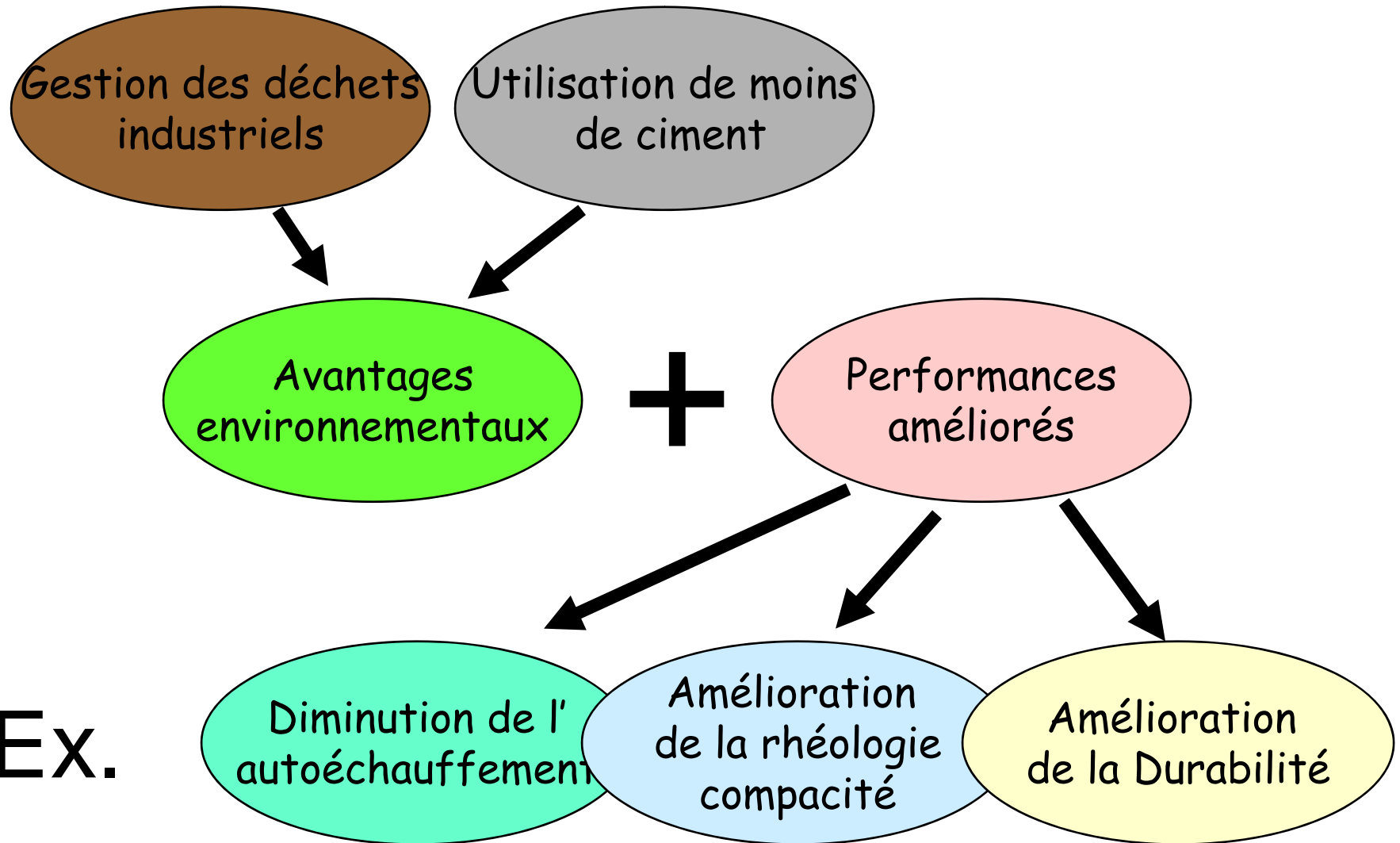


SCMs

Supplementary Cementing Materials

Conséquences



Les SCMs ne sont pas des matériaux inertes, ils ont une action, soit:

pouzzolanéique

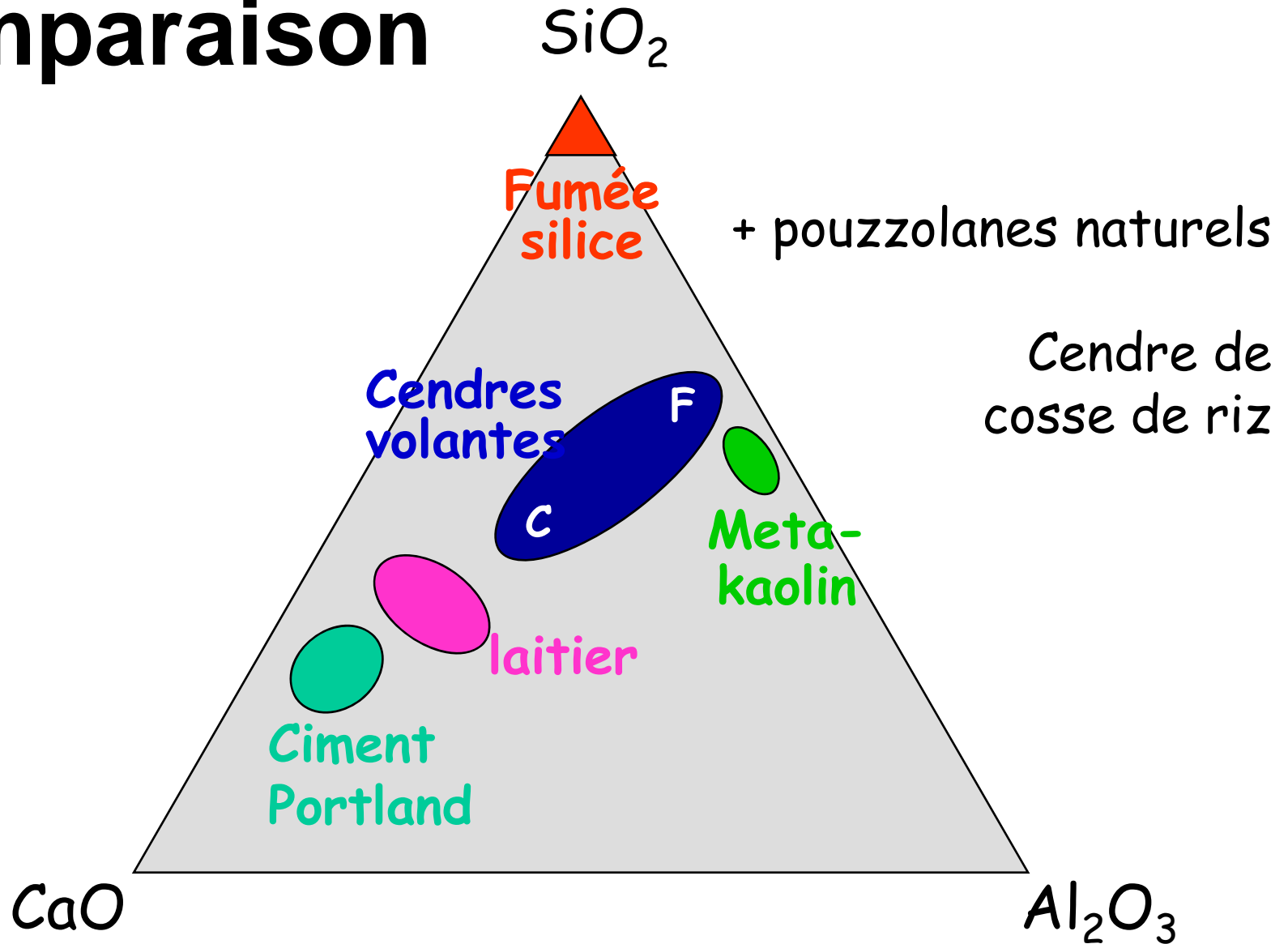
- Réaction avec le CH, hydroxyde de calcium pour former plus de C-S-H

soit

Hydraulique

- Formation de plus d'hydrates

Comparaison



Note: disponibilité local

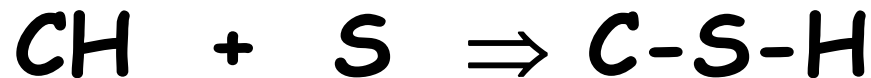
Les pouzzolanes:



Les volcans produisent des cendres riches en verre de silice et alumine.

Les pouzzolanes:

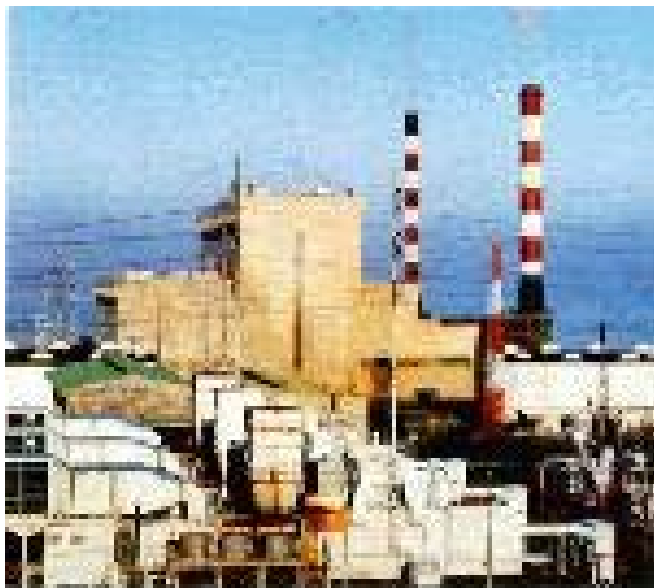
Les Romains utilisaient les cendres volcaniques, du voisinage de **pozzoli**, **les pouzzolaneas** mélangés avec de la chaux:



Ces ciments ont eu les propriétés supérieures et étaient utilisés dans les bâtiments montrants une bonne durabilité comme le Pantheon.

