



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique



**Université Djilali Bounaama Khemis Miliana**

**Faculté des Sciences et de la Technologie - FST**

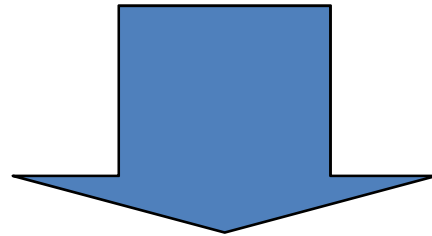
# Béton à Hautes Performances

## Chapitre 2

***M2\_Structures***

Année universitaire : 2025/2026

# Bétons a hautes performances (BHP, BTHP, BUHP et BE)



$$R_{C\ 28j} > 50 \text{ MPa}$$

## Emplois

- Ouvrages a grandes portées (Ponts, Viaduc, etc.)
- Immeubles de grandes hauteur (gratte ciel)
- Pieces préfabriquées très courtes( voussoirs pour ponts, etc.): délais de décoffrages est très courte.
- Ouvrages en milieu marin ( digues, plates formes pétrolières, etc.)
- Ouvrages de génie nucléaire (centrales nucléaires)

## Classification

	<b>BHP</b>	<b>BTHP</b>	<b>BE</b>
Rc 28j (MPa)	50 - 100	100 - 150	> 150
Emploi	Bâtiment	Projets de grandes portées et immeubles de grandes hauteurs	Réservée aux labo

# Composition

- Ciments : classe 42,5 et 52, 5 ou 42,5 R et 52, 5 R

Dosage: 400 à 600 kg/m<sup>3</sup>

- Granulats: - roche dur (granit, calcaires durs, quartz, porphyre)  
- rugueux ( G. Concassés), - Taille max 10 à 16 mm

G/S plus faible que d'habitude

- Ultrafines: fumée de silice FS (sous prod. de la sidérurgie)

FS broyé → étendue granulaire (0,05 – 0,5) μm contre (0,5 – 150) μm pour un ciment.

- E/ C = (0,26 – 0,35) → recours vers un superplastifiant est systématique

## Propriétés

- $R_c = 15 \text{ MPa} \rightarrow 24 \text{ h}$ ,  $40 \text{ MPa} \rightarrow 1 \text{ semaine}$ ,  $60 \text{ MPa} \rightarrow 28 \text{ j}$

- Retrait:

Retrait	BO	BHP
Endogène	Peu ou pas du tout	Très élevé
séchage	Très élevé	faible

- Durabilité : améliorée  $\rightarrow$  faibles porosité et perméabilité

## Haute résistance ou haute performance !!

- Au début, HR – même technologie, mais matériaux choisis avec soin
- Arrivée du superplastifiant = réduction du rapport E/C – amélioration des propriétés
- BHP? Est-ce que vague? Comment la mesurer
  - \* Rapport E/L inférieur à 0,40
  - \* Pourquoi 0,40? Difficile de faire un béton
  - \* Valeur théorique suggérée par Power pour assurer une hydratation complète!!

# Histoire de développement du BHP

- Bétons plus durables – appelés BHP
- Béton adéquatement formulé (SP, ajouts minéraux) avec un rapport E/CM (E/P)  $< 0.40$ 
  - imperméable
- ASTM C1202 – perméabilité aux ions chlorures
- BHP = bonne maniabilité, résistance élevée et une grande durabilité (Mehta, Aitcin)

## Définition

BHP est défini comme étant un béton qui satisfait les performances requises qui ne peuvent pas être atteintes en utilisant les ingrédients usuels, méthode de malaxage, mise en œuvre et mûrissement normaux

# Introduction

Développement technologique → Inciter certains producteurs à améliorer la qualité du béton

## Caractéristiques critiques

- Facilité de mise en place
- Consolidation sans ségrégation
- Résistance au jeune âge
- Résistance à long terme et propriétés mécaniques
- Perméabilité
- Chaleur d'hydratation
- Stabilité volumétrique
- durabilité

## 2. Différence entre un béton à haute performance et un béton ordinaire

- Mêmes matériaux pour les 2 bétons (ciment, sable, gros granulat, eau et adjuvants)

- **Différences:**

\* Proportions des matériaux

\* En particulier le dosage en eau et du SP

Béton ordinaire :  $E/L = 0,50 \text{ à } 0,70$

BHP  $E/L = 0,25 \text{ à } 0,35 (0,40)$

## **BHP / BHR**

- BHP offre plus qu'un BHR (une simple résistance élevée)
- BHP sont plutôt utilisés pour leur durabilité
- Perception du BHP = une avancée importante pour l'industrie
- Défis est de formuler un BHP sans avoir une résistance élevée!!

# Méthode de formulation

- Pour obtenir les BHP -- rajouter du ciment, diminuer fortement l'eau en utilisant des forts dosages en SP
- On ne peut pas fabriquer un BHP avec n'importe quels ciment et granulats.
- Il faut sélectionner les ingrédients car il est difficile et coûteux de gagner **les derniers MPa** et il est facile et pas cher de **perdre des dizaines de MPa** en rajoutant quelques litres d'eau dans le béton.

## Méthode de formulation

- Réduction de **30 à 50 L/m<sup>3</sup>** par rapport un béton ordinaire en ayant un affaissement de l'ordre 200 mm.

### Rem:

on ne peut pas fabriquer un BHP avec n'importe quels ciment et granulat. Il faut sélectionner les ingrédients car il est difficile et coûteux de gagner les derniers MPa

# Comment fabriquer un BHP ?

- Il faut réduire E/L
  - \* En Amérique du Nord, avec les ciments commerciaux, il est facile de fabriquer un BHP de **70 MPa** ( $E/L = 0,30$ )
  - \* Si on veut un BHP de **100 MPa** ( $E/L = 0,25$ )
  - \* Si on veut un BHP de **120 MPa** ( $E/L = 0,22$ )
- Pour des bétons résistants aux cycles de gel-dégel, on perd d'environ 20 MPa en ayant des teneurs en air de 4 à 6 %.

# Comment fabriquer un BHP ?

- Avec les ciments commerciaux, il n'est pas intéressant de descendre E/L au delà de 0,22, car:

→ on continue à rapprocher les grains de ciment

→ la matrice est excessivement dense autour des granulats

alors: l'hydratation non convenable?

