

LE CIMENT

Hydratation

DU CLINKER AUX HYDRATES

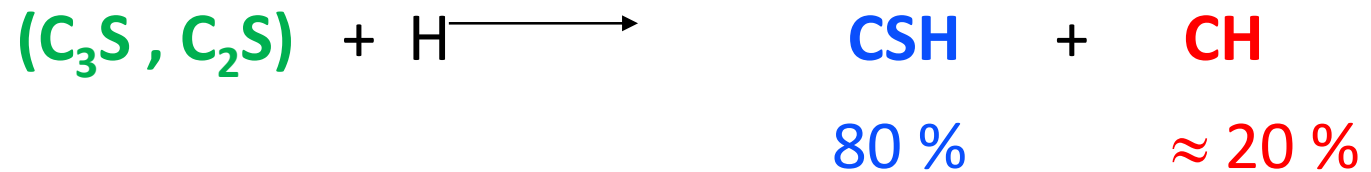
- Les anhydres du clinker au contact de l'eau vont se transformer en **silicates et aluminates de calcium hydratés C-S-H** qui vont constituer la phase liante des granulats au sein du béton.

HYDRATATION DU CIMENT

- L'hydratation d'un ciment portland peut se décrire comme la résultante de :
- l'hydratation des silicates, qui ne met en jeu que C_3S , C_2S et l'eau (H),
- et l'hydratation des aluminates, qui met en jeu C_3A , C_4AF , l'eau (H) et le gypse (CSH_2).
- Ces 2 hydratations se déroulent simultanément mais pas indépendamment l'une de l'autre, du fait de couplages chimiques et thermiques.

HYDRATATION DES SILICATES

- **L'hydratation des silicates** conduit à 2 types d'hydrates :

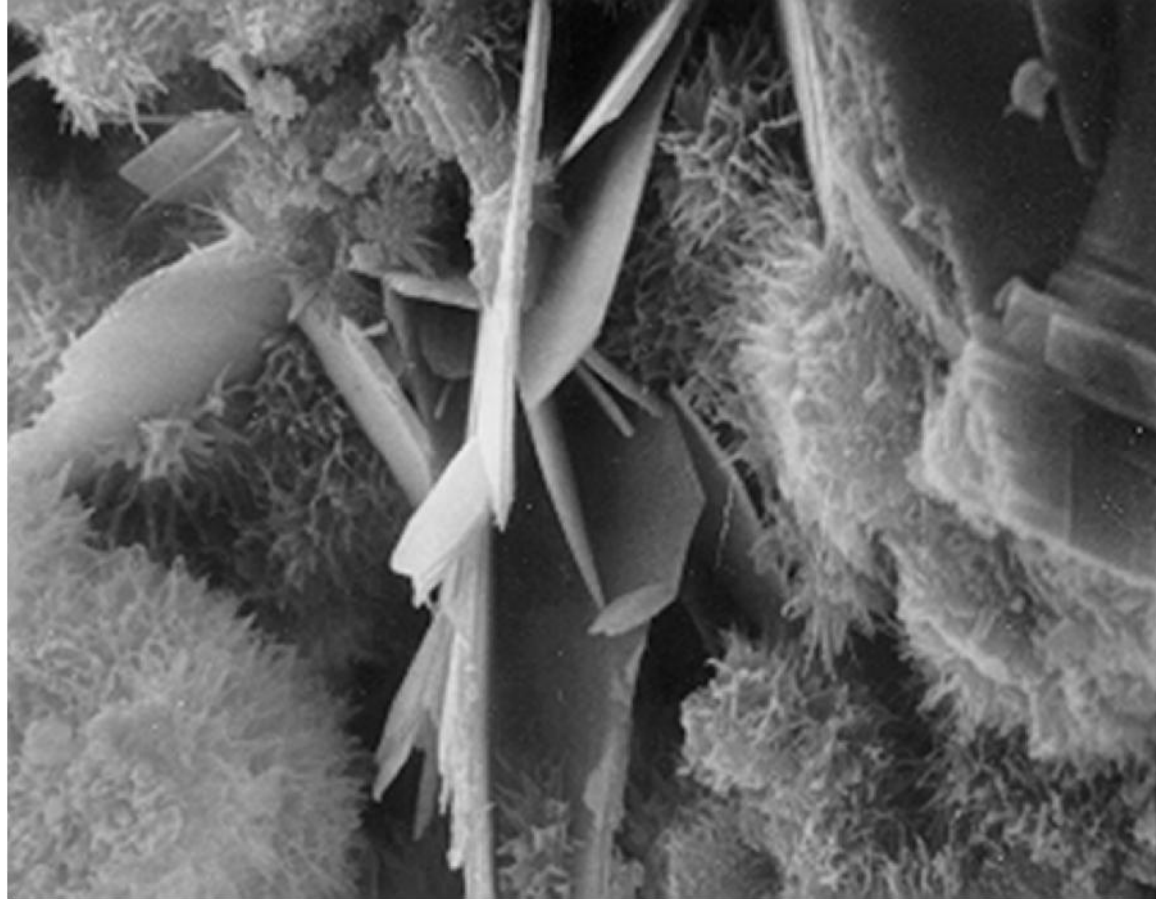


La portlandite

(cristal non-liant)

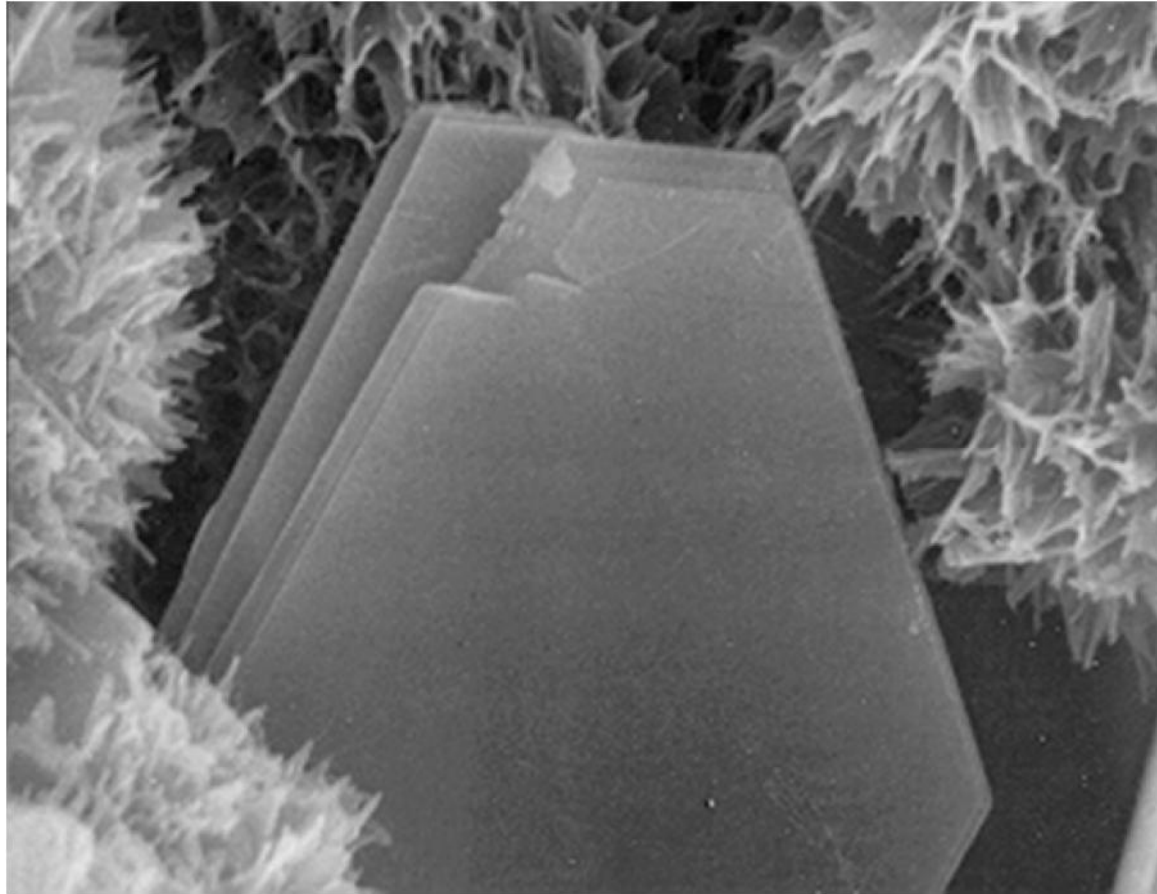
Les C-S-H : peu cristallisés ("gel") et liants, ce sont les hydrates les plus importants. Le rapport C/S dans ces CSH est typiquement compris entre 1,6 à 1,8.

