésium contenus dans le ciment.

Principe de l'essai

La réaction d'hydratation est accélérée par un traitement thermique de la pâte, de façon à pouvoir constater l'expansion éventuelle du ciment dans un délai très court.

Équipement nécessaire

- Un malaxeur normalisé.
- Deux moules en laiton élastique, appelés «appareil le Chatelier». Ces moules sont fendus de façon à pouvoir s'ouvrir en cas d'augmentation de volume de la pâte.

- Un bain d'eau muni d'un moyen de chauffage, dans lequel il est possible d'immerger les éprouvettes et de porter la température de l'eau de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'à ébullition en $30 \text{ min} \pm 5 \text{ min}$.
- Une salle ou une armoire humide maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et à au moins 98% d'humidité relative.

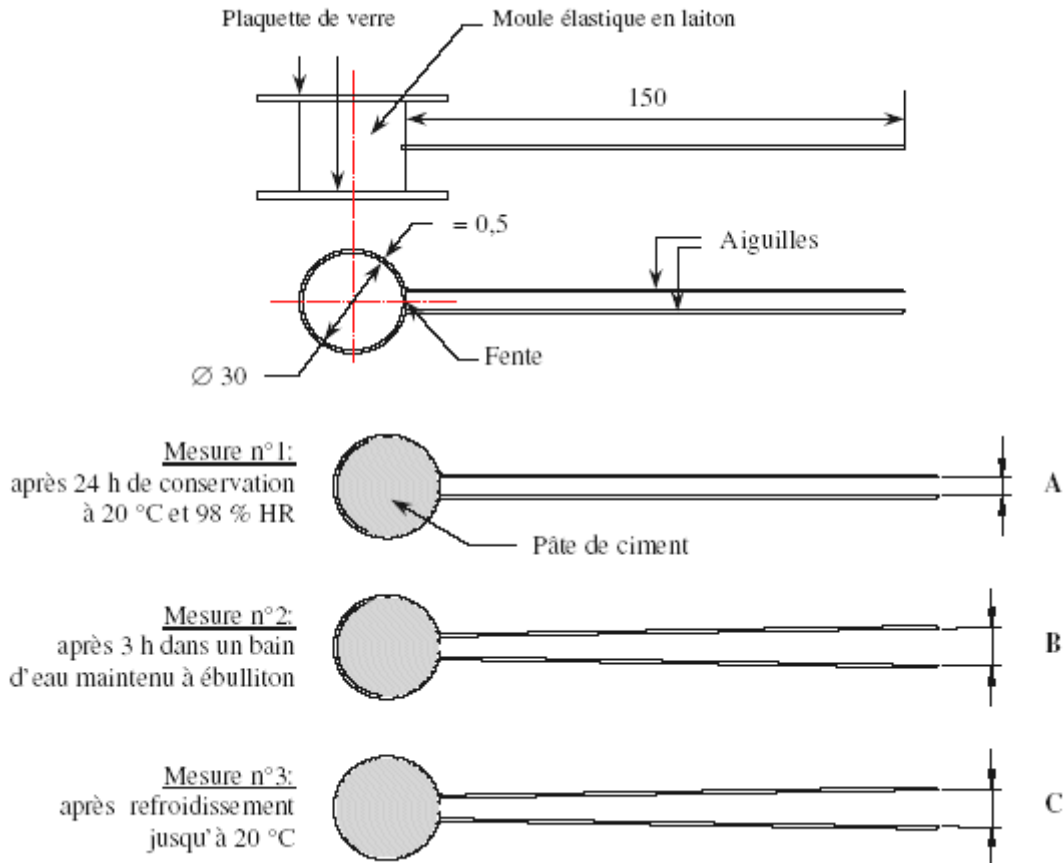


Fig.: Essai de stabilité avec l'appareil le chantelier

Conduite de l'essai

Le mode opératoire est décrit par la norme EN 196-3. Il faut confectionner une pâte de consistance normalisée, qui sera introduite dans deux moules.

Après remplissage les moules sont conservés 24 h dans la salle ou l'armoire humide. Au bout de ce temps il convient de mesurer à 0,5 mm près l'écartement A entre les pointes des aiguilles.

Le moule est alors entreposé dans le bain d'eau à 20°C qui doit être porté à ébullition pendant $3 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$. Soit B l'écartement entre les points des aiguilles au bout de ce temps. Soit C l'écartement lorsque le moule, après refroidissement, est revenu à la température de 20°C .

La stabilité est caractérisée par la valeur C-A exprimée en mm à 0,5 mm près:

Stabilité = C-A