# Comment fabriquer un BHP ?

Compatibilité ciment-adjuvant:

- 2<sup>e</sup> critère de **sélection de ciment** : comportement rhéologique
  - \* Pour des E/L faibles, à forts dosages de SP (5 à 15 L/m<sup>3</sup> ou plus)
  - \* Certains ciments développent des phénomènes de raidissement prématuré (pertes d'affaissement).

## Comment fabriquer un BHP ?

Compatibilité ciment-adjuvant:

- 2<sup>e</sup> critère de **sélection de ciment** : comportement rhéologique
  - \* L'ajout de superplastifiant à certains niveaux ne permet pas de maintenir une maniabilité constante.

## Comment fabriquer un BHP ?

- Facteurs qui influencent plus la rhéologie:
  - \* Teneur  $C_3A$
  - \* Teneur  $C_4AF$
  - \* Finesse de ciment
  - \* Solubilité des sulfates présents dans le ciment
- Tous les superplastifiants répondent aux normes d'acceptation n'ont pas la même efficacité pour les ciments utilisés dans les BHP (conditions d'acceptation des superplastifiants ne correspondent pas à celles des BHP).

## Comment fabriquer un BHP ?

- Résoudre le Pb de comptabilité ciment / SP → ajouter des matériaux cimentaires supplémentaires (fumée de silice, laitier, cendre volante...., matériaux disponibles à un prix intéressant) pour:
  - \* contrôler les pertes d'affaissement -- ces matériaux sont moins réactifs que le ciment
  - \* réduire le coût de production.

## Comment fabriquer un BHP ?

### Granulats :

- granulats propres et granulométries continue
- préférable un sable grossier ( $MF = 2,7$  à  $3,0$ )
- G.G (dimensions 10, 14, 20 mm)

## Comment fabriquer un BHP ?

Formulation des BHP :

- Il est possible de fabriquer des BHP de **70 MPa** sans air entraîné et sans fumée de silice.
- Par contre, pour fabriquer un BHP de **100 MPa** il faut utiliser de la fumée de silice (améliore sensiblement la rhéologie de béton frais)

## Comment tester un BHP ?

- Pour le béton frais, les essais sur BHP sont identiques à ceux de béton ordinaire.
- Pour béton durci: on ne peut pas tester en compression un BHP comme un béton ordinaire
- On peut utiliser des matériaux de coiffes très résistants (épaisseurs ne dépasse pas 2 à 3 mm)  
**MAIS!!!**

## Comment tester un BHP ?

- En pratique, pour  $f'_c$  à 28d > 70 MPa, pas de matériaux de coiffe
  - \* Certains chercheurs proposent d'utiliser des coussins en néoprène -----> Pb : coûtent chers. Ils résistent très mal en utilisant consécutivement plusieurs fois.

**Solution :** Surfacer (meulage) les extrémités

## Comment tester un BHP ?

### 2<sup>e</sup> Problème: **capacité de presse**

- Les anciennes presses testent des bétons entre 30 et 40 MPa sur des cylindres 150 x 300 mm
- Pour les BHP: les presses ne sont pas adaptées  
Pb de rigidité de presse (BHP a mode de rupture fragile -- brutalement, par conséquent dérèglement de la machine)

## Comment tester un BHP ?

### Solution:

- Réduire les dimensions des échantillons à **100 x 200 mm**
- Reproductibilité des résultats est meilleure  
Résultats  $f'_c$  sur 100 x 200 mm sont supérieurs de **0 à 5 %** que ceux de 150 x 300 mm.
- Mesure de module élastique du BHP se fait comme celui d'une roche (forme de courbe contrainte-déformation (hystérésis) dépend de:

# Comment fabriquer un BHP ?

## Comment tester un BHP ?

- la nature du granulat (liaison intime entre la pâte de ciment et granulat (étude faite à l'Université de Sherbrooke)

## **Choix du granulat:**

- Choix de granulat devient de plus en plus critique au fur à mesure que  $f_c$  augmente
- Facile de fabriquer un béton avec des granulats pour avoir 30 MPa à 50 MPa et de 70 MPa (granulat propre et une granulométrie continue)
- Recommander d'utiliser des granulats concassés ayant une forme cubique ou graviers fluvio- glaciaire (arrondis et rugueux et très propre)
- Préférable de choisir un granulat provenant des roches dures à grains fins et peu de plans de clivage.

## Conclusion

- Pour augmenter  $f_c$ 
  - \* Diminuer E/L
  - \* Diminuer le dosage en eau et augmenter le dosage en superplastifiant
- Pas tous les ciments et les SP permettent de fabriquer des BHP ayant une bonne maniabilité suffisante pour la mise en place du béton.
- Certains types de ciment se plafonnent rapidement à des résistance en compression.

## Conclusion

- Pas tous les SP qui offrent les mêmes efficacité avec le même type de ciment.
- Pb de compatibilité ciment/adjuvant → il est avantageux de combiner plusieurs produits cimentaires (laitier, cendre volante, FS) → réduire le coût, faciliter le transport et la mise en place du béton.
- Choisir les granulats avec beaucoup de soin Plus f'c augmente → le choix de granulats devient de plus en plus critique.

# Conclusion

- Vu le dosage en eau qui est très faible:
  - les grains de ciment sont trop rapprocher
  - contact pâte de ciment/granulat est très intime
  - zone de transition moins poreuse (plus de cristaux de chaux et étringite)
- Utiliser les techniques de mécanique de roche pour les BHP ( $f_c$ ,  $E_c$ ,  $\nu$ )
- Surfacier les extrémités des cylindres 100 x 200 mm

# Comparaison entre un béton ordinaire et BHP

Matériaux	Béton ordinaire	Béton BHP
E/L	<b>0,50</b>	<b>0,24</b>
Ciment	335	<b>475</b>
Fumée de silice	--	<b>52</b>
Liant	<b>335</b>	<b>527 (≠ 192 kg)</b>
Eau	<b>170</b>	<b>108 (≠ 62 L)</b>
Sable	950	<b>740</b>
G. granulat	1135	<b>1080</b>
WRA- Superplastifiant	780 ml/m <sup>3</sup>	<b>27 L</b>
Affaissement (mm)	110	<b>160</b>
% air	2,0	<b>2,5</b>
f'c28d (MPa)	37,5	<b>112</b>
f'c91d (MPa)	44,4	<b>127</b>
ft'28d (MPa)	3,5	<b>12,9</b>
ft'91d (MPa)	4,0	<b>13,4</b>
E'c à 56 d (GPa)	31	<b>49</b>

## **BHP?**

- Mehta (USA) et Aitcin (Canada) ont utilisé le terme BHP (béton de haute-performance) pour les formulations de béton ayant: une bonne maniabilité, bonne durabilité et résistance élevée.