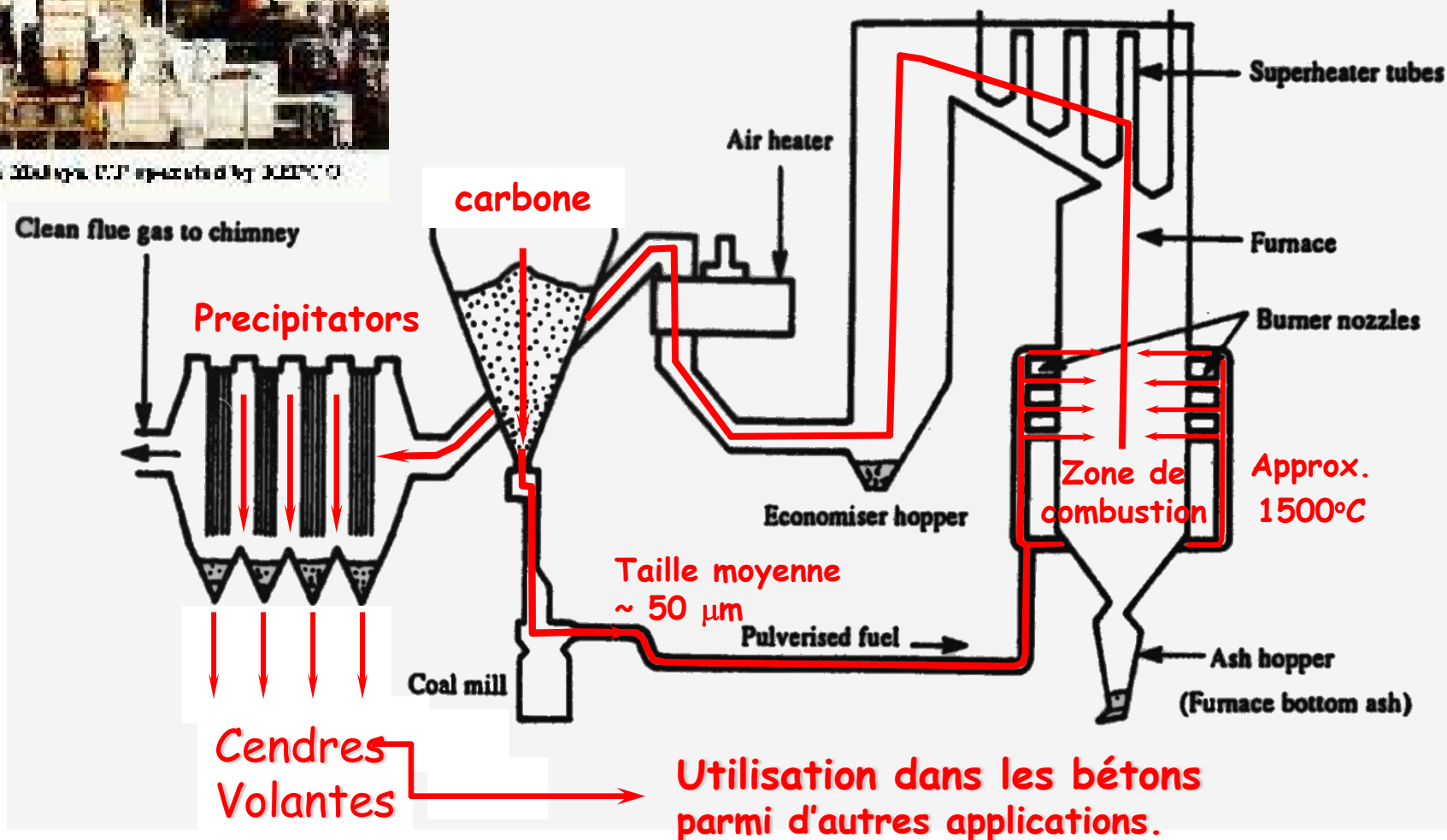
Les pouzzolanes synthétiques:





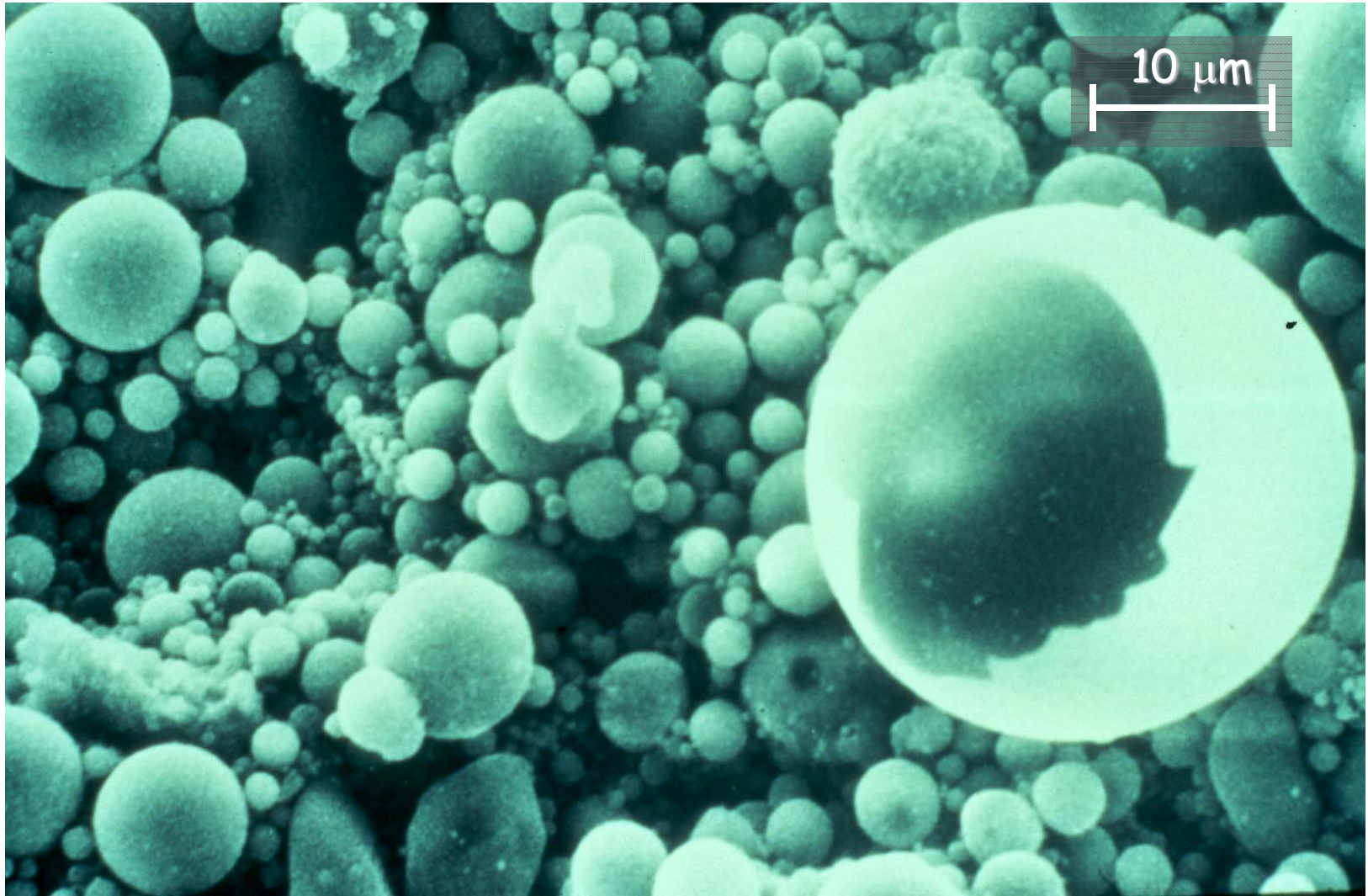
Photographie d'une centrale électrique thermique

Centrale d'électricité thermique



Cendres volantes

Tout le matériel incombustible du carbone, forme les gouttelettes de liquide, puis condense.



Cendres Volantes

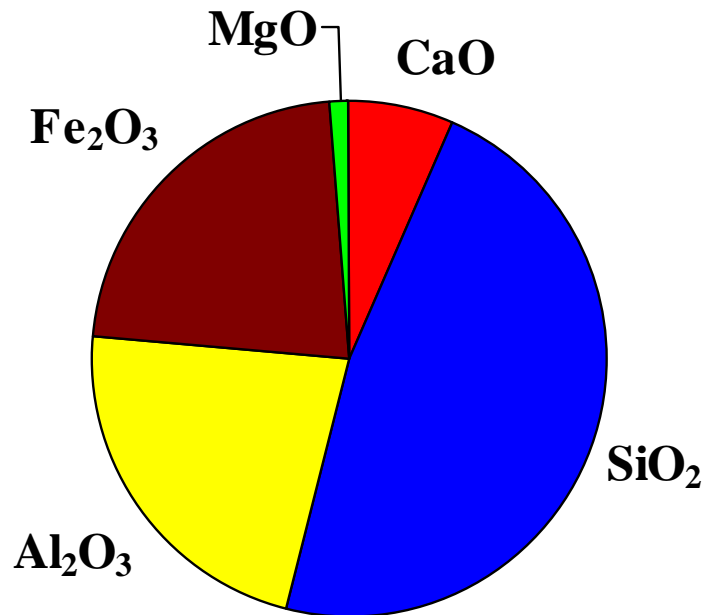
FLY ASH



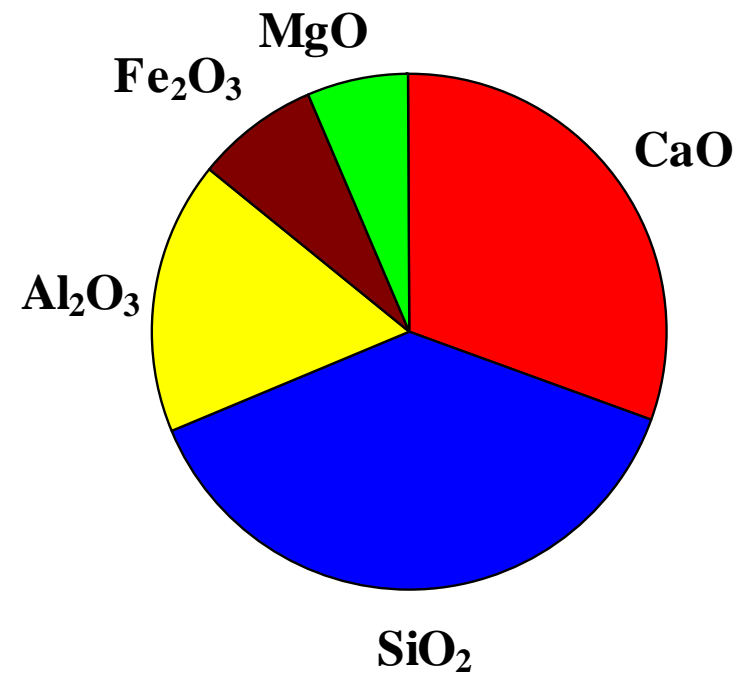
Particules avec la même finesse de ciment