HYDRATATION DES SILICATES (suite)



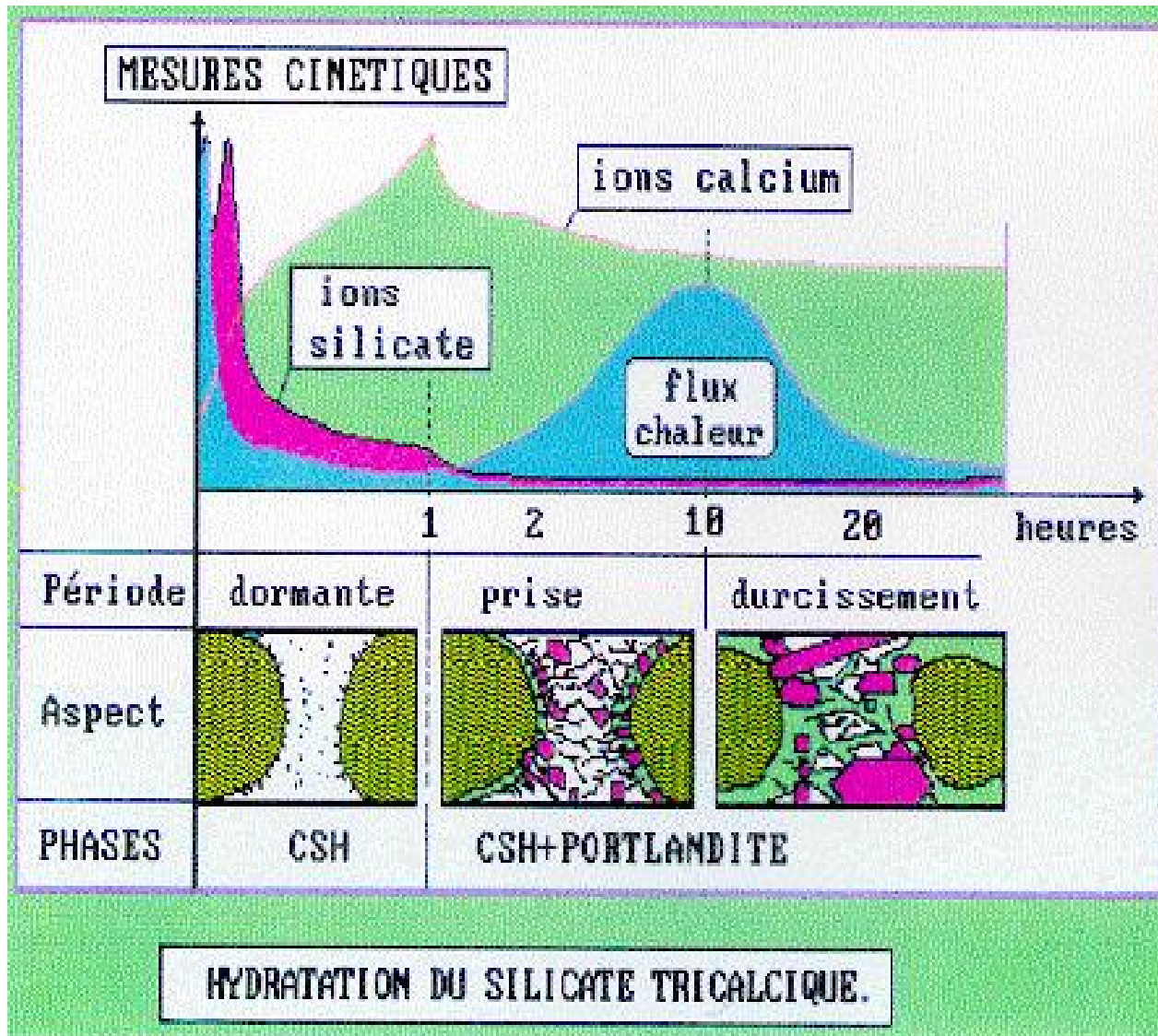
- Pâte de ciment à 7 j : Fibres de CSH (MEB 1100 x)

HYDRATATION DES SILICATES (suite)



- Pâte de ciment à 7 j : cristaux de portlandite (MEB 7000 x)

HYDRATATION DES SILICATES (suite)

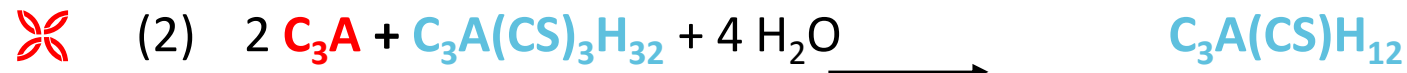


HYDRATATION DES ALUMINATES

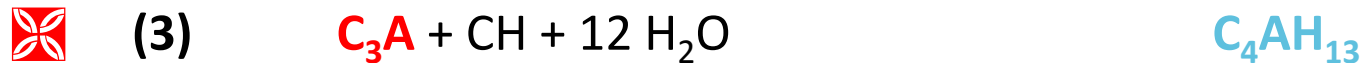
- **L'hydratation des aluminates, du C_3A en particulier,** obéit à la séquence de réactions suivantes, dans l'ordre 1, 2, 3 :



trisolfoaluminate $\xrightarrow{\text{Gypse}}$ Ettringite ou



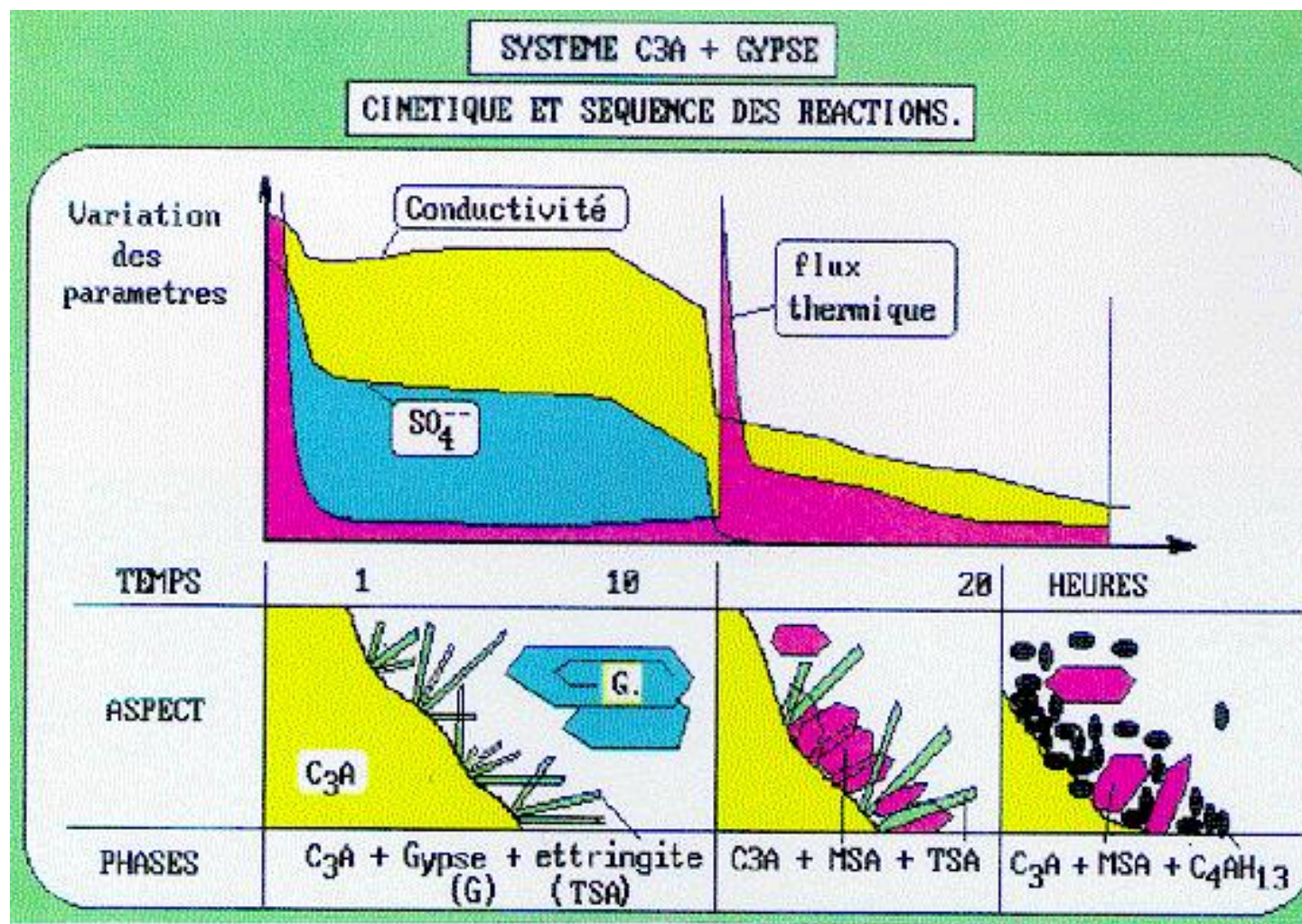
Ettringite $\xrightarrow{\text{Monosulfoaluminate}}$



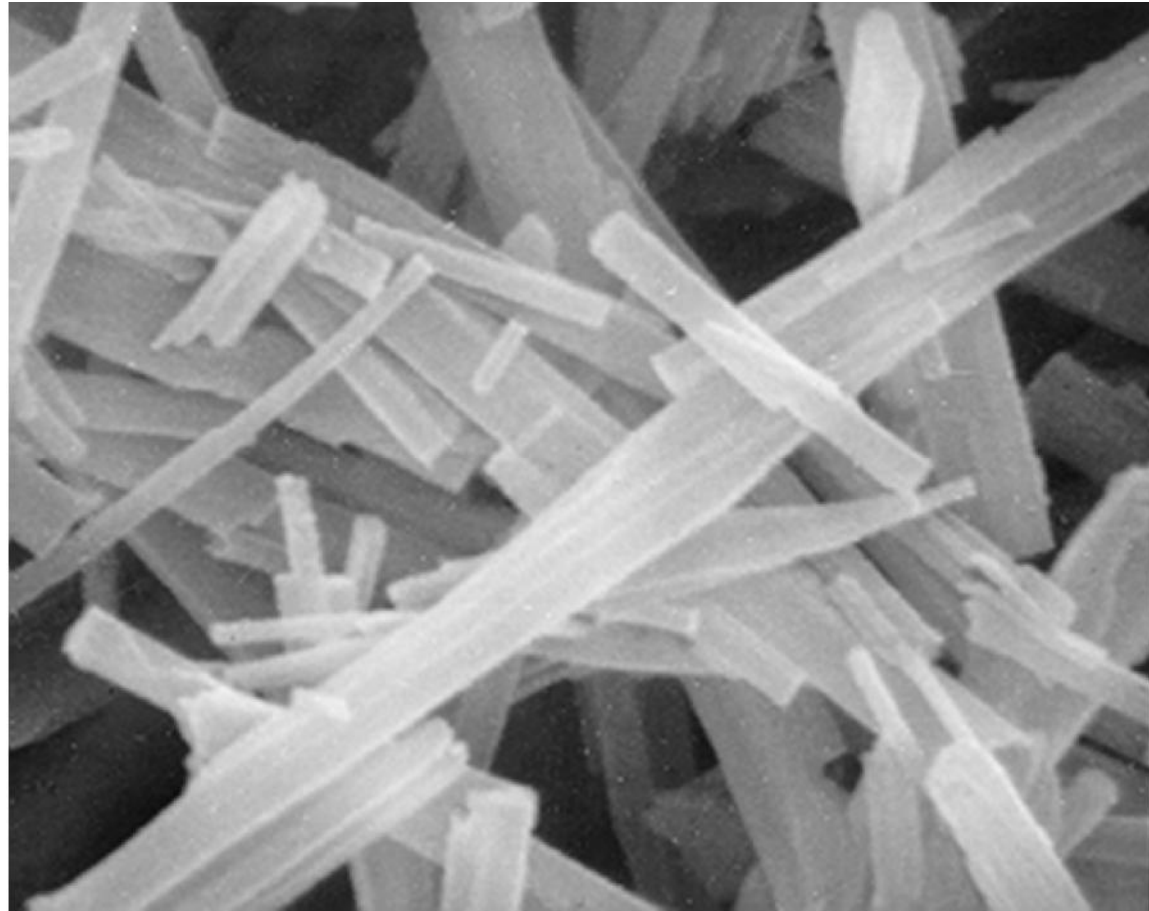
✿ L'effet régulateur de prise du gypse est lié au fait que :