### **Définition de l'ACI:**

béton qui satisfait les spécifications et les exigences d'uniformité qui ne peuvent pas être obtenues par les matériaux conventionnels et les méthodes de malaxage, de mise en place et de durcissement usuelles

<b>Normal Strength</b>	<b>20-50 MPa</b>
<b>High Strength</b>	<b>50-100 MPa</b>
<b>Ultra High Strength</b>	<b>100-150 MPa</b>
<b>Especial</b>	<b>&gt; 150 MPa</b>

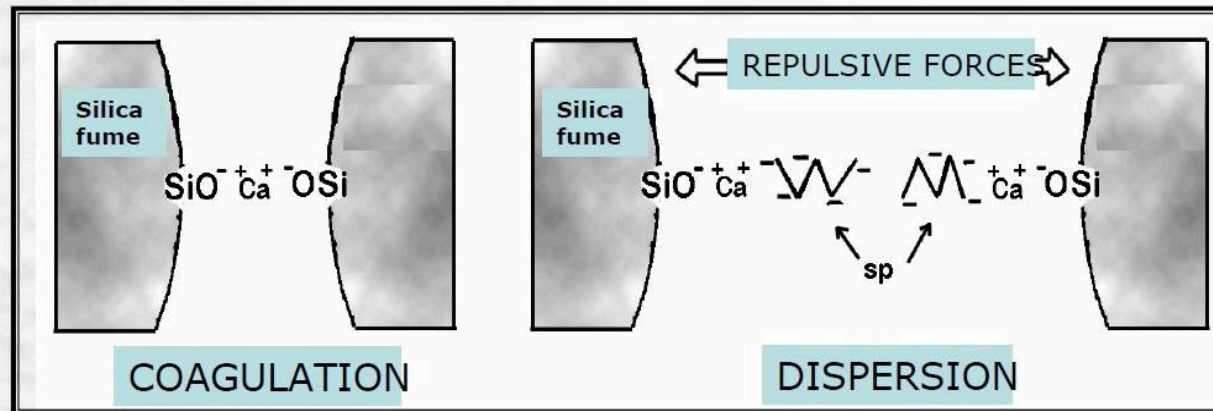
## Guide pour la sélection des matériaux

- Utilisation des matériaux cimentaires ne réduit pas seulement les coûts de production, mais améliore le maintien de la fluidité dans le temps
- La teneur optimale – évaluer la réduction des résistances entre 12 après 12 ou 24 heures en ayant les conditions climatiques ou la résistance requise
- Si la FS n'est pas nécessaire pour des résistances  $< 70$  MPa, sa présence est NÉCESSAIRE pour pouvoir développer des résistances  $> 70$  MPa

# Interaction SP- FS

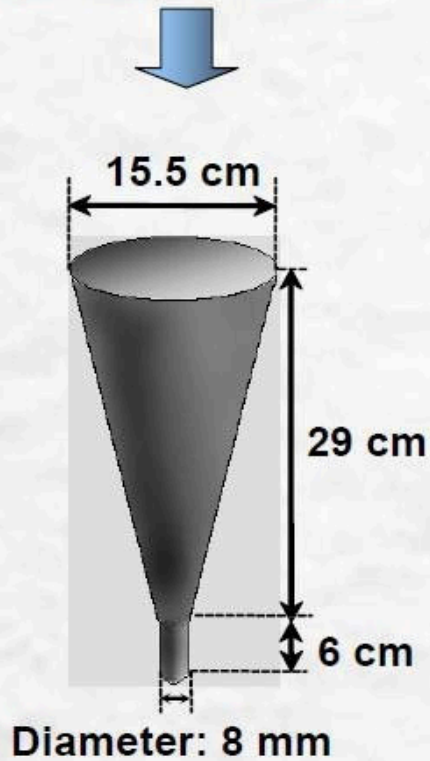
## Superplasticizer-Silica Fume Interaction

Without superplasticizer, the cement + water + silica fume system tends to coagulate, making the *use of a superplasticizer essential*.