Composition: 60 – 95% amorphe

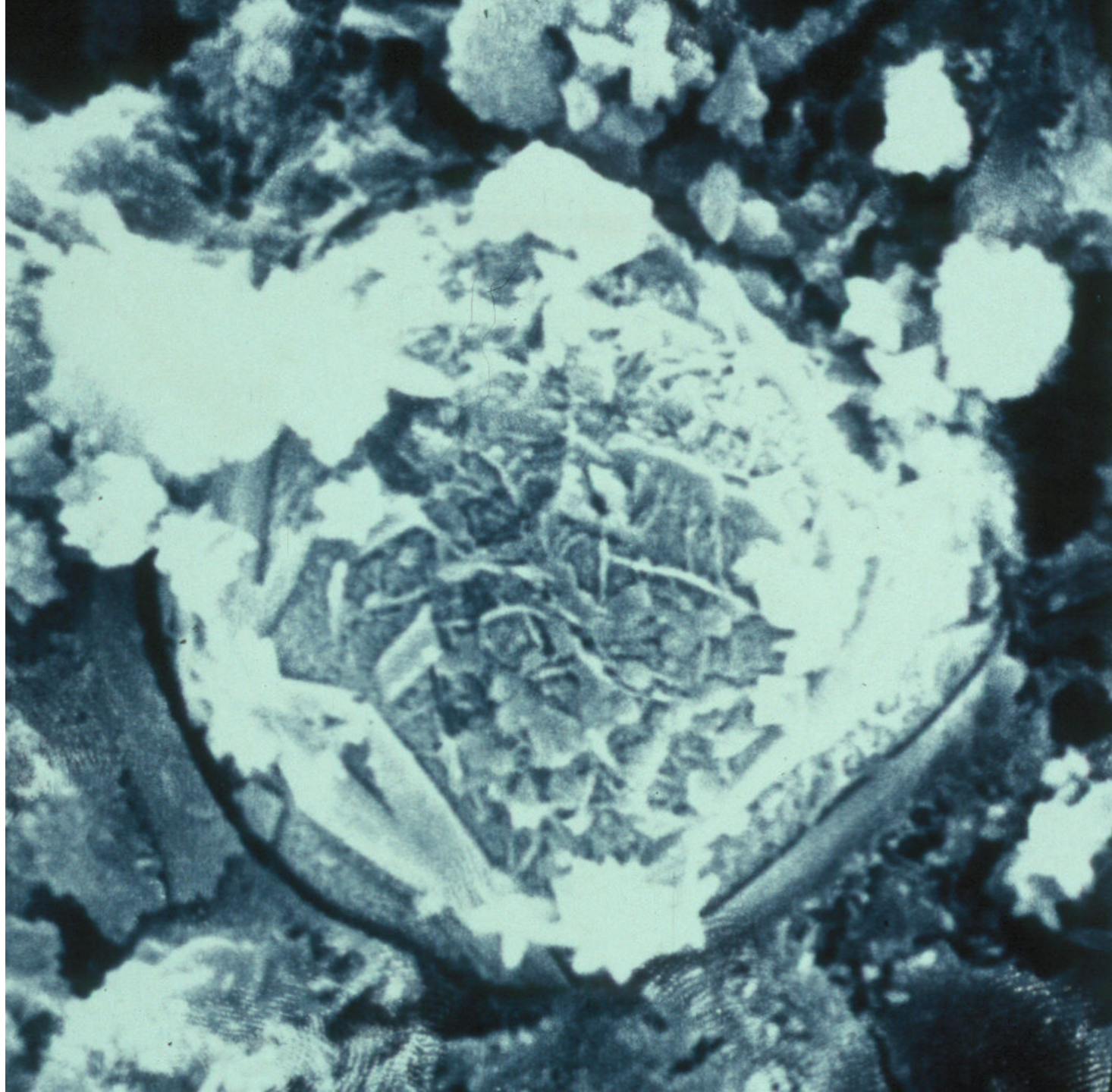
Type F
basse teneur
en chaux

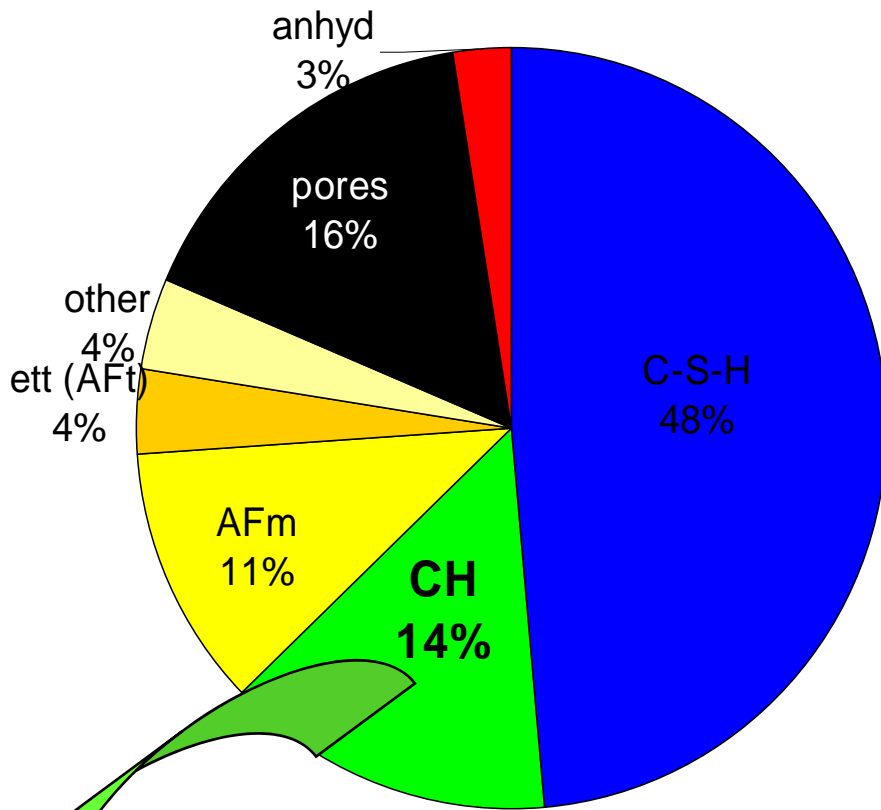


Type C
haute teneur
en chaux

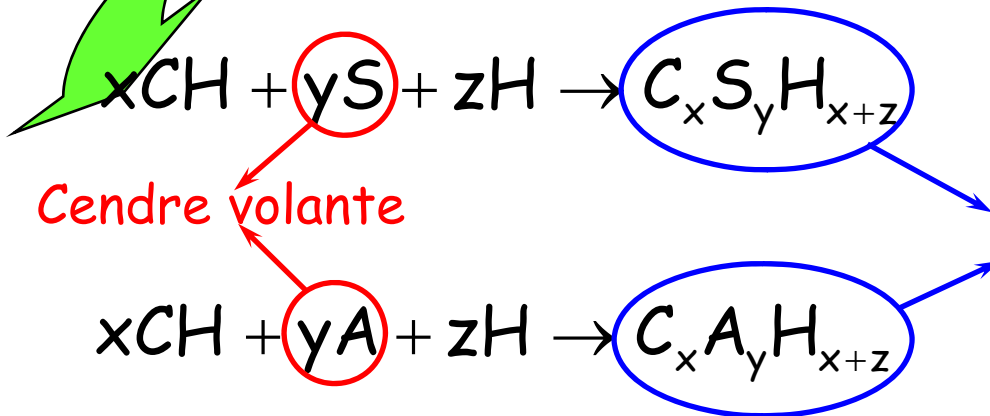


Seulement
la partie
amorphe
est
réactive

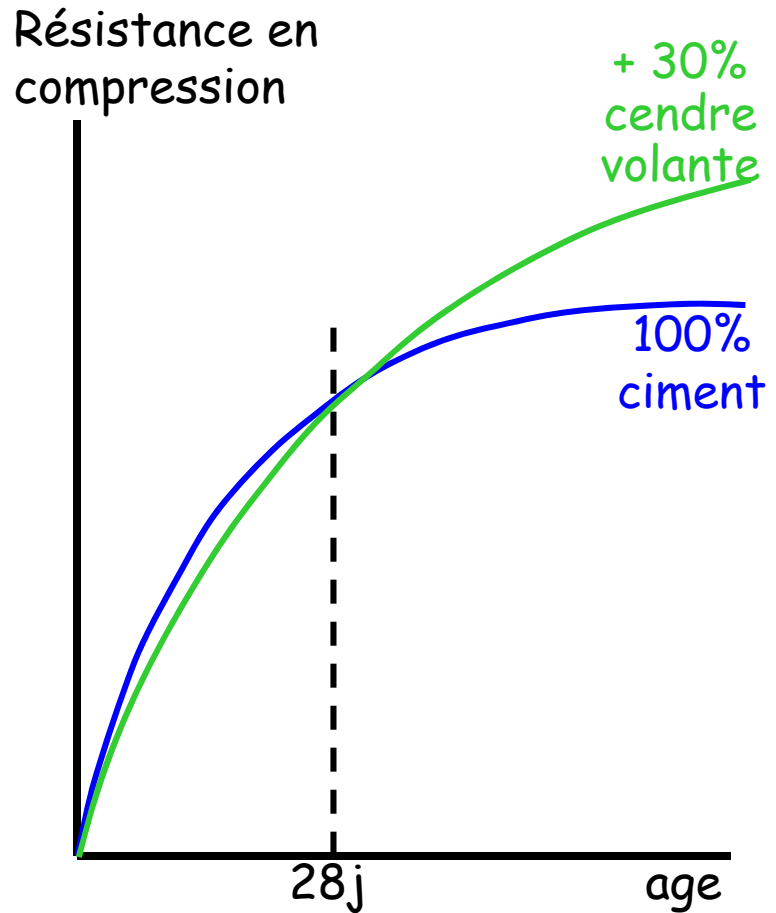
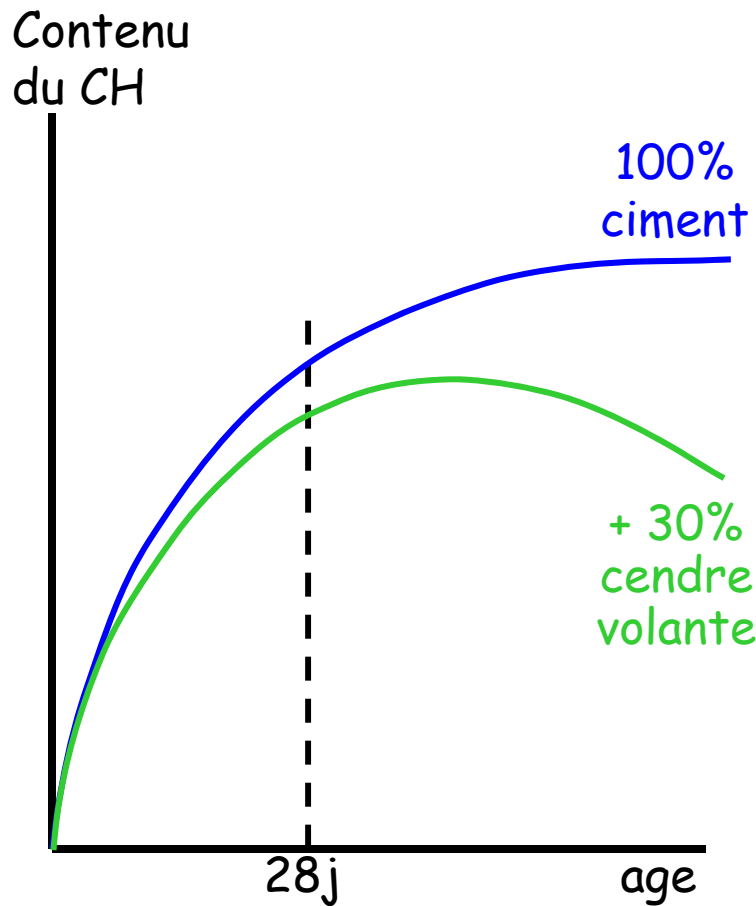




Composition typique d'une pâte de ciment



Plus d'hydrates
moins de porosité



La réaction est assez lente. Elle commence après 3-7 jour

Elle a besoin d'humidité

La résistance d'un béton avec ~30% de cendres volantes

Dépasse celle d'un ciment avec 100% après ~28 jours

S'IL Y A UNE BONNE « CURE »