✿ (2) ne démarre que quand tout le gypse est consommé dans (1)

HYDRATATION DES ALUMINATES

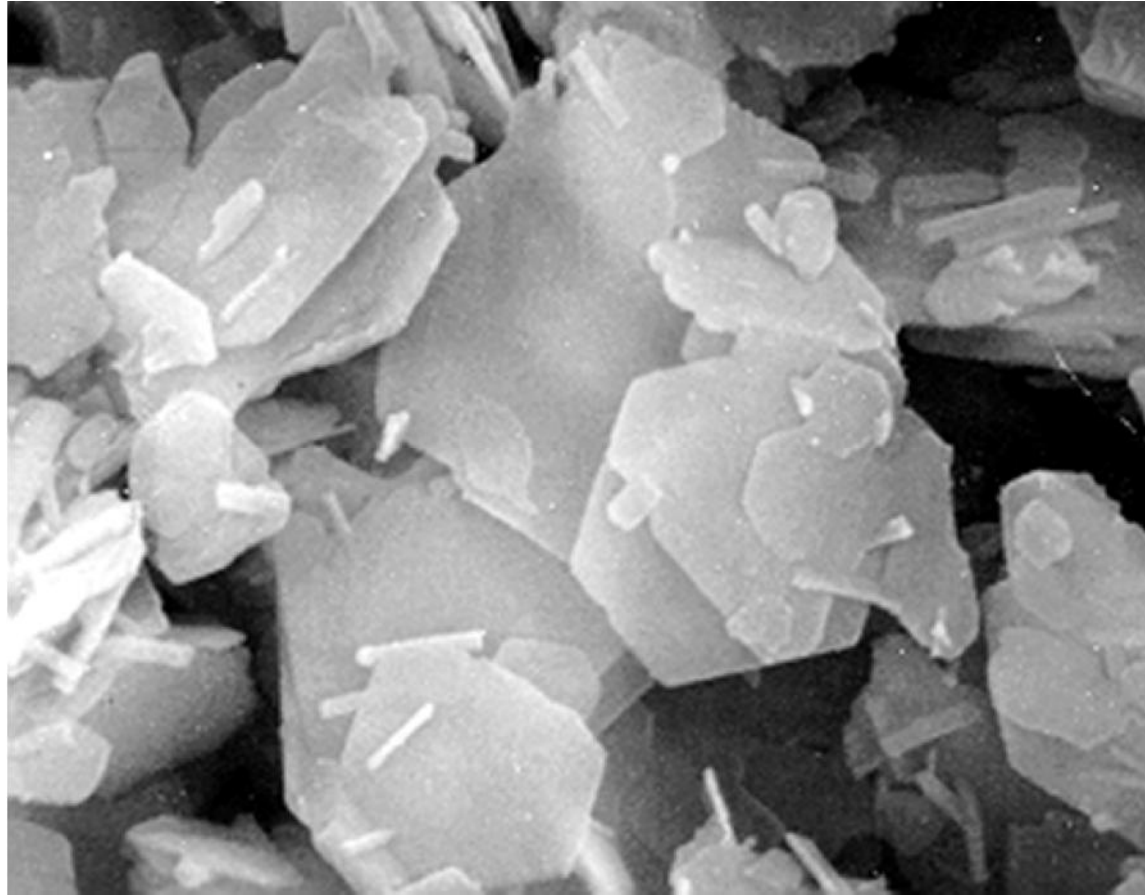


HYDRATATION DES ALUMINATES



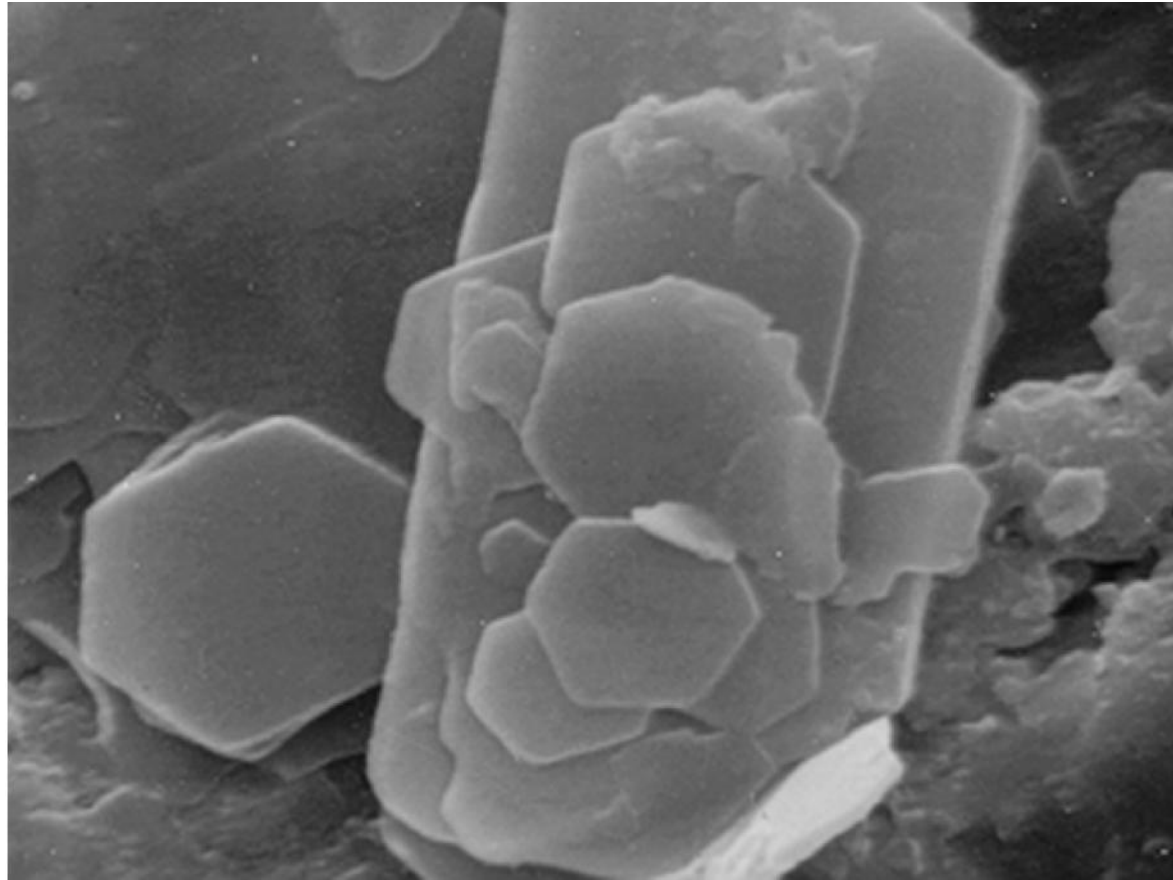
- Aiguilles d'ettringite (MEB 10000 x)

HYDRATATION DES ALUMINATES



- Cristaux hexagonaux de monosulfoaluminates (MEB 8000 x)