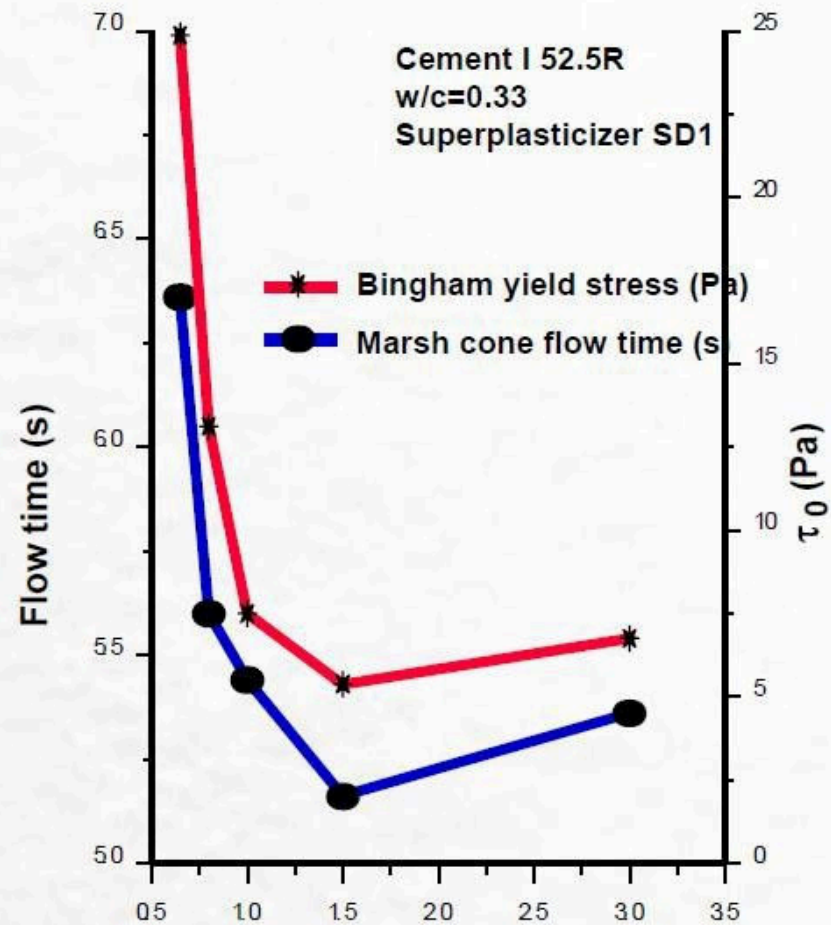


800-1000 ml

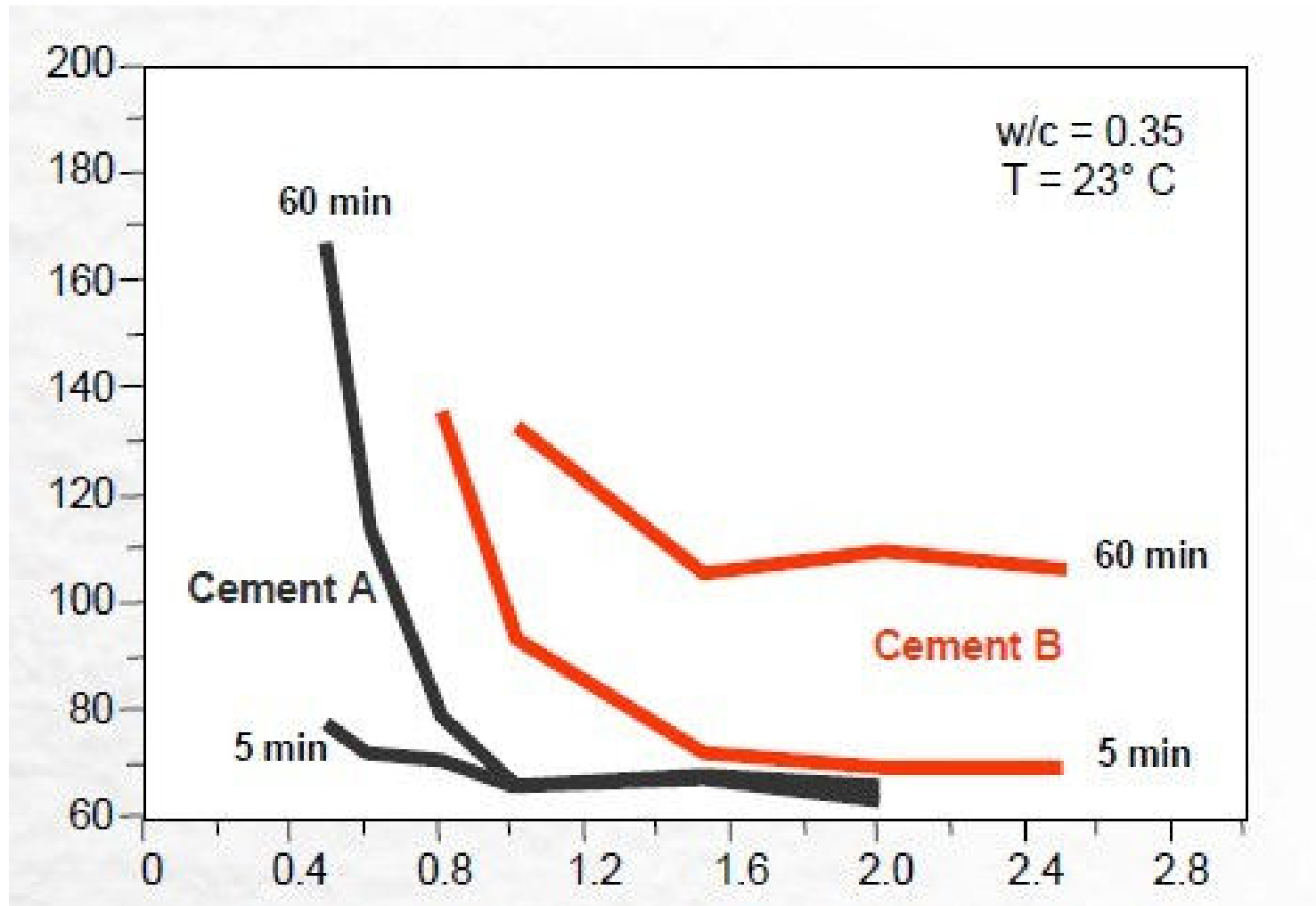


200-500 ml

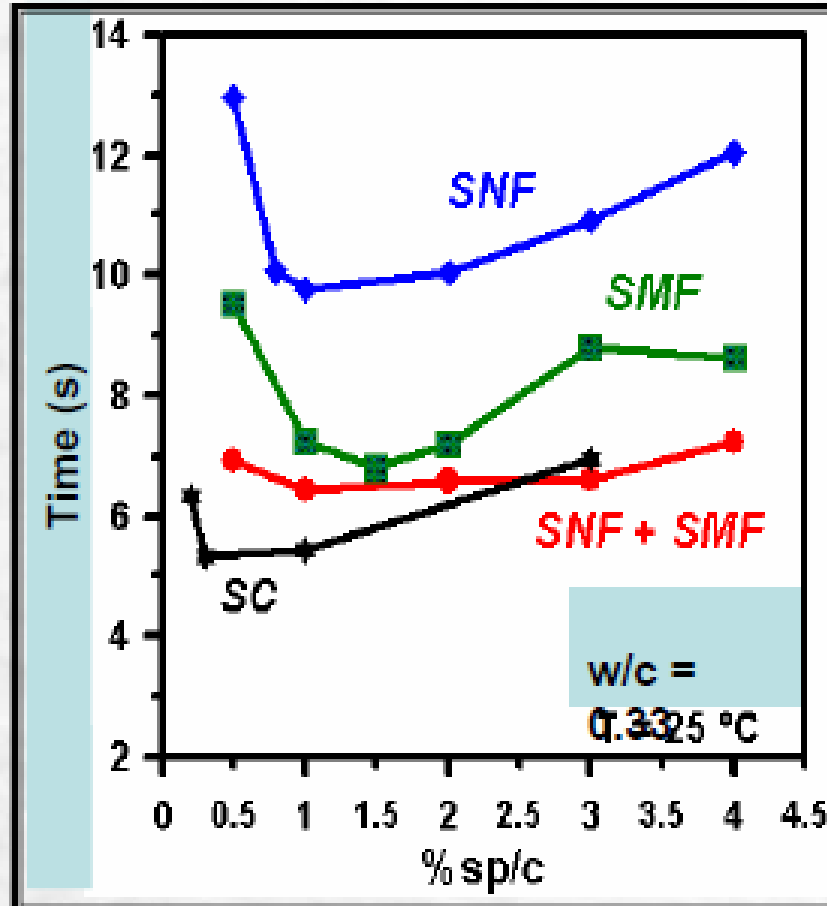
Comparison with yield shear stresses obtained with a viscometer



# Type de ciment



# Type de ciment



## COST-BENEFIT RATIO

$$CBR = \frac{\% \text{ sp/c}}{\text{s.r.}} \times (\text{cost/kg}) \times \text{time (s)}$$

$$CBR = \frac{0.25\% \text{ sp/c}}{0.3 \text{ s.r.}} \times (3 \text{ euros/kg}) \times 5 \text{ s} = 12.5$$

$$CBR = \frac{1.5\% \text{ sp/c}}{0.4 \text{ s.r.}} \times (1 \text{ euro/kg}) \times 7 \text{ s} = 26.3$$

# Cendre volante, laitier, fumée de silice et pouzzolanes naturelles

- Cv, L, FS et PN (le schiste calciné, l'argile calcinée ou le métakaolin) sont des matériaux combinés au ciment portland, contribuent aux propriétés du béton – hydraulique, pouzzolanique ou les deux à la fois
- Une pouzzolane = matériaux siliceux ou aluminosiliceux finement broyé et en présence d'humidité réagit avec le  $\text{Ca(OH)}_2$
- Recours à ces ajouts en Amérique N. depuis 70

# **Cendre volante, laitier, fumée de silice et pouzzolanes naturelles**

- Ces produits sont des sous-produits d'autres procédés et leur emploi répond à:
  - \* Conservation de l'énergie et de l'environnement
  - \* Considération techniques (propriétés et performance du béton)

# Cendre volante, laitier, fumée de silice et pouzzolanes naturelles

- Ces ajouts font l'objet d'une discussion dans la norme CSAA23.5 - Ajouts cimentaires, qui forme une partie de la norme CSAA3000 (Compendium de matériaux cimentaires)
- Classification selon cette norme:
  - \* Les cendres volantes et les pouzzolanes naturelles;
  - \* Le laitier broyé;
  - \* La fumée de silice;
  - \* Les ajouts cimentaires composés

# Cendre volante, laitier, fumée de silice et pouzzolanes naturelles

- Les cendres volantes et les pouzzolanes naturelles sont classées comme suit:
  - \* Type N – pouzzolanes naturelles
  - \* Type F – CV normalement produites à partir d’anthracite ou de carbone bitumineux et à faible teneur en calcium ( $< 10\%$ ) – carbone  $< 5\%$
  - \* Type C - CV normalement produites par la combustion de lignite pulvérisée ou de charbon subbitumineux -- carbone  $< 2\%$  . Ce type est classé:

# Cendre volante, laitier, fumée de silice et pouzzolanes naturelles

- \*\* Type CI = cendre volante de Type C dont la teneur en calcium est entre 8 et 20% (moyenne)
- \*\* Type CH - cendre volante de Type C dont la teneur en calcium est supérieur à 20% (élevée)

Les particules sphériques dans CV F apparaissent plus propres que celles dans CV C.

Cause: les alcalies et les sulfates sont en plus grande portion et se déposent à la surface des particules – poussières!!

# Cendre volante, laitier, fumée de silice et pouzzolanes naturelles

- Laitier broyé – le laitier faisant l’objet de la norme CSAA23.5 est désigné de type S.
  - \* Le laitier broyé est matériau vitreux et granulaire qui se forme lorsque le laitier de haut fourneau liquide est refroidi rapidement.
- Fumée de silice = le type de fumée de silice faisant l’objet de la norme CSAA23.5 est désigné de type SF.
  - \* Résidu finement broyé résultant de la production du silicium, du ferro-silicium ou d’alliages contenant du silicium

# Cendre volante, laitier, fumée de silice et pouzzolanes naturelles

- Ajouts cimentaires composés – est un mélange d’au moins deux matériaux parmi: les CV, PN, le laitier broyé, ou la fumée de silice.
- La nomenclature (CSAA23.5) sont:

## P1A/P2B

P1 = % composante suppl. prédominante

A = la composante prédominante

P2 = % composante suppl. secondaire

B = la composante suppl. secondaire

# Cendre volante, laitier, fumée de silice et pouzzolanes naturelles

## Exemples:

80F/20SF = 80% de la cendre volante de type F  
(entre 77.5% et 82.5%)  
20% de la fumée de silice  
(FS sera compris entre 18.5% et 21.5%)

60S/20SF = 60% de laitier de type S avec 40% de  
cendre volante de type CH  
(57.5% et 62.5% pour le laitier)  
(37.5% et 42.5% pour les CV)

# Cendre volante, laitier, fumée de silice et pouzzolanes naturelles

## Cendre volante

- Un résidu finement broyé résultant de la combustion du charbon pulvérisé et évacuée de la chambre de combustion d'un four par les gaz qui s'échappent.
- La plus part des cendres volantes sur le marché sont un sous produit des centrales thermiques
- Les particules des CV sont des sphères et certaines sont des cénosphères creuses ou plérosphères

# Cendre volante, laitier, fumée de silice et pouzzolanes naturelles

## Cendre volante

- Les particules de la CV ont une dimension entre moins de  $1 \mu\text{ m}$  et plus de  $100 \mu\text{ m}$  avec une dimension caractéristique de  $20 \mu\text{ m}$ .
- 10% à 30% des particules (en masse) sont plus grosses que  $45 \mu\text{ m}$ .
- La surface spécifique est entre  $300 \text{ m}^2/\text{kg}$  et  $500 \text{ m}^2/\text{kg}$

# Cendre volante, laitier, fumée de silice et pouzzolanes naturelles

## Laitier

- Fabriquée à partir de laitier de fonte – c'est un liant hydraulique non métallique qui est composés essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium (se sont développés dans des conditions de fusion de l'acier dans un haut- fourneau)
- Le laitier en fusion est à 1500 °C est refroidi rapidement par trempe dans l'eau = matériau granuleux ressemblant à un sable vitreux

# Cendre volante, laitier, fumée de silice et pouzzolanes naturelles

## Laitier

- Matériaux broyé à une taille de moins que  $45 \mu \text{ m}$  et une finesse Blaine de  $400$  à  $600 \text{ m}^2/\text{kg}$ .
- Le laitier broyé s'hydrate en présence de l'eau et d'un activateur (NaOH ou CaOH)
- Le laitier refroidi par air ne possède pas les propriétés hydrauliques du laitier refroidi par eau.

# Cendre volante, laitier, fumée de silice et pouzzolanes naturelles

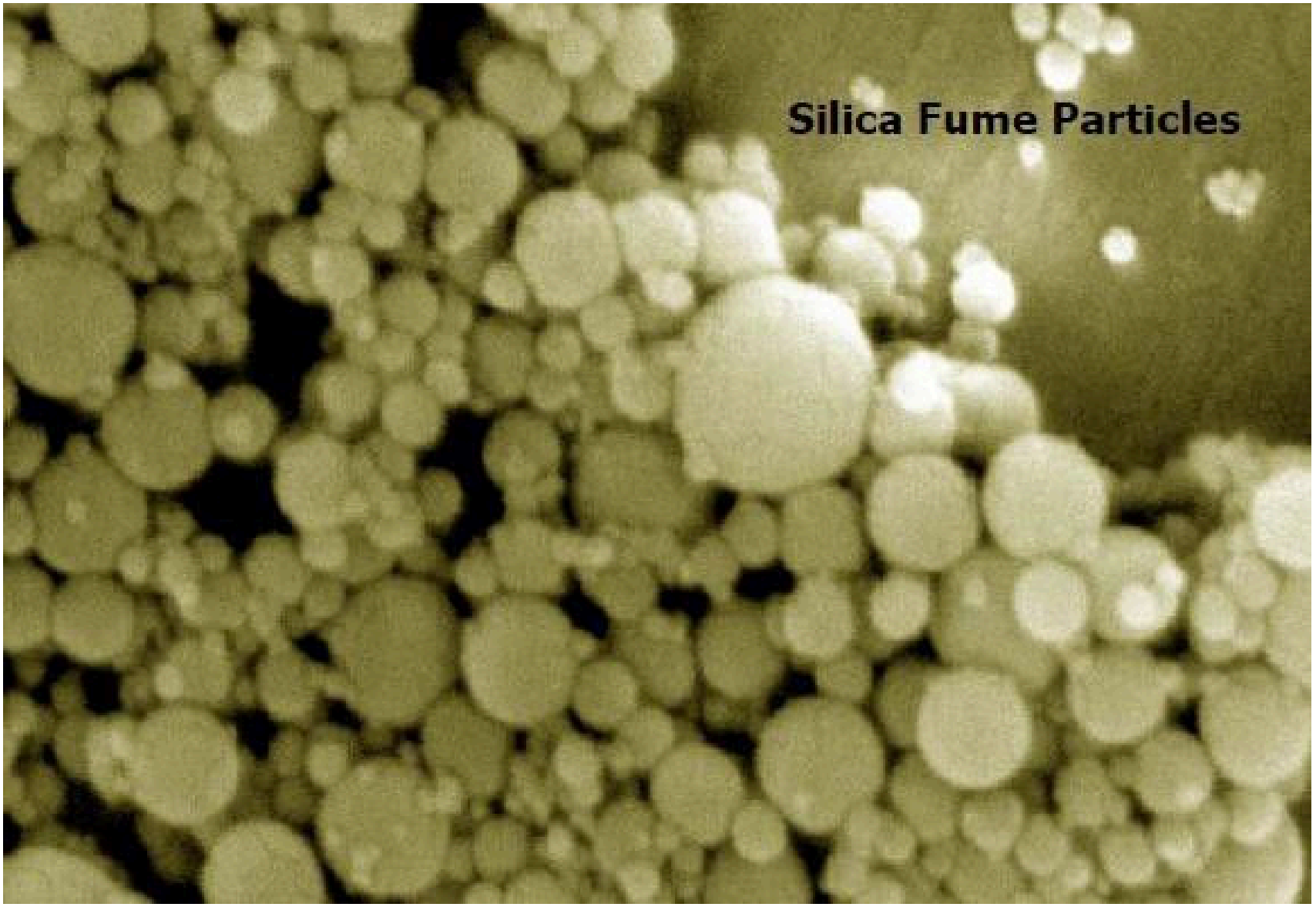
## Fumée de silice

- La fumée de silice, micro silice ou fumée de silice condensée est un coproduit résultant de la réduction du carbone et du quartz de très grande pureté dans un four à arc électrique durant la fabrication du silicium ou d'alliages de ferrosilicium
- La FS s'élève sous forme de vapeur oxydée émise par les fournaise chauffées à 2000°C.

# Cendre volante, laitier, fumée de silice et pouzzolanes naturelles

## Fumée de silice

- 85% au moins de  $\text{SiO}_2$  sous forme non cristallin
- Extrêmement fin ( $< 1 \mu\text{m}$ ) – diamètre moyen est d'environ  $0,1 \mu\text{m}$ , soit environ 100 fois plus petit que la dimension moyen d'un grain de ciment
- Surface spécifique d'environ  $20\,000 \text{ m}^2/\text{kg}$



**Silica Fume Particles**

## Métakaolin

- Kaolinite de grande pureté calciné à 600-700°C pour garder la silice et l'alumine dans un état amorphe
- Broyé en une poudre fine -- particules  $< 2 \mu \text{ m}$
- Le produit est une pozzoulane de couleur blanche de grande réactivité – suitable pour utilisation dans le béton architectural

# Avantages écologiques

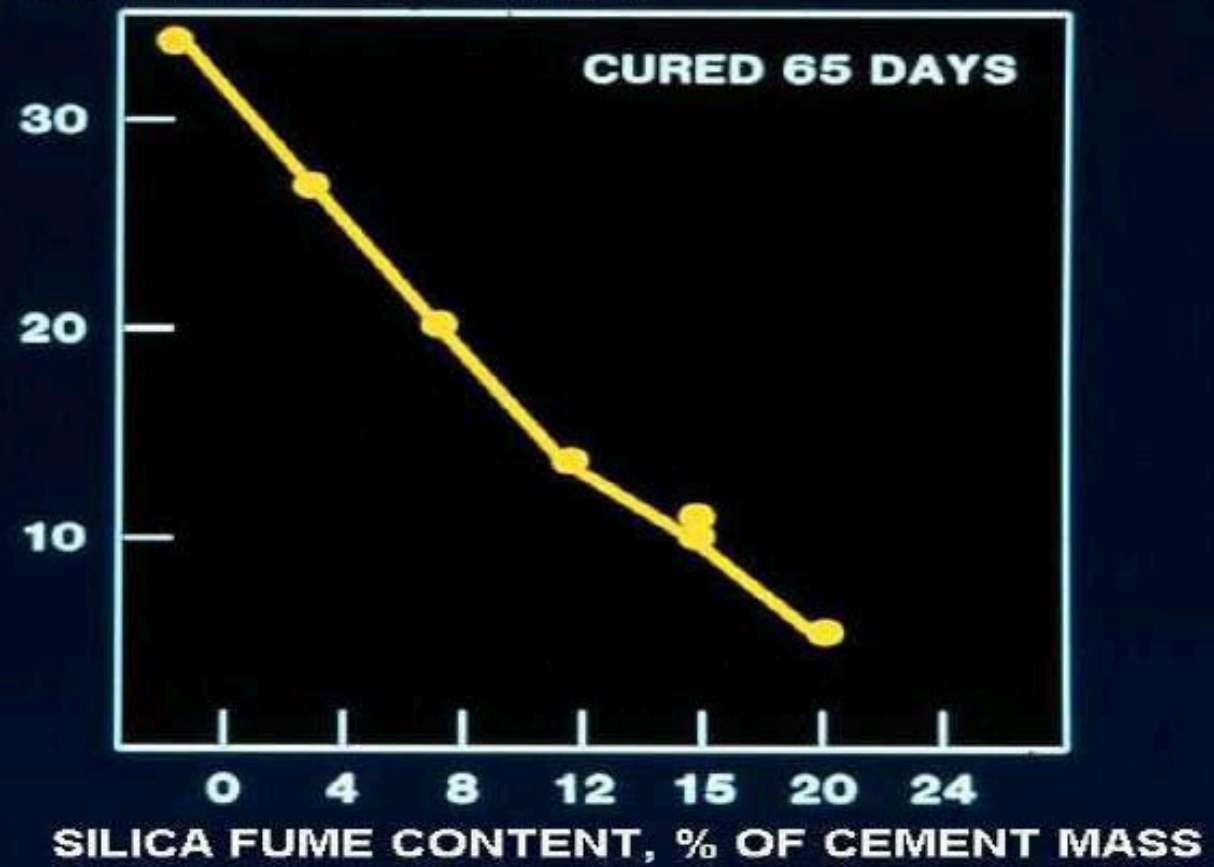
- Ces ajouts sont des sous produits - millions de tones chaque année
- Entreposage – problèmes environnementaux
- Avec un bon contrôle de qualité -- utilisation dans le béton (ajouts ou ciment composé)
- Utilisation dans le béton – énergie et coût de production

## Réaction Pouzzolanique

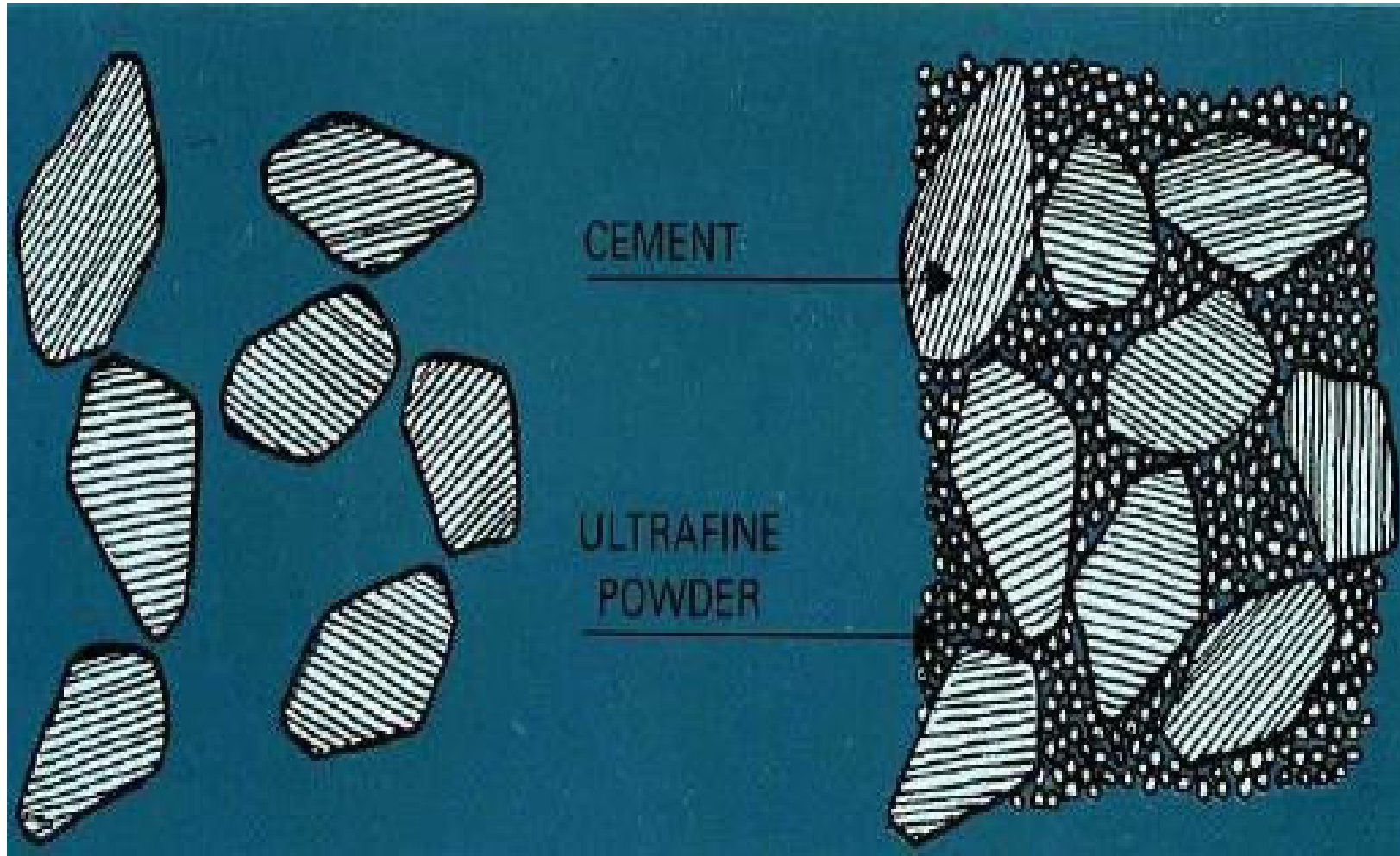
- \* silice + CH  $\rightarrow$  C-S-H
- \* Ces mécanismes ne dépendent pas de l'utilisation de ces ajouts – ajout minéral ou dans le ciment

# CALCIUM HYDROXIDE CONTENT

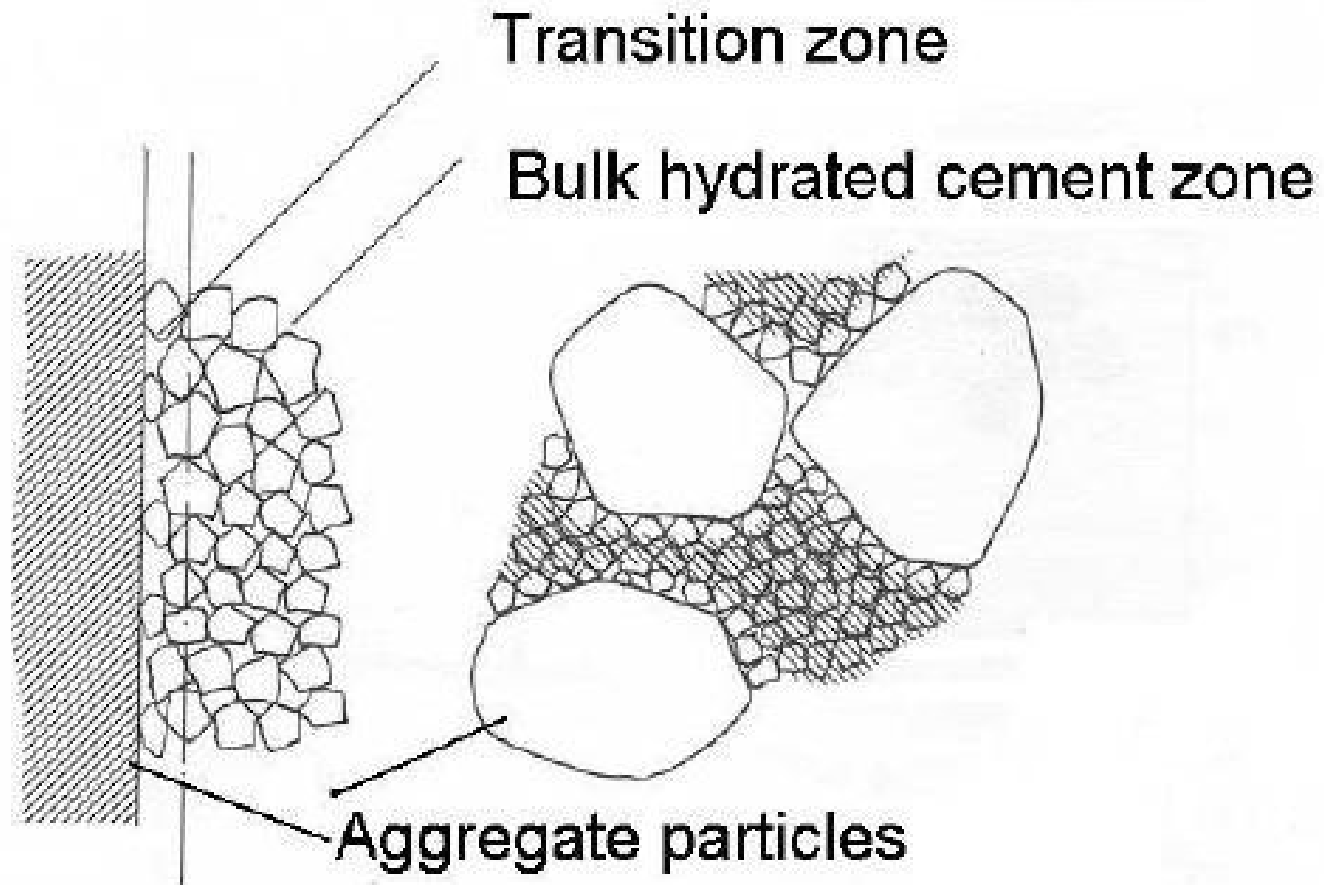
CALCIUM-HYDROXIDE CONTENT  
% BY WEIGHT OF CEMENT



# Compacité granulaire



# Zone de transition



## **Résumé: Avantages**

- Consommation de la portlandite CH
- Densification
- Amélioration de la durabilité
- Réduit la fissuration thermique
- Améliore la maniabilité et la cohésion
- Réduit le ressuage et la ségrégation
- Augmente les résistances