Utilisation

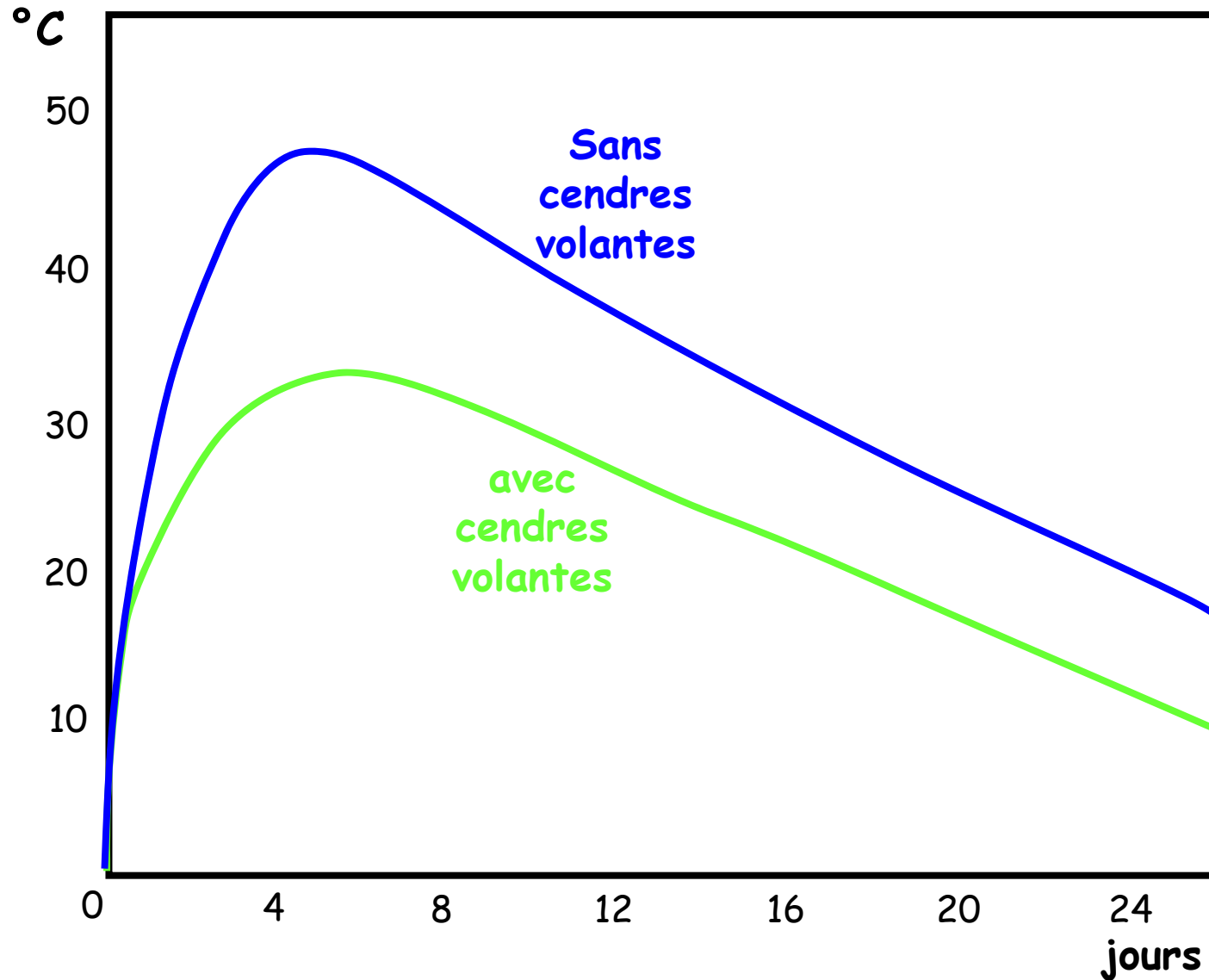
Substitution dans un béton pour
10 - 30 % du ciment

(attention $e/c \rightarrow e/l$ (liant) ou w/b (binder))

Avantages

- Amélioration de l'ouvrabilité ($e/l \downarrow$ pour même slump)
- Réduction de la chaleur d'hydratation
 - Réduire le risque de fissuration thermique dans les grandes masses
- Réduction de la porosité
 - Augmentation de la résistance à terme
 - Diminution de perméabilité
 - Augmentation de la durabilité
- Réduction du risque de réaction alkali silicate
- Moins cher que le ciment

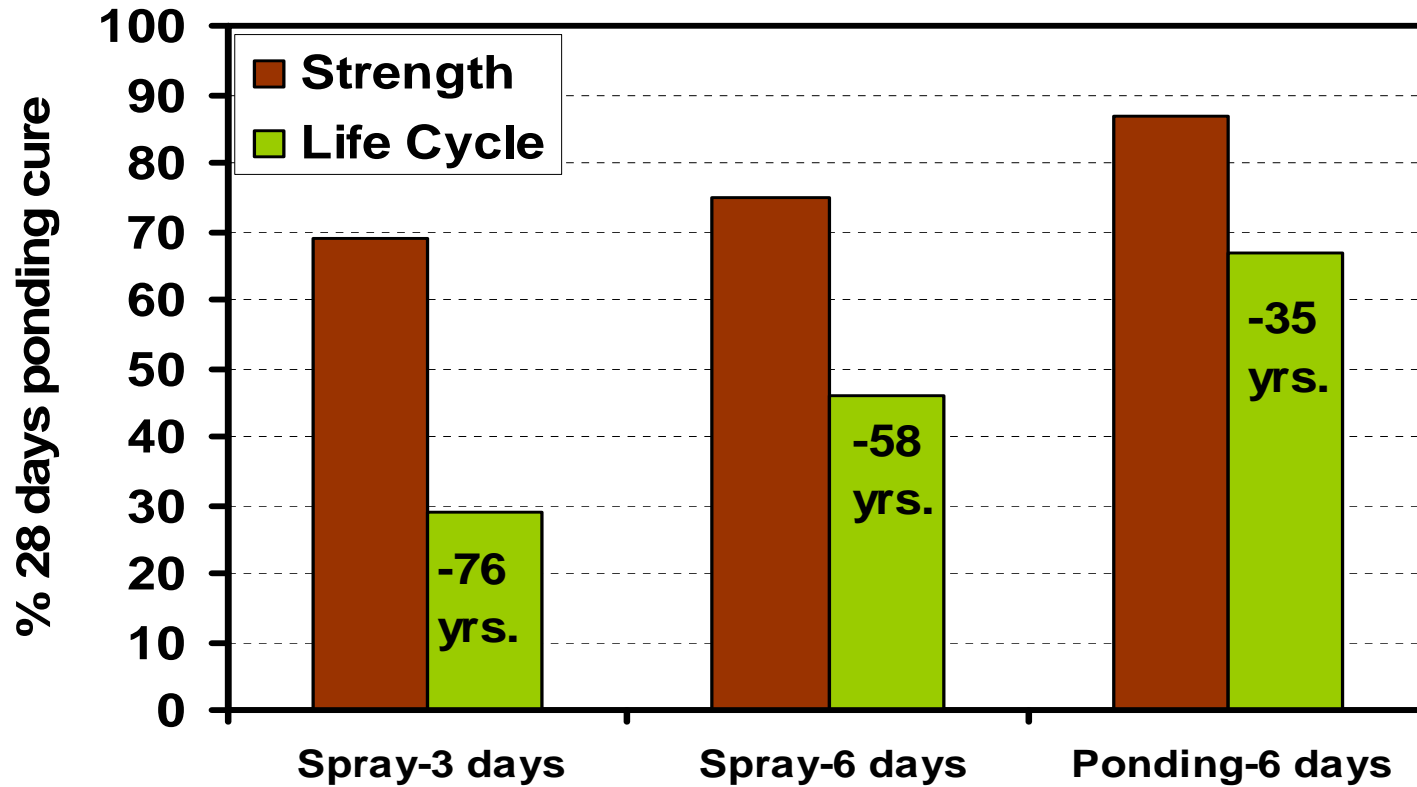
Diminution d'autoéchauffement



Désavantages

- Efficacité des adjuvants, ex : entraîneurs d'air
 - Fonction de charbon résiduel
- Importance d'une bonne « cure » augmente

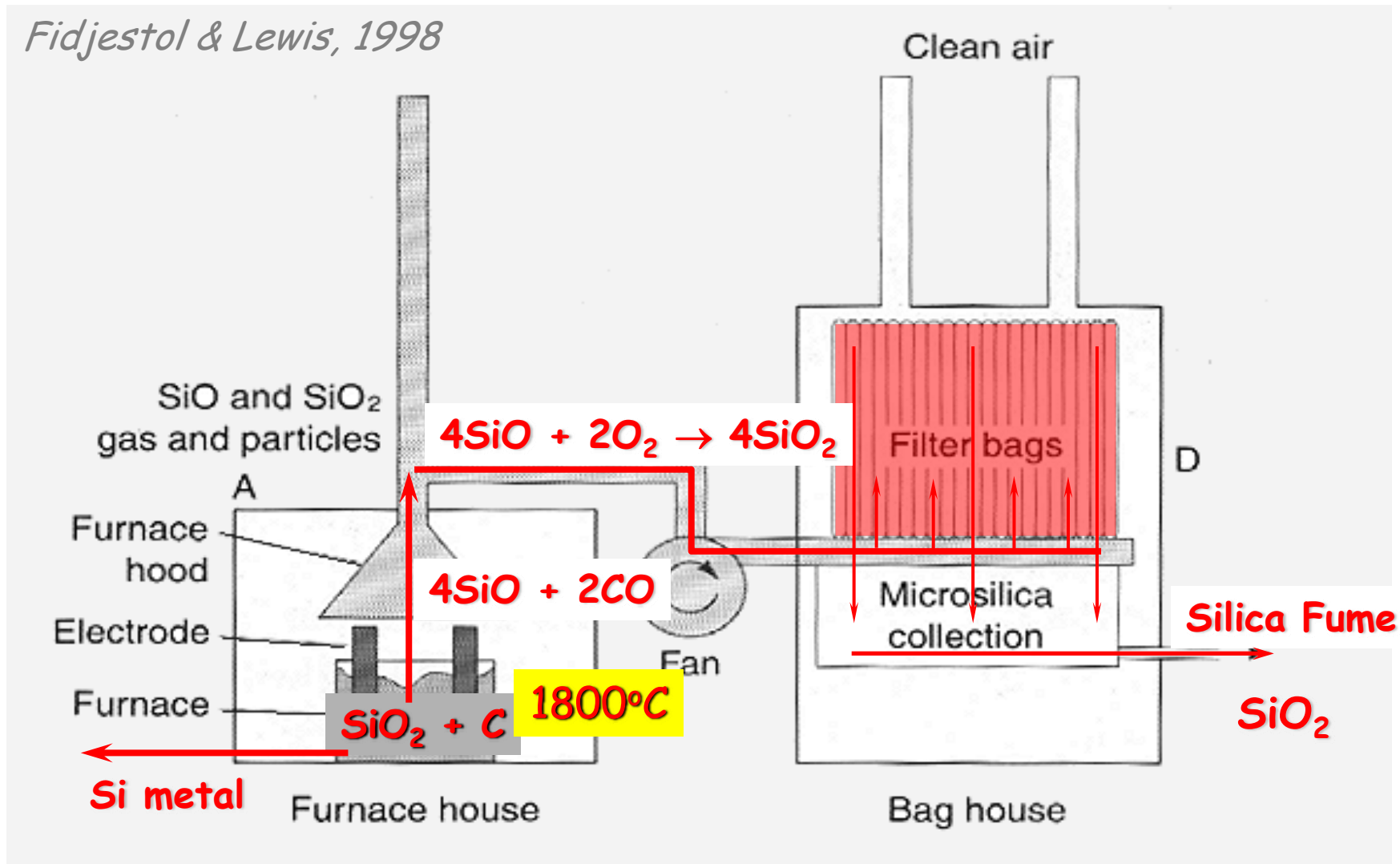
EFFECT OF CURING ON STRENGTH AND CARBONATION LIFE CYCLE, 50 MPa Concrete