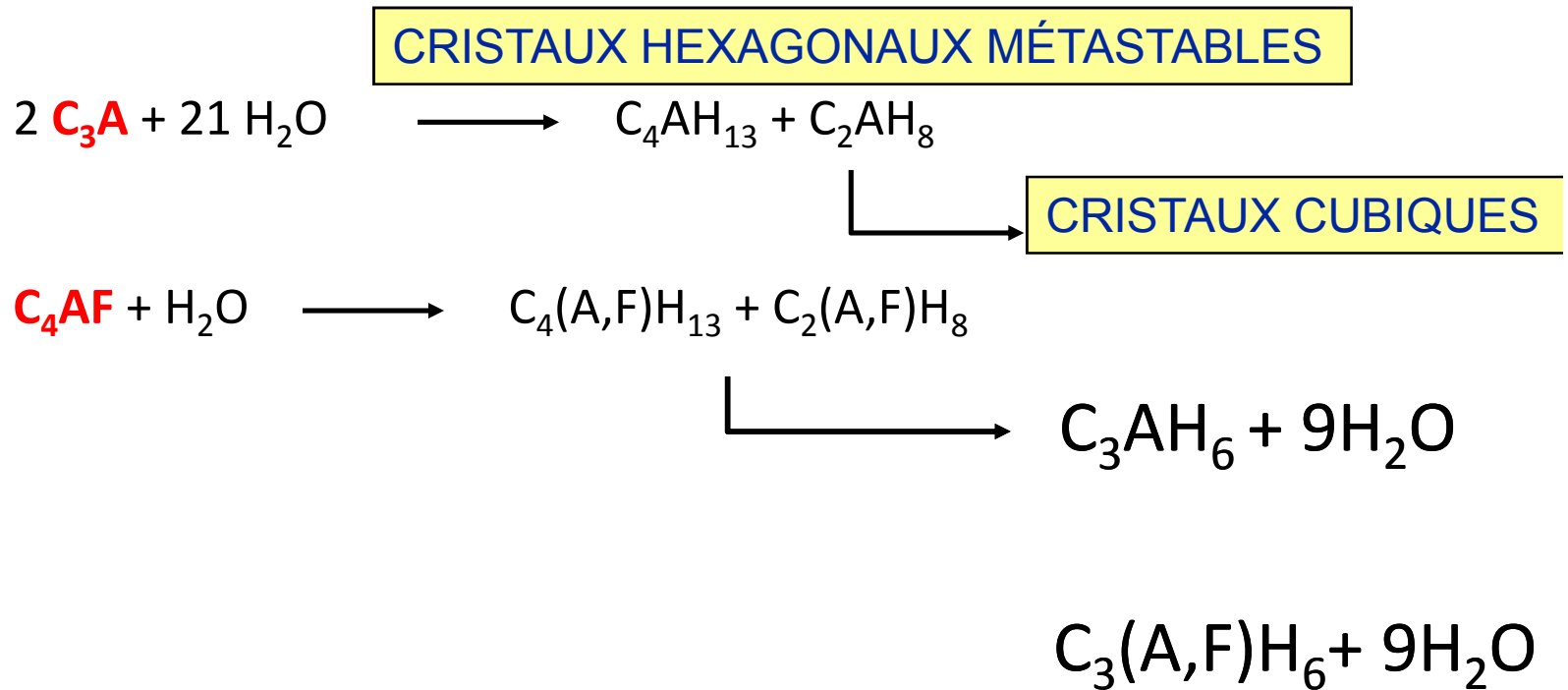
HYDRATATION DES ALUMINATES



- Cristaux de C_4AH_{13} (MEB 10000 x)

HYDRATATION DES ALUMINATES

En l'absence de sulfate de calcium, l'hydratation conduit rapidement à la formation de cristaux dont la morphologie est défavorable à une bonne rhéologie de la pâte :

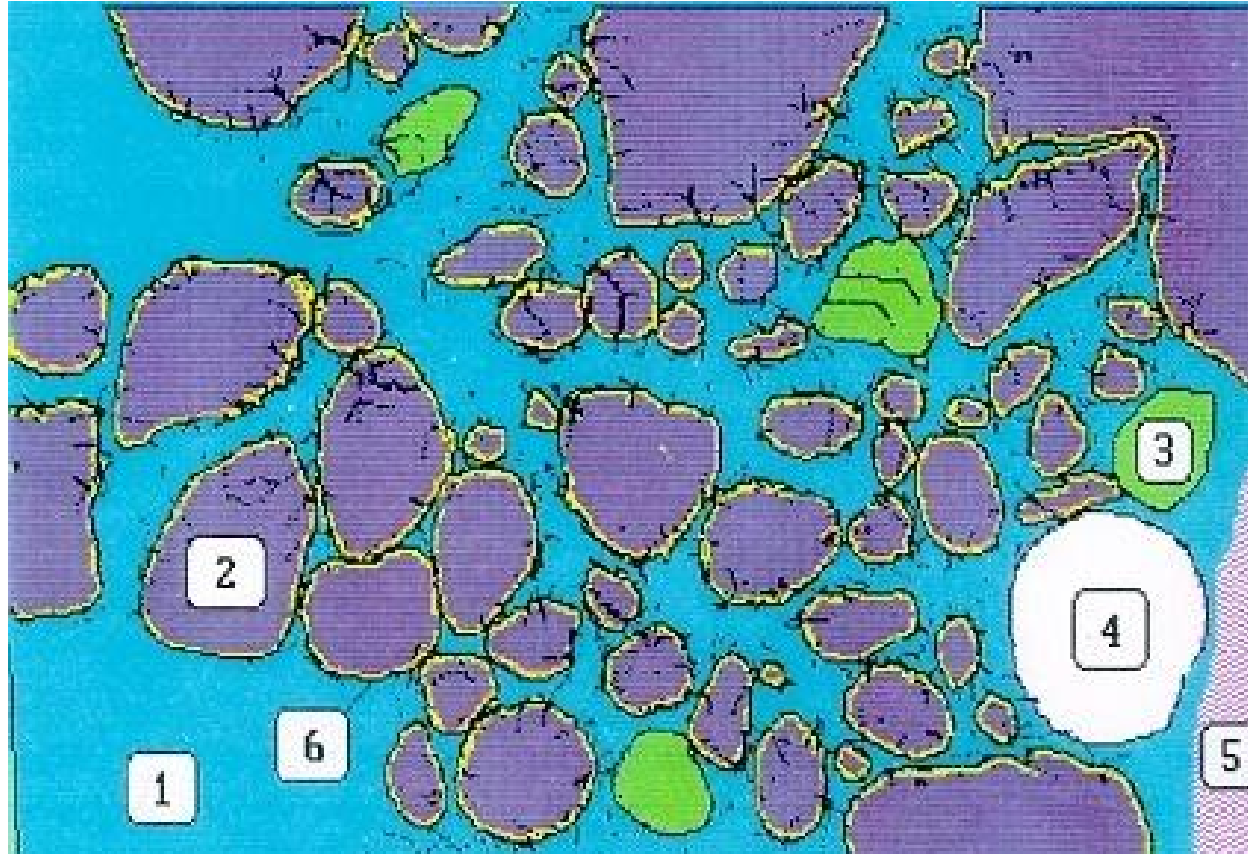


REGULATION DE LA PRISE

Réactivité dinker	Disponibilité des sulfates en solution	Temps d'hydratation			
		10 min	1 h	3 h	
		Hydratation →			CSH
Faible	Faible				ettringite
Haute	Haute				
Haute	Faible				C_4AH_{13}
Faible	Haute				$CaSO_4 \cdot 2H_2O$

EVOLUTION DE LA MICROSTRUCTURE

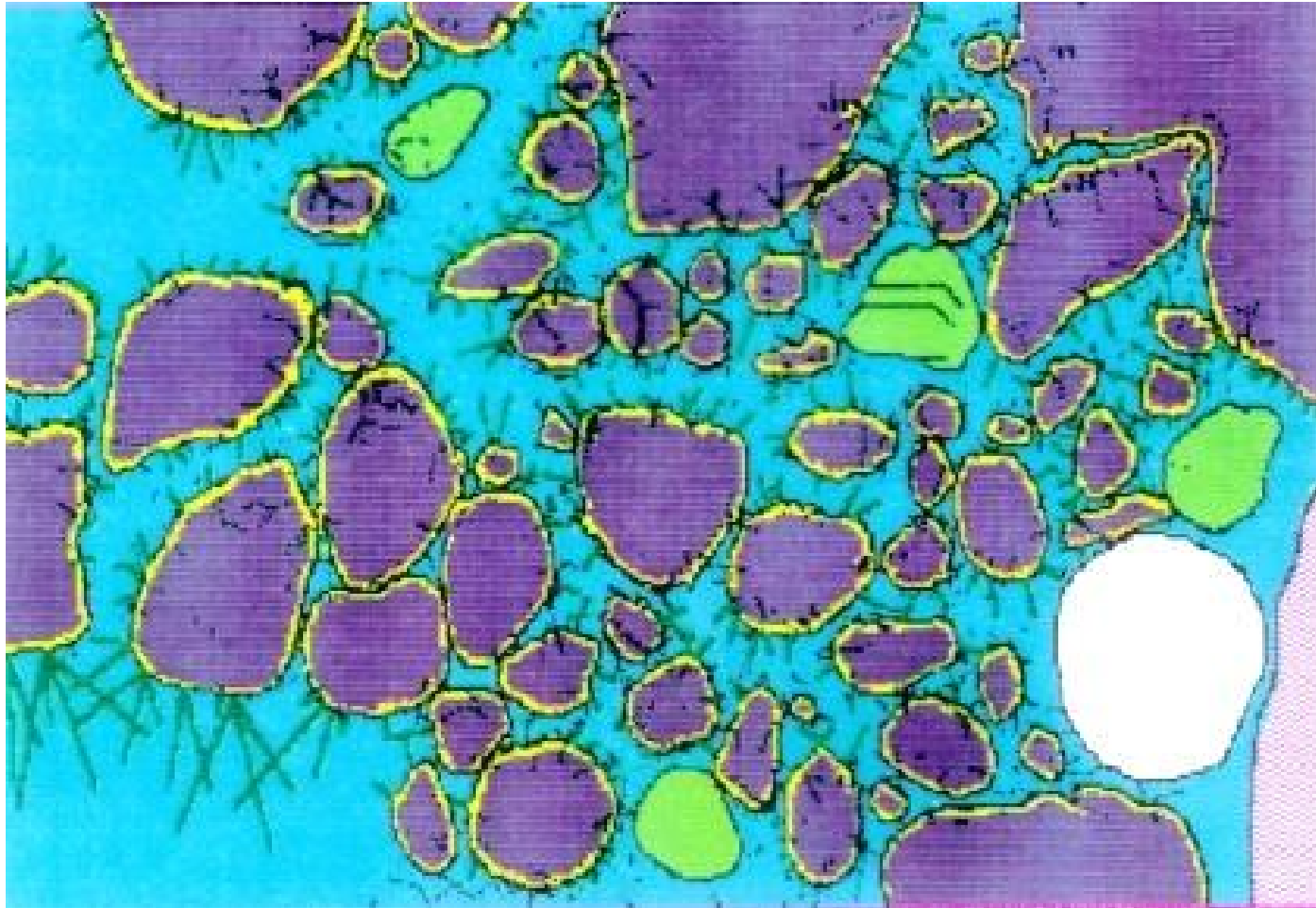
Pâte de ciment 1 h



1. Eau
2. Clinker
3. Gypse
4. Bulle d'air
5. Grain de sable
6. C-S-H

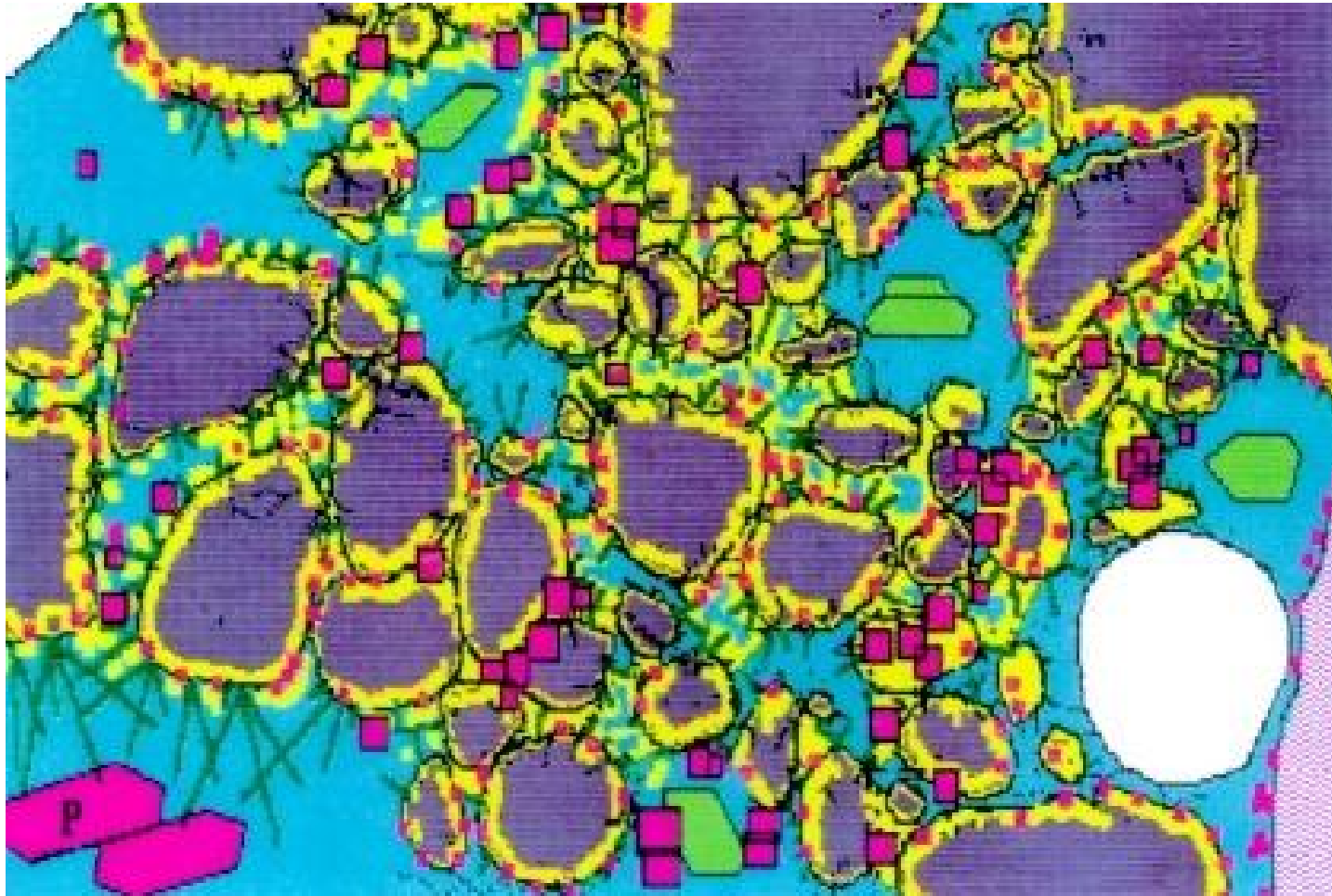
EVOLUTION DE LA MICROSTRUCTURE

Pâte de ciment 2 h - Croissance des aiguilles d'ettringite



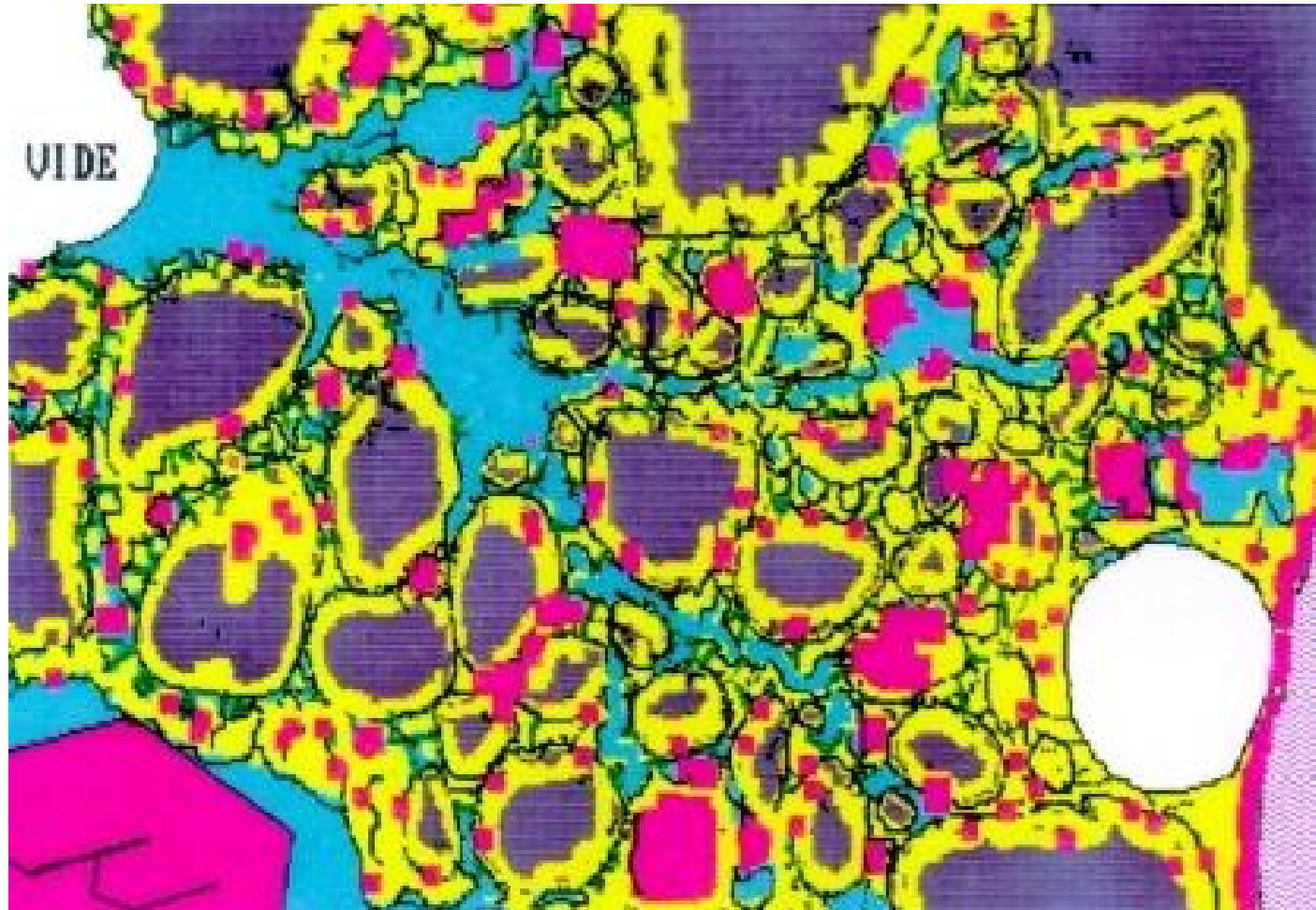
EVOLUTION DE LA MICROSTRUCTURE

Pâte de ciment 4 h - Prise - Précipitation de cristaux de Portlandite



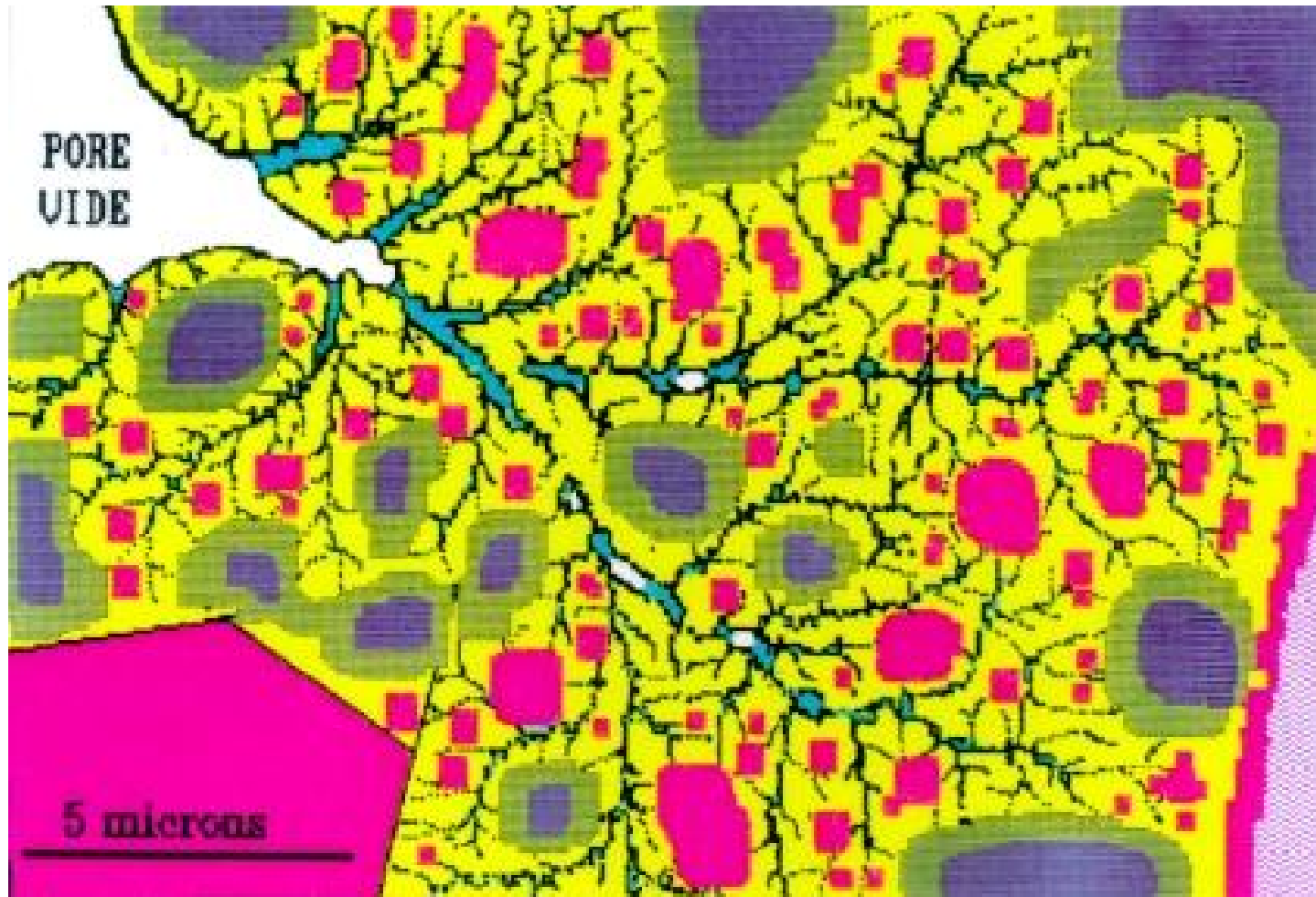
EVOLUTION DE LA MICROSTRUCTURE

Pâte de ciment 3 jours - Durcissement - Apparition de vides



EVOLUTION DE LA MICROSTRUCTURE

Pâte de ciment 1 mois - Réseau de pores capillaires qui se développe



LES ESSAIS DE CARACTÉRISATION DU CIMENT

LES ESSAIS DE CARACTERISATION

- Il existe des essais de caractérisation qui se font sur le **ciment**, sur **pâte** (ciment + eau) et sur **mortier** normalisé (ciment + sable CEN + eau).
- Sur **ciment** :
 - Finesse - Méthode Blaine (EN 196-6 / NF P 15-476)
 - Masse volumique
 - Granulométrie laser
 - Tamisage Alpine - refus à 40 µm et 80 µm
 - Colorimétrie - Niveau de gris

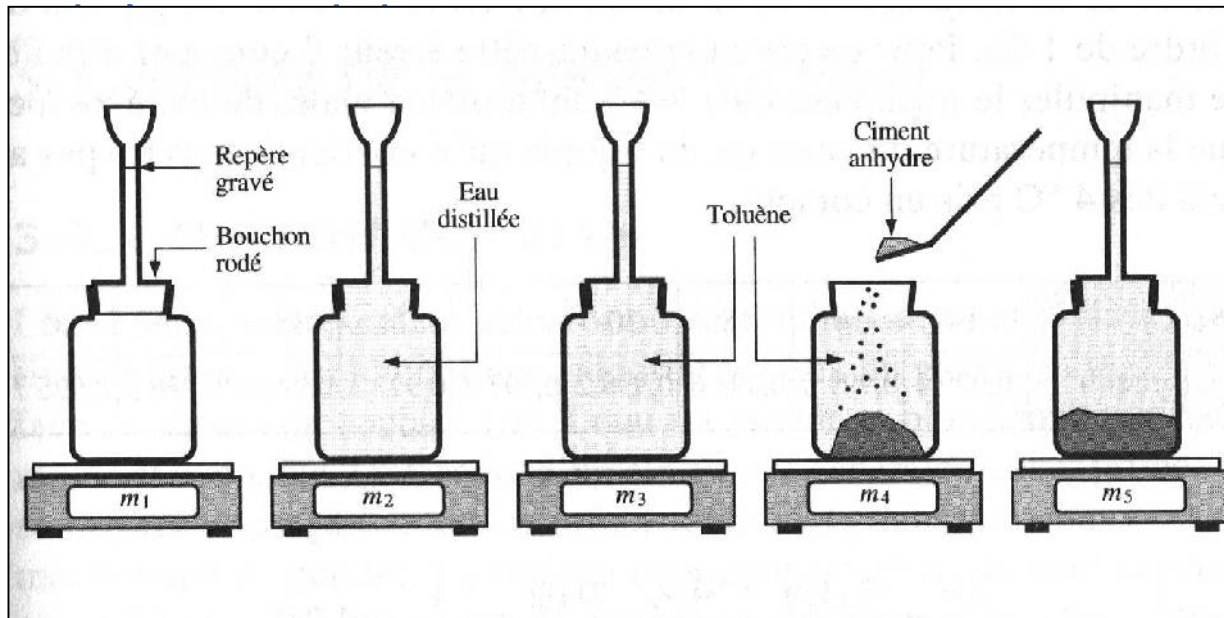
LES ESSAIS DE CARACTERISATION

- Sur **pâte** :
 - Consistance normalisée, temps de prise et stabilité (EN 196-3 / NF P 15-473)
 - Fausse prise - Essai de Tusschenbroeck (NF P18-363)

- Sur **mortier** :
 - Maniabilité (NF P 15-437)
 - Résistances mécaniques (EN 196-1)
 - Retrait gonflement (NF P 15-433)
 - Chaleur d'hydratation (EN 196-9 / NF P 15-436)

LES ESSAIS SUR CIMENT

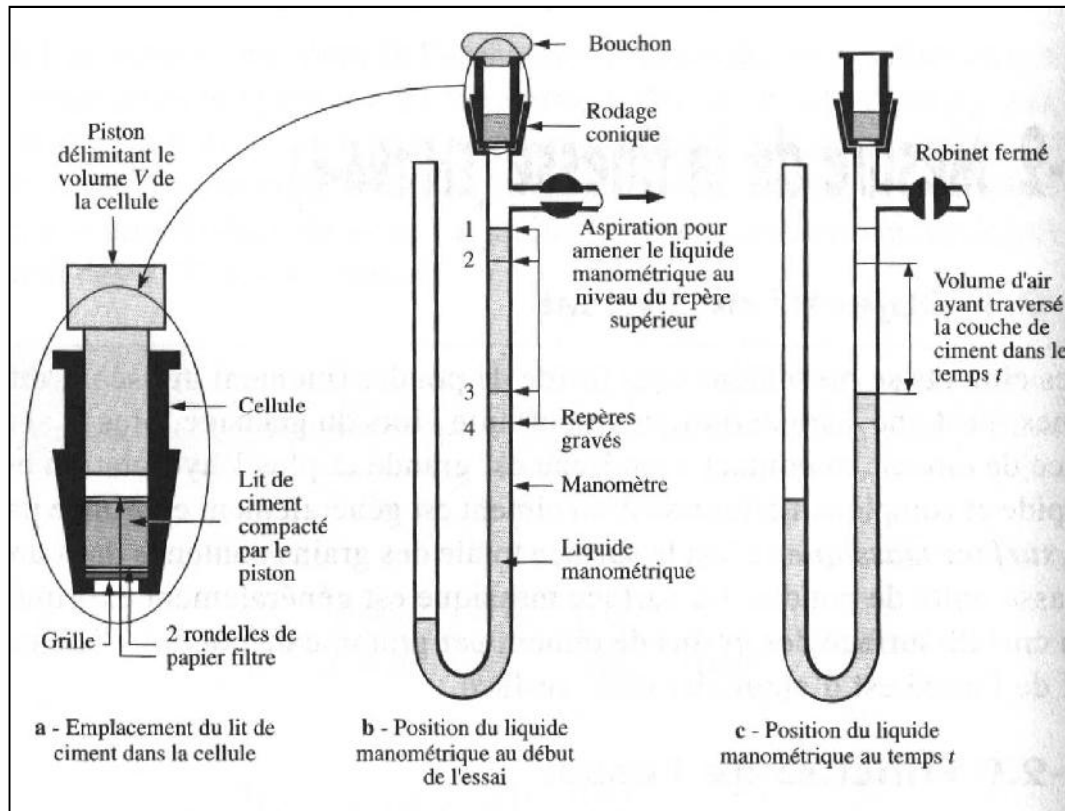
- Masse volumique
- On utilise un pycnomètre afin de travailler à volume constant. Le liquide utilisé est non réactif avec le ciment :



- La masse volumique des ciments varie de 2,85 à 3,21 g/cm³

LES ESSAIS SUR CIMENT

- Finesse - Méthode Blaine (EN 196-6 / NF P 15-476)**



$$S = K \cdot \sqrt{t} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \frac{\sqrt{p^3}}{1-p} \cdot \frac{1}{\sqrt{0,1 \cdot \eta}}$$

$$p = 1 - \frac{m_c}{V \cdot \rho_c} = 0,500$$

K : constante de l'appareil

η : viscosité de l'air à T° de l'essai

ρ_c : masse volumique du ciment

m_c : masse de ciment

V : volume de la cellule

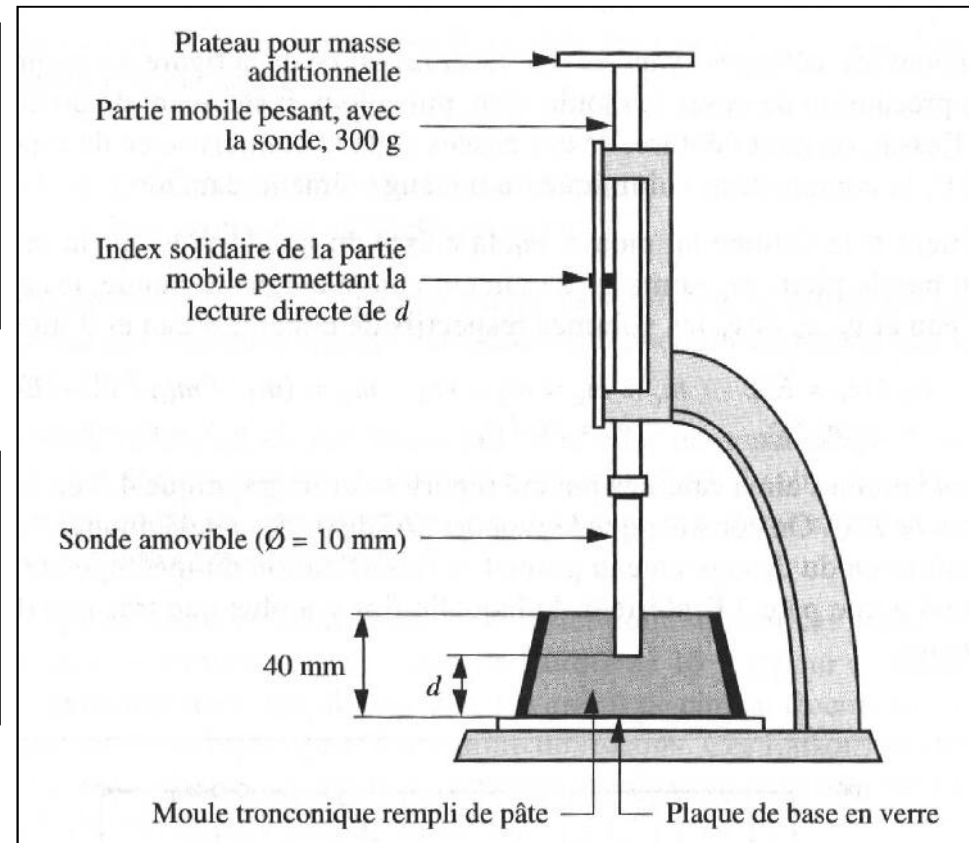
La surface Blaine des ciments varie de 3100 à 6000 cm²/g

LES ESSAIS SUR PÂTE

- Consistance normalisée (EN 196-3 / NF P 15-473)

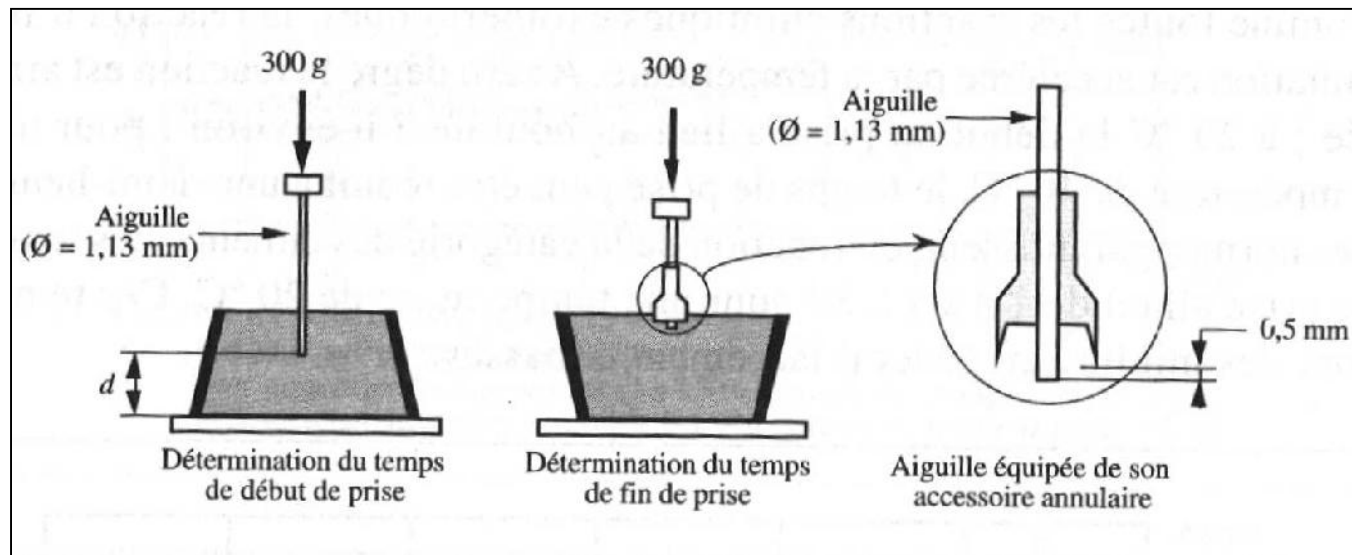
- Trouver le rapport E/C pour lequel la sonde de consistance s'arrête à :
 - $d = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$

- La demande en eau varie de 28% à 33% selon les ciments.



LES ESSAIS SUR PÂTE

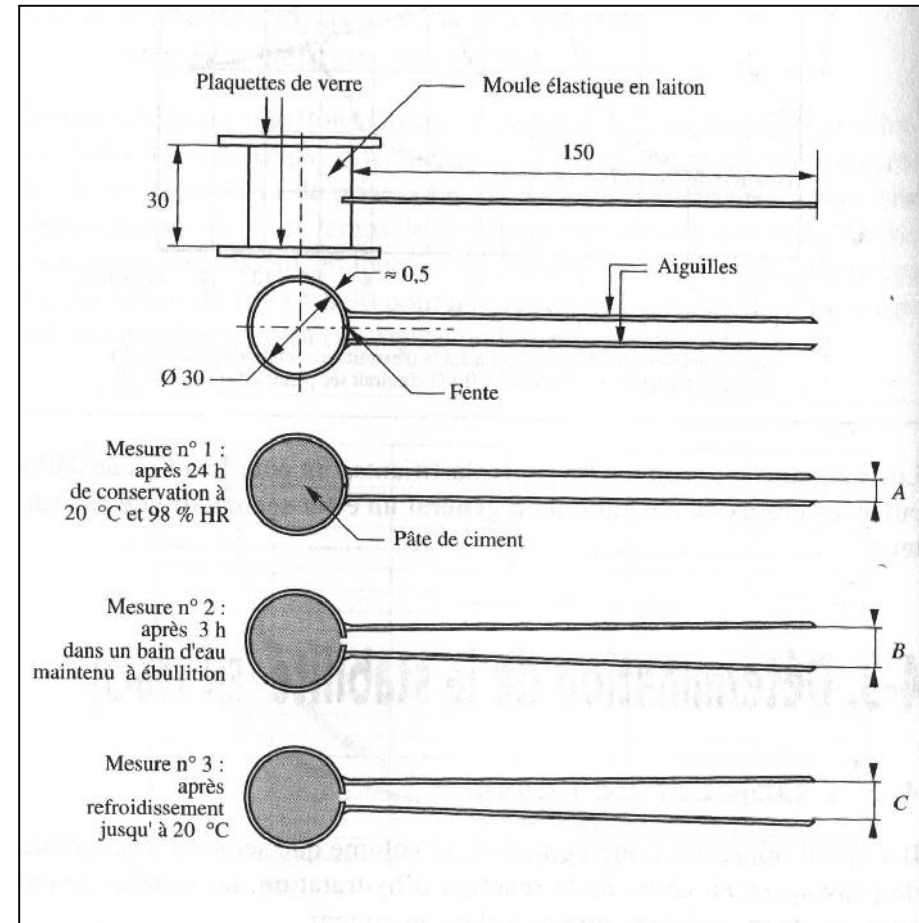
- Temps de prise (EN 196-3 / NF P 15-473)
- On fait une mesure sur une **pâte à consistance normalisée**. Le temps de **début de prise** correspond au temps au bout duquel l'aiguille de Vicat s'arrête à **$d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$** du fond.
- On retourne le moule tronconique. Le temps de **fin de prise** correspond au temps au bout duquel l'aiguille de Vicat munie de son accessoire annulaire ne s'enfonce plus que de **0,5 mm** dans la pâte.



LES ESSAIS SUR PÂTE

- Stabilité (EN 196-3 / NF P 15-473) : Appareil Le Chatelier

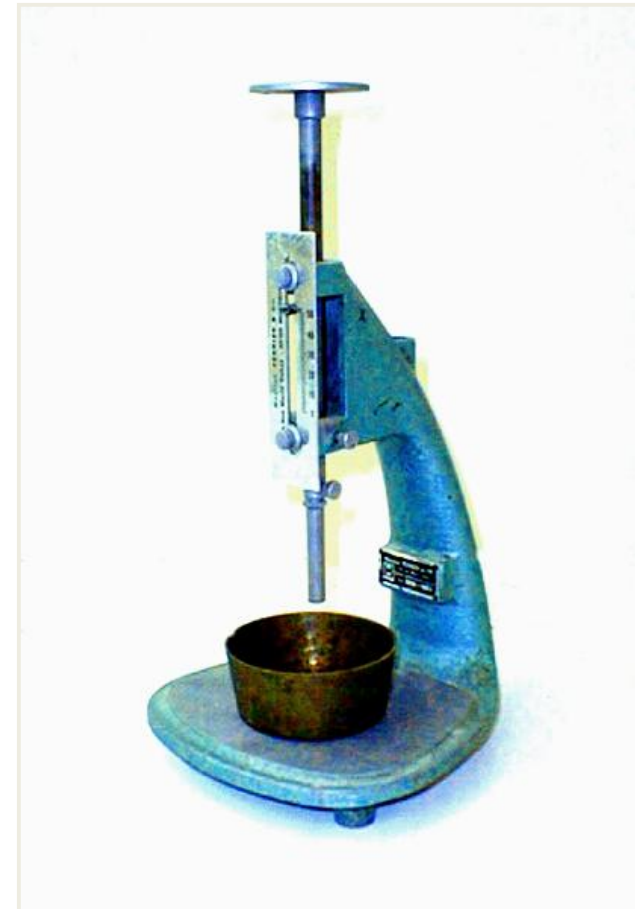
- On travaille sur **pâte normalisée**. La stabilité est caractérisée par :
 - **Stabilité = C - A (mm)**
- La stabilité permet d'estimer les gonflements que pourraient provoquer les oxydes de calcium et de magnésium contenus dans le ciment.
- La norme impose pour tous les ciments une
 - **stabilité ≤ 10 mm**



LES ESSAIS SUR PÂTE

- Fausse prise - Essai de Tusschenbroeck (NF P18-363)
 - $E/C=0,35$
 - Malaxage 1' à vitesse rapide
 - Mesures à 3', 5', 7', 10', 15'

Enfoncement à 15 minutes	Terminologie
0 à 5 mm	Très forte fausse prise
5 à 10 mm	Forte fausse prise
10 à 15 mm	Moyenne fausse prise
20 à 25 mm	Très légère fausse prise
25 à 40 mm	Léger raidissement



LES ESSAIS SUR MORTIER

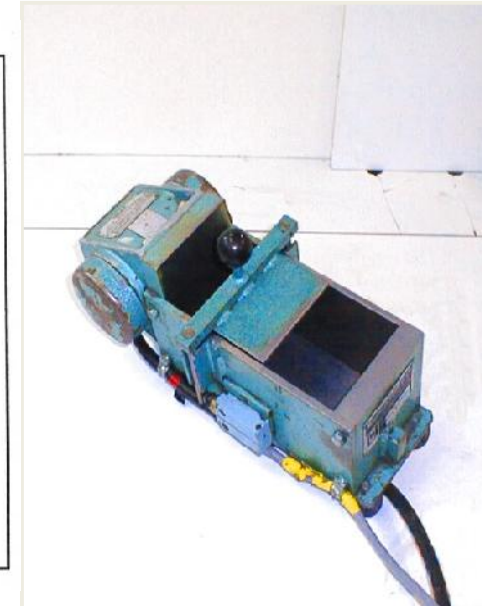
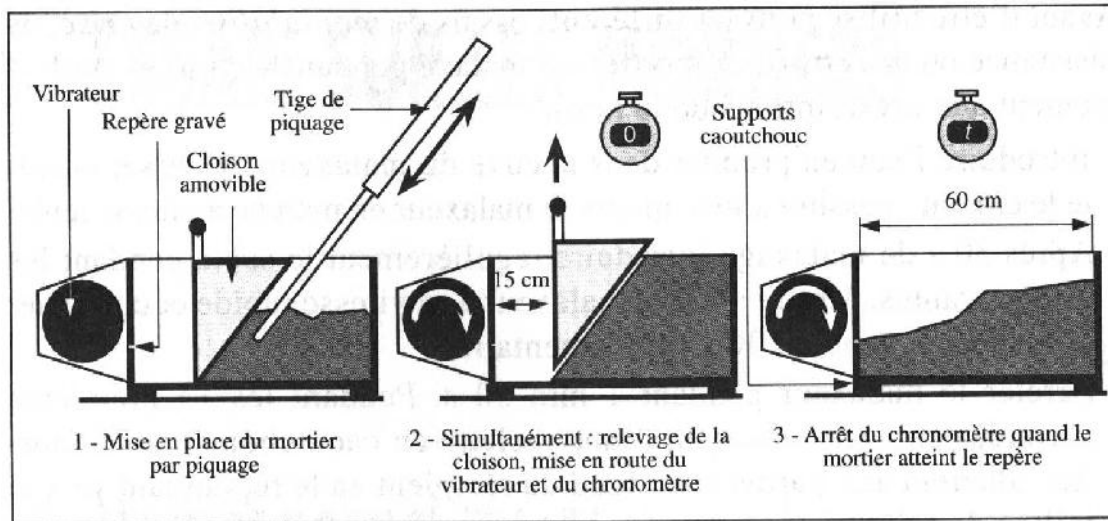
- **Mortier normalisé c'est :**

- Rapport E/C = 0,5
- Sable calibré CEN 0/2,5 mm (sac de 1350 g)
- Rapport S/C = 3
- Protocole de malaxage normalisé :

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Durée			30 s	30 s	30 s	15 s	1 min 15 s	60 s
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt		Vitesse rapide

LES ESSAIS SUR MORTIER

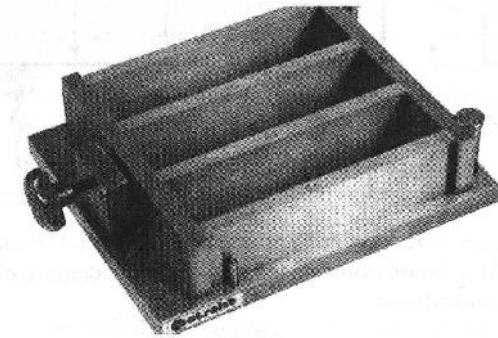
- Maniabilité (NF P 15-437)



- La maniabilité se mesure à $E/C=0,5$. Elle caractérise la capacité d'écoulement du mortier sous vibration.
- **La maniabilité des ciments varie de 3 s à plus de 25 s.**

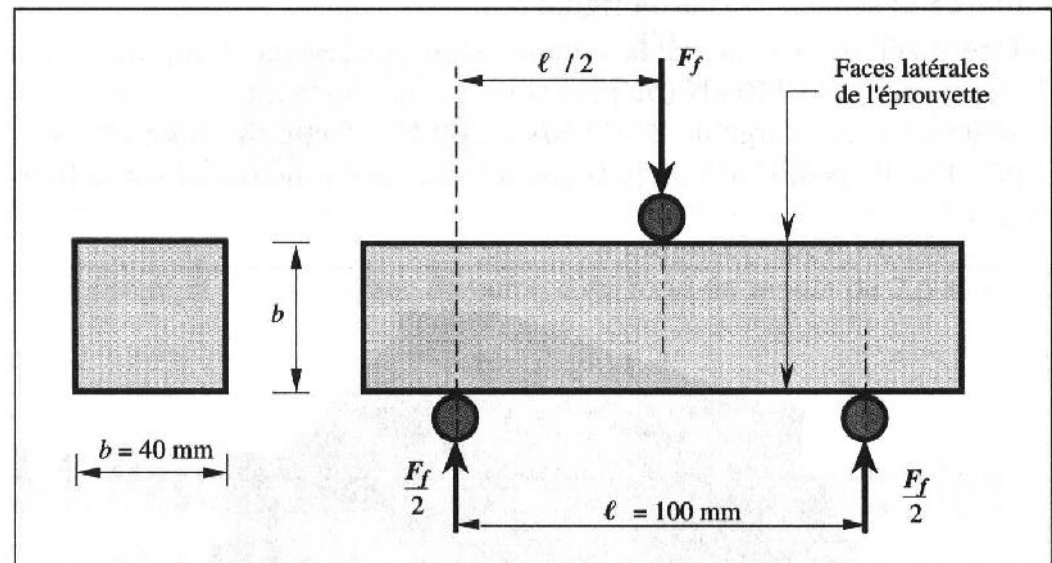
LES ESSAIS SUR MORTIER

- Résistances mécaniques (EN 196-1)
- Mesures sur 3 éprouvettes prismatiques 4×4×16 cm³ conservées sous eau à 20°C jusqu'à l'échéance de mesure.



Résistance à la traction par flexion 3 points

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b^3}$$



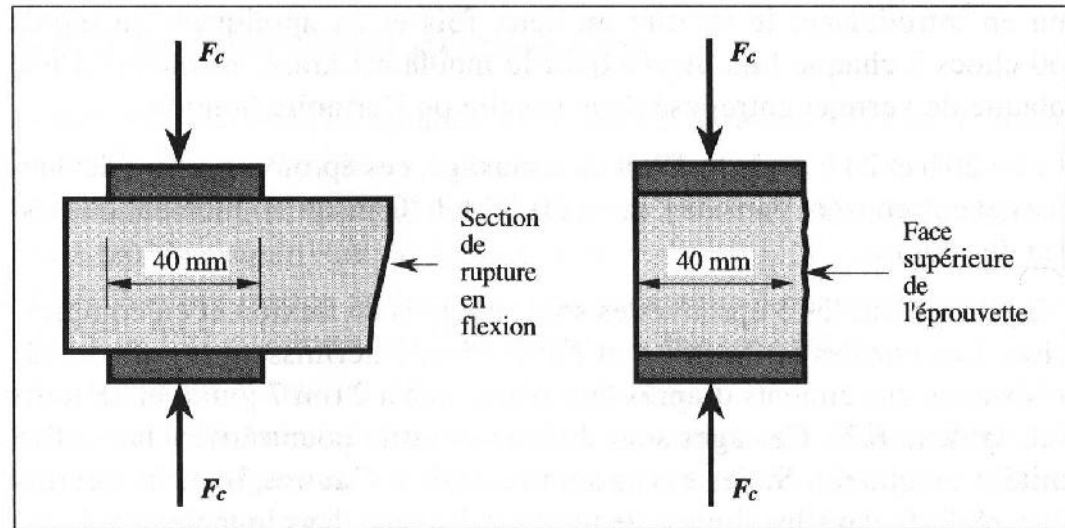
LES ESSAIS SUR MORTIER

- Résistances à la compression
- Mesures sur les 6 demi-échantillons prismatiques 4×4×16 cm³ cassés par flexion.

Résistance à la compression

$$R_f = \frac{F_c}{b^2}$$

avec $b = 40 \text{ mm}$



LES ESSAIS SUR MORTIER

- **Retrait gonflement (NF P 15-433)**
- Mesure des variations dimensionnelles de prismes 4*4*16 en fonction du temps : $\Delta L/L$ (μm)
 - retrait : éprouvettes conservées à l'air (20°C, Hr=50%)
 - gonflement : éprouvettes conservées dans l'eau (20°C)