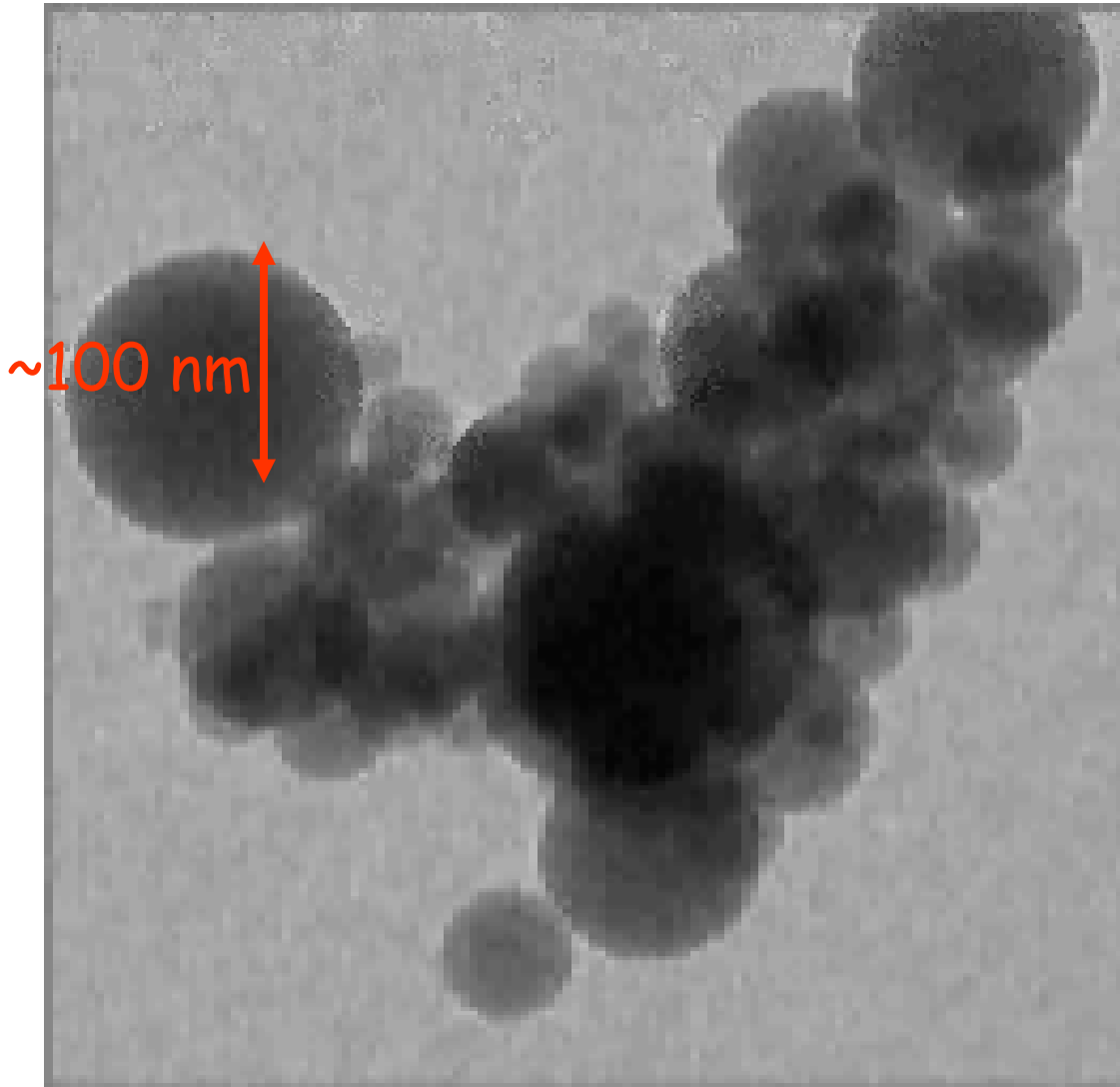
Fumée de silice:

sous produit de production des alliages de silicone

Fidjestol & Lewis, 1998



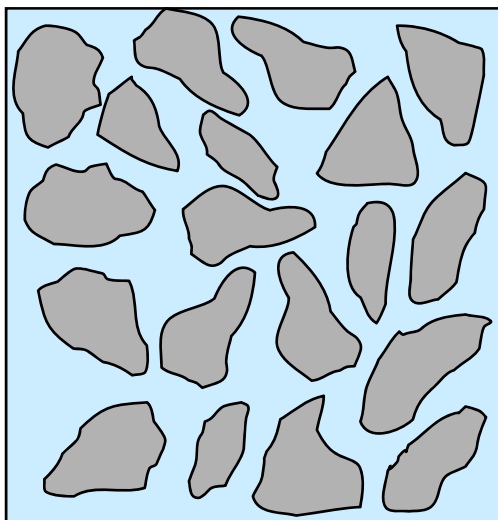
Verre de silice (90 – 99.9% SiO_2)



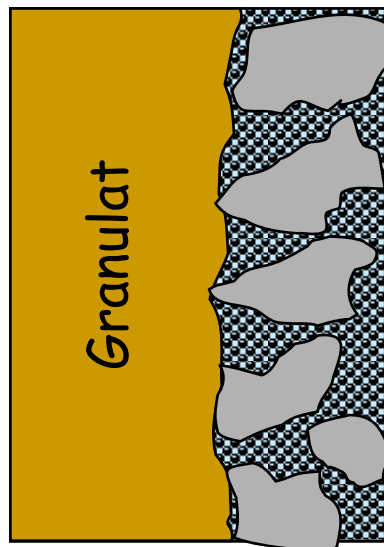
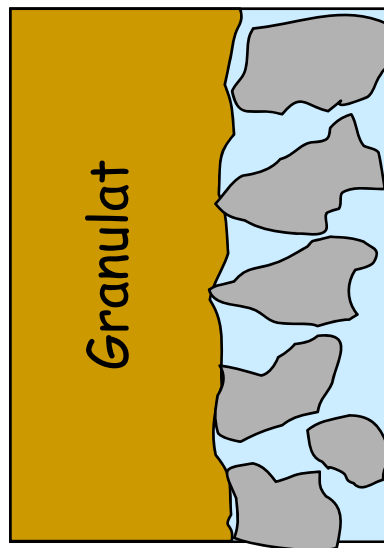
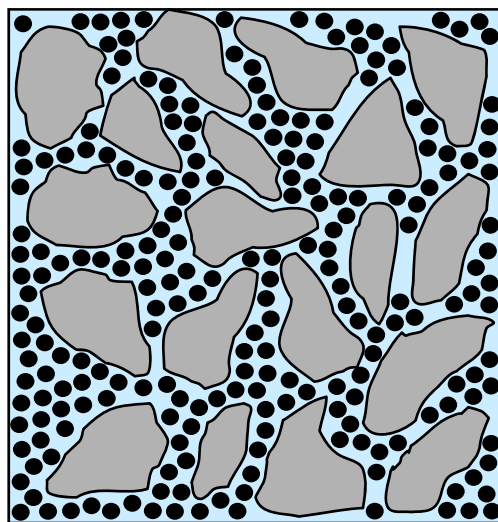
- Agglomérats de particules très fines
- Surface spécifique: $\sim 15000 \text{ m}^2/\text{kg}$
(cf. $350 \text{ m}^2/\text{kg}$ ciment)
- Réactif
(similaire au ciment)
- Réduction de CH par réaction pouzzolaneique

Microfiterisation

Ciment seul



Avec fumée silice



Amélioration
de l'interface
entre
granulats
et pâte
de ciment

Utilisation

Substitution dans un béton pour
5 - 15 % de ciment

Avantages

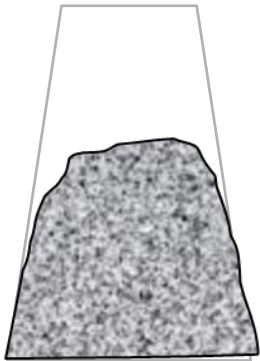
- Réduction du ressuage et de la ségrégation
- Forte Réduction de la porosité
 - Augmentation de la résistance
 - Diminution de la perméabilité
 - Augmentation de la durabilité
- Amélioration de la liaison entre pâte et granulat.
- Composant utilisé dans la plupart des bétons de haute performance

Désavantages

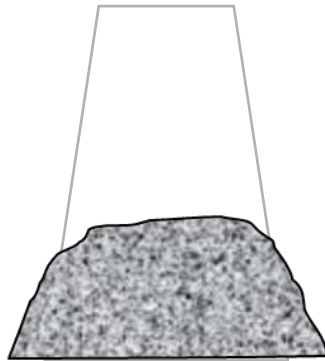
- Ouvrabilité, il faut utiliser des superplastifiants
- Il faut bien malaxer pour casser les agglomérats
- Augmentation du retrait possible
- Cher (~2-5 x cout ciment)

Ouvrabilité

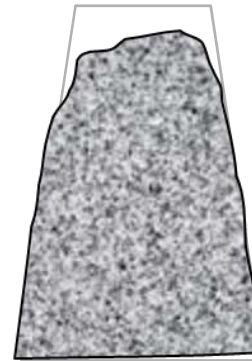
Témoin



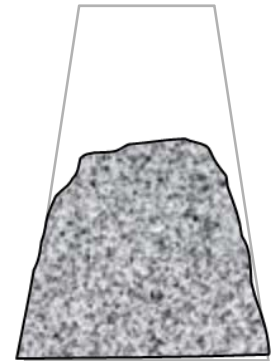
Cendres
Volantes



Fumée
Silice



Fumée
Silice +
Cendres
Volantes



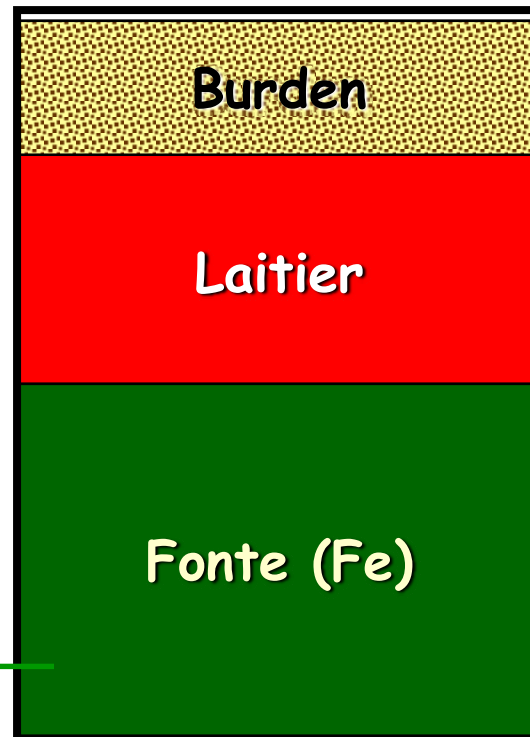
Laitier du haut fourneau



Minerai de Fer
 Fe_2O_3
 SiO_2
 Al_2O_3

Flux
 CaCO_3
 MgCO_3

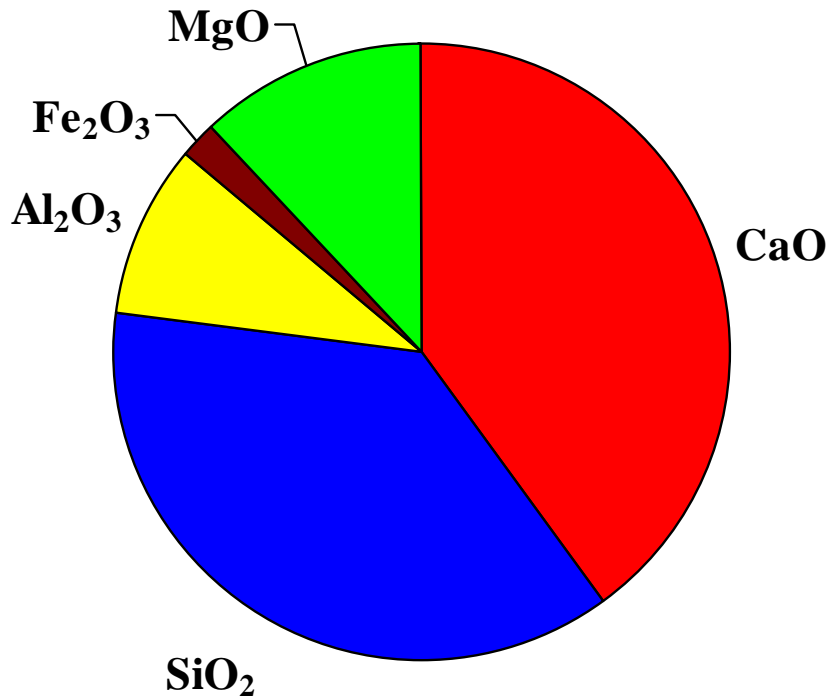
Fuel
Coke, C



Fabrication d'acier

Laitier refroidi à l'air (granulat)
Expanded slag (lightweight agg)
Granulated or pelletized slag (cement)

Composition 80-100% amorphe



Dû à sa forte teneur en CaO le laitier n'est pas un pouzzolane

Il est lentement hydraulique (réagit avec l'eau pour former des hydrates similaires au ciment)

La vitesse de réaction est augmentée (**activée**) par chaux ou alcalis
Donc ciment

Utilisation

Substitution dans un béton pour
30 - 70 % du ciment

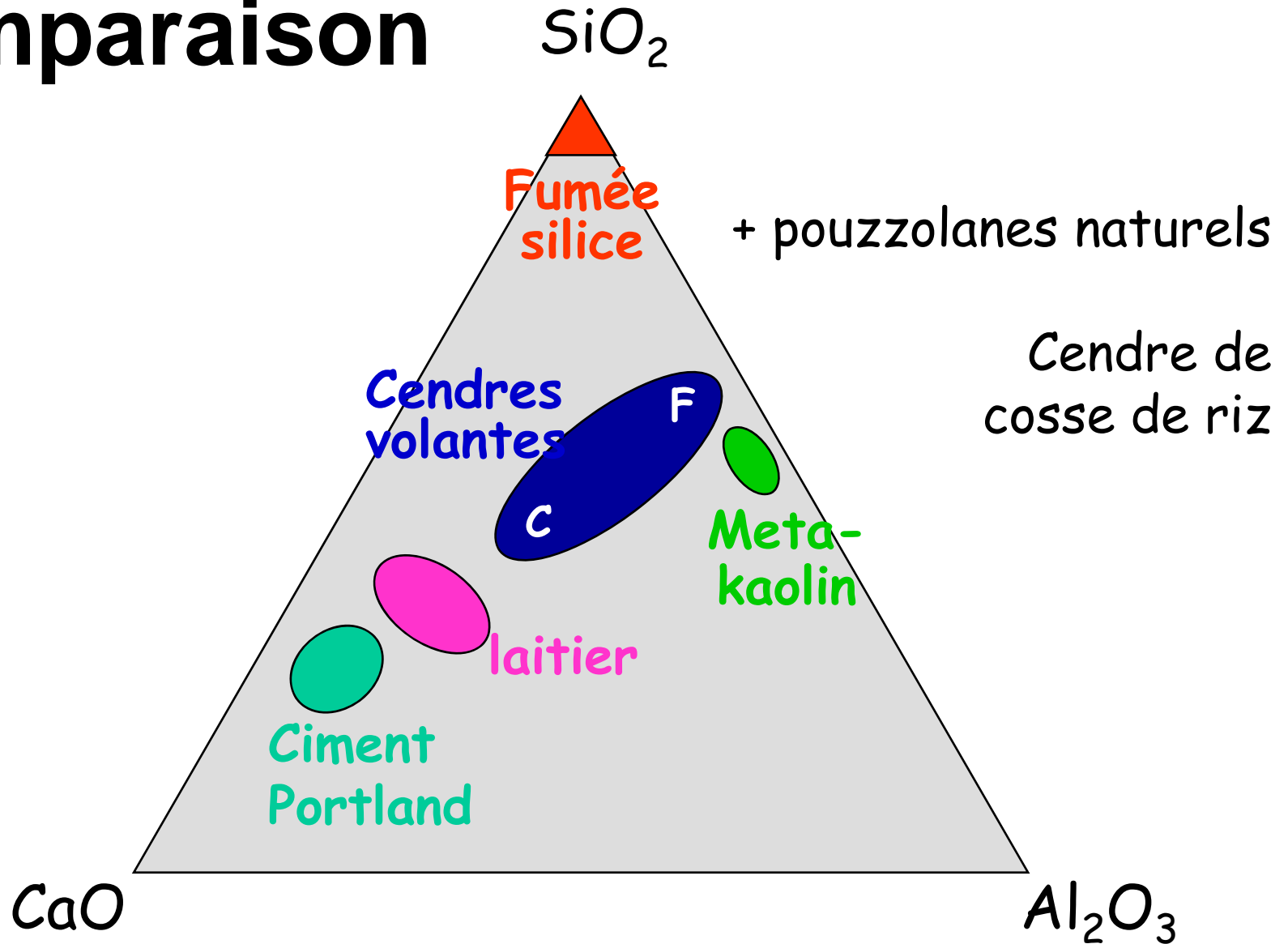
Avantages

- Réduction de la chaleur d'hydratation modérée
 - Réduire le risque de fissuration thermique dans les grandes masses
- Réduction de la porosité
 - Augmentation de la résistance à terme
 - Diminution de la perméabilité
 - Augmentation de la durabilité
- Réaction des aluminates avec les ions chlore
 - Réduction de la corrosion des armatures

Désavantages

- Sensibilité à une bonne « cure »
- Augmentation du retrait possible

Comparaison



Note: disponibilité local

Classification des principaux types de ciments selon ENV 197-1: **ciment pré-mélangé en usine**

Type	Désignation Ciment	Notation	Composition en % massique		
			Principaux		Secondaire
			Clinker	Ajout	
I	Portland	I	95-100	0	0-5
II	Portland au laitier	II / A-S II / B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	0-5 0-5
	Portland à la F.S.	II / A-D	90-94	6-10	0-5
	Portland au calcaire	II / A-L II / B-L	80-94 65-79	6-20 21-35	0-5 0-5
	... etc				
III	Ciment de haut fourneau	III / A	35-64	36-65	0-5
		III / B	20-34	66-80	0-5
		III / C	5-19	81-95	0-5
IV	Ciment pouzzolanique	IV / A	65-89	11-35	0-5
		IV / B	45-64	36-55	0-5
V	Ciment composé (*)	V / A	40-64	36-60	0-5
		V / B	20-39	61-80	0-5

EXEMPLES d' UTILISATION





Viaduct au *Cameroon* utilisation de ciment avec fumée de silice importé du *Canada* - pour amélioration d'étanchéité

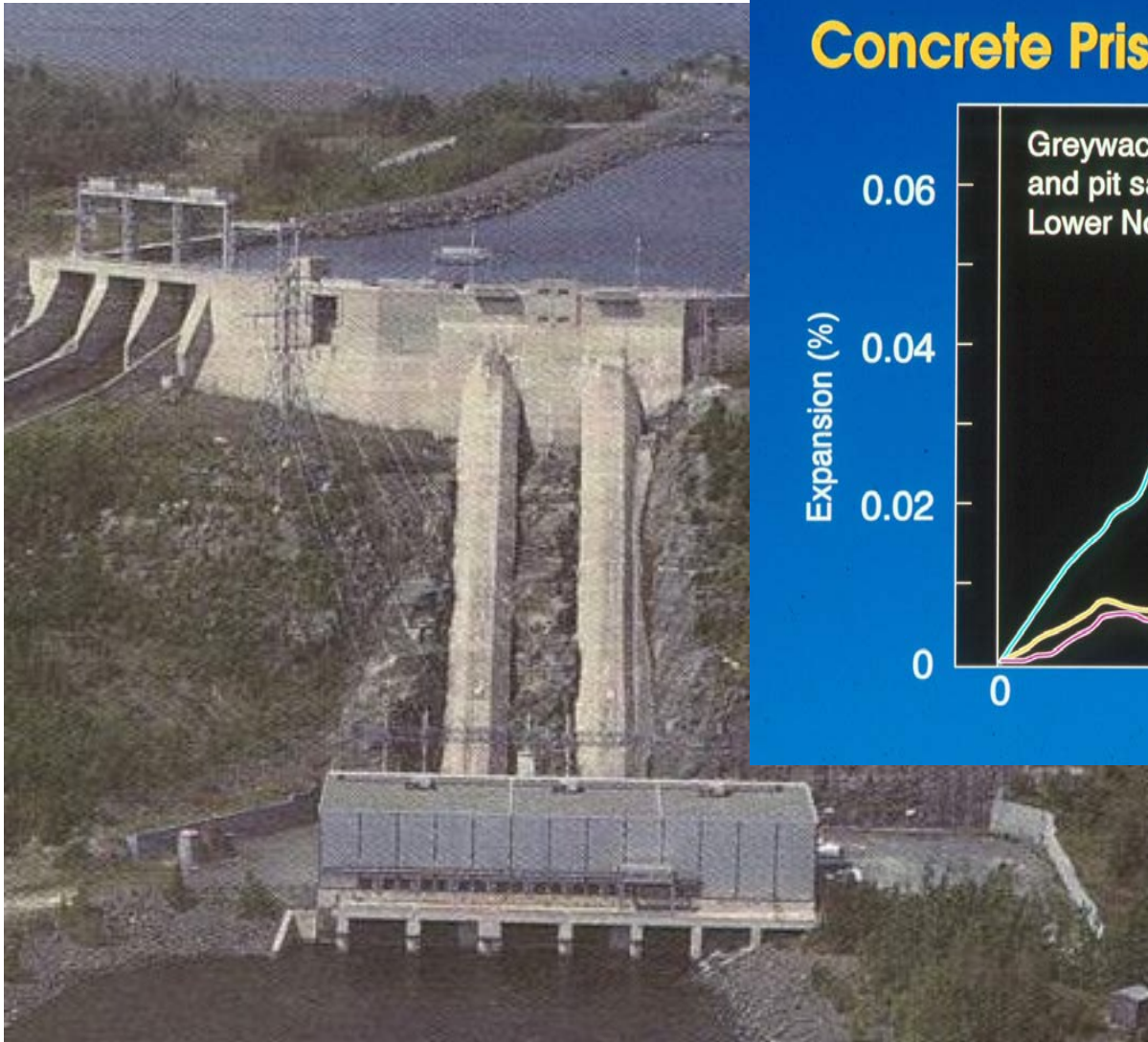
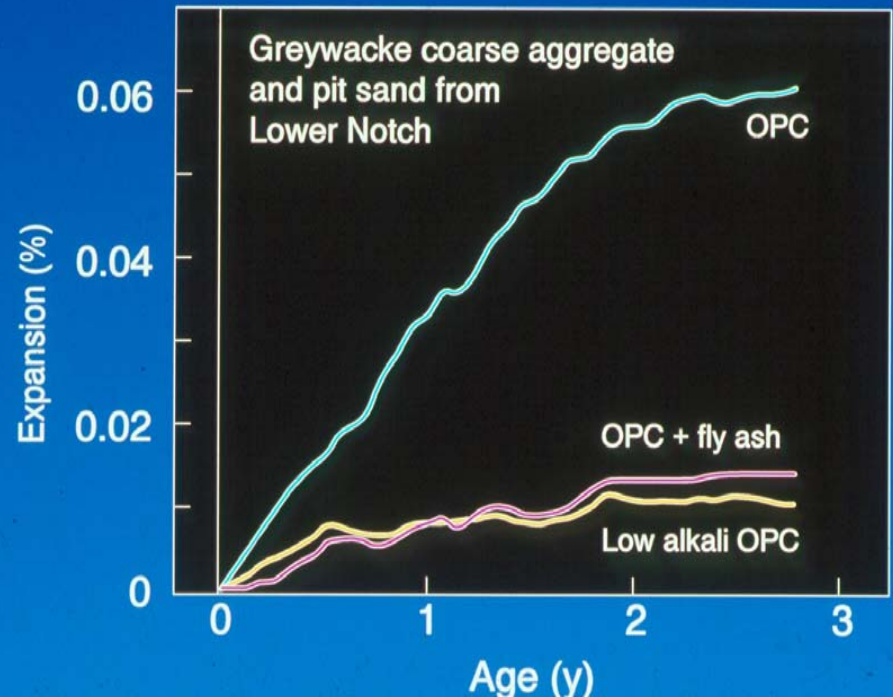


Confederation bridge, Canada: ciment+FS pré-mélangé +cendres volantes ajoutées à stage de fabrication du béton - pour augmenter la durabilité, améliorer pompabilité, réduire chaleur, meilleur résistance.
+ ice load



Causeway en Floride - Cendres volantes utilisées pour augmenter résistance à la pénétration des ions chlore.

Concrete Prism Expansion Results



Barrage au Canada - Cendres Volantes (Type F) pour minimiser risque d'expansion par réaction alcali granulats (ASR)



Voutre pour tunnel -ciment avec FS pré-melangé plus laitier, pour réduire pénétration des ions chlore.

Adjuvants:
ajouts liquide ~ quelque %



Conséquences

- **Performances améliorées**
- **Compensation des déficiences**
- **NOTE: en général très coûteux**

Adjuvants

- Entraîneurs d'air
- Plastifiants (plasticisers) - réducteurs d'eau
- Superplastifiants -(superplastifiants high range water reducers)
- Retardateurs
- Accélérateurs
- Inhibition de corrosion (des armatures)
- Réduction du retrait

Superplastifiants



Fluidification

OU

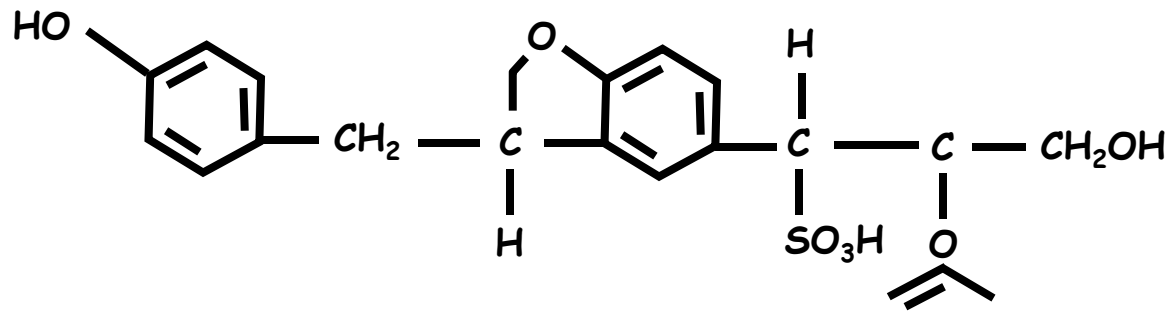
Réduction de e/c
(augmentation de
résistance)

OU

réduction du contenu
du ciment



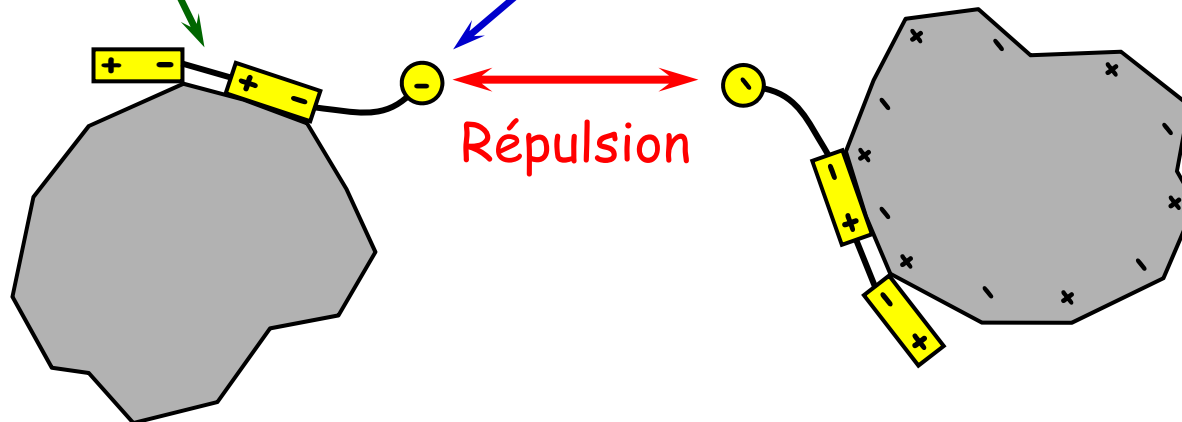
Ex: lignosulfonates



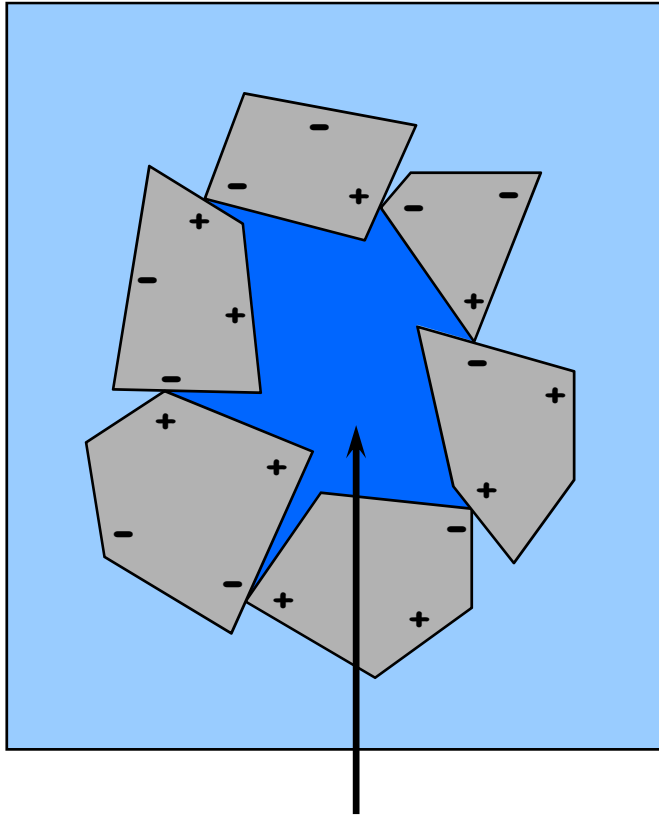
Répétition du module d'une molécule de lignosulfonate

Chaîne polaire absorbée, à l'interface de l'eau solidifiée

Le groupe polaire anionique rend le ciment hydrophile et conduit à la répulsion des forces entre les grains

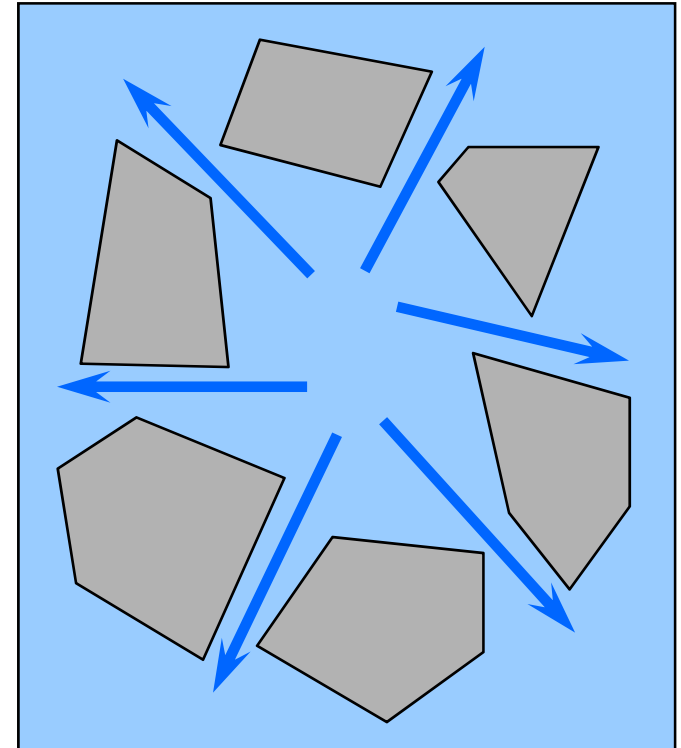


Ciment flocculé



L'eau immobilisé en masse
n'est pas disponible
pour lubrifier la pâte

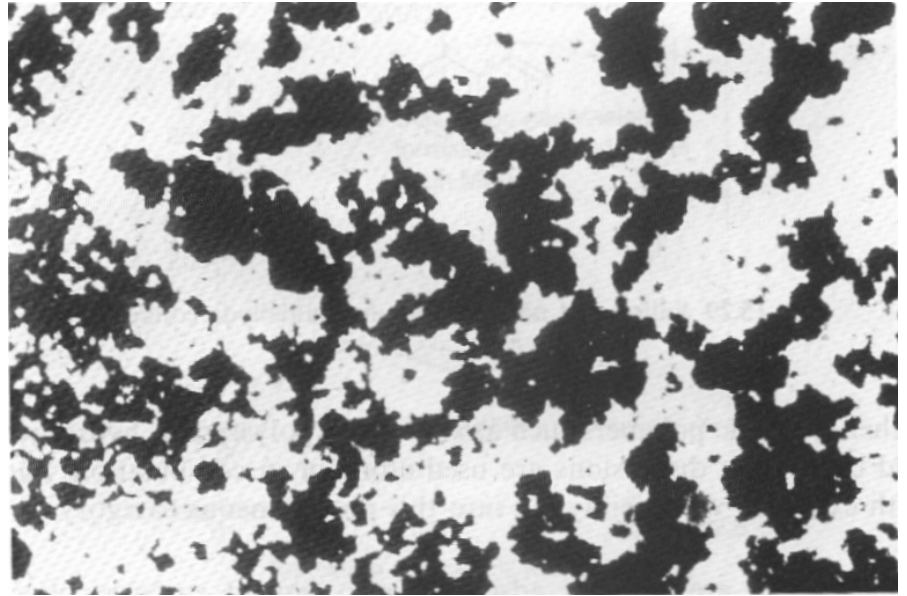
Dispersant
(plasticizer)



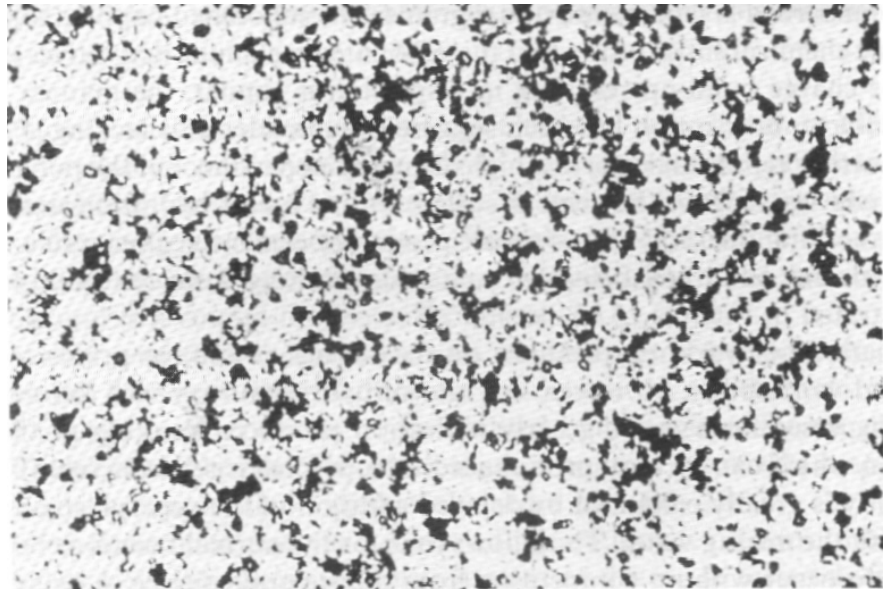
L'eau libéré par
la lubrification amène
à réduire la viscosité

Micrographie des grains de
ciment en suspension dans
l'eau

Pas d'adjuvant →

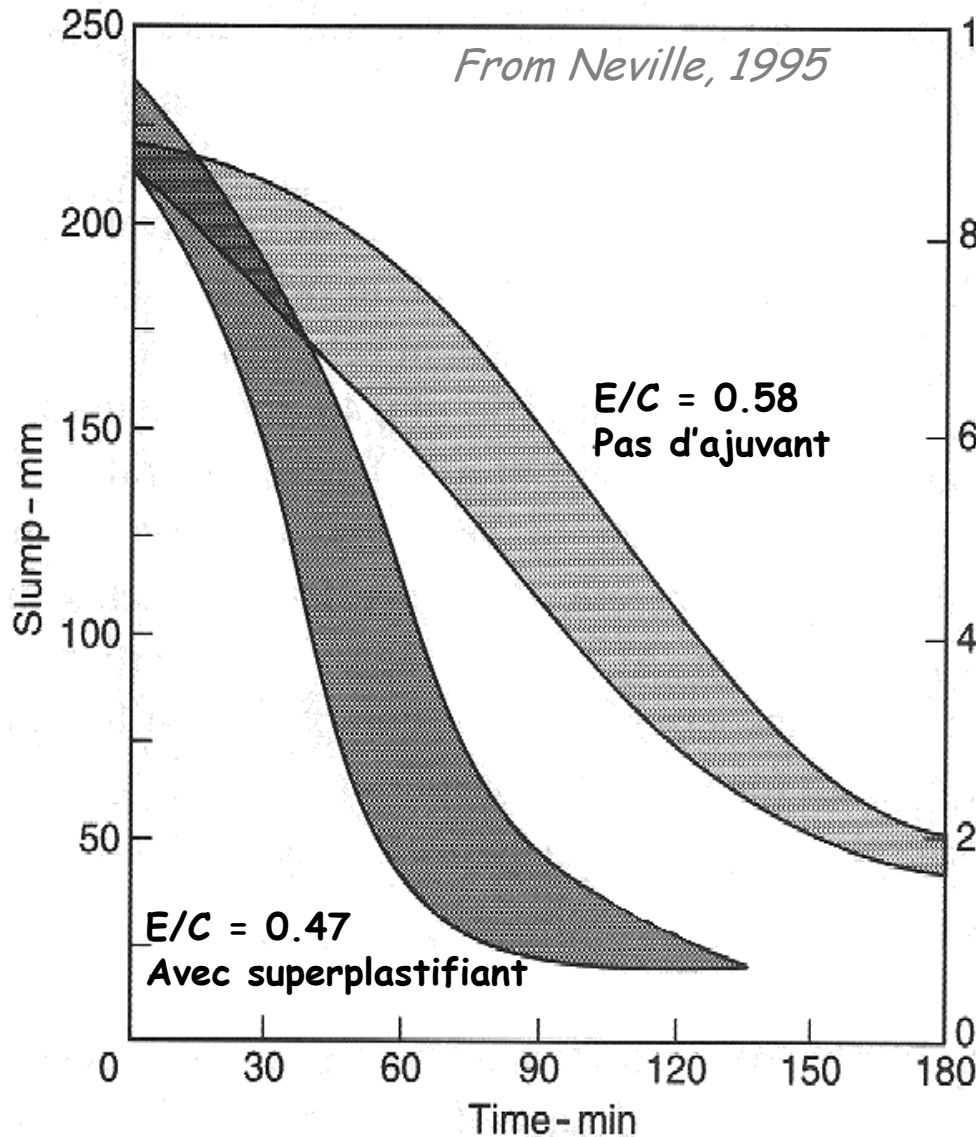


Avec HRWA →



From Lea, 1998

Perte de slump



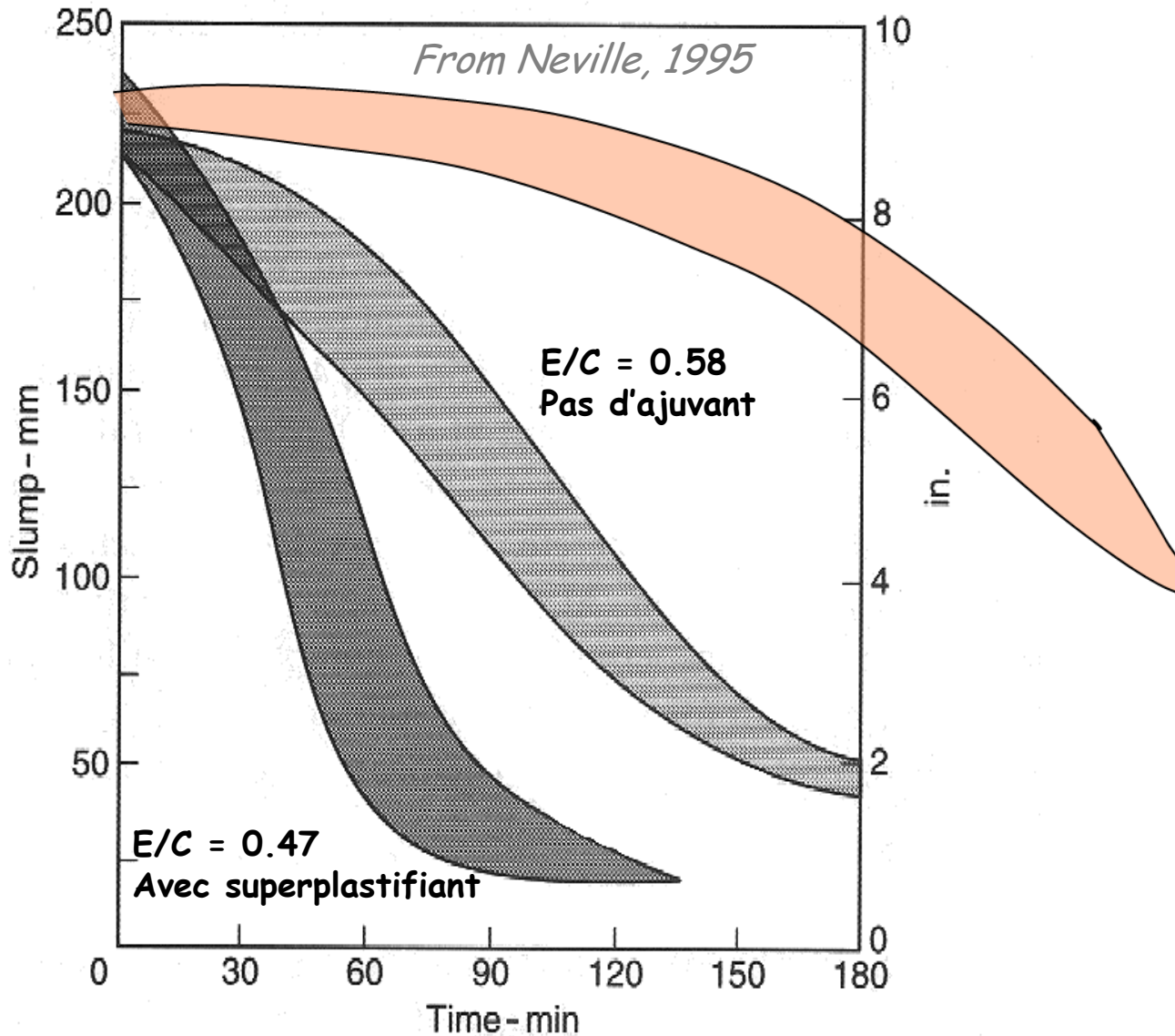
L'effet des SPs est limité dans le temps. Ils sont absorbés dans les produits d'hydratation des aluminates.

La vitesse de perte d'efficacité dépend de:

- C_3A , SO_3 , alcali
- la température
- la finesse

On peut minimiser cette perte par addition d'ajuvant sur chantier, au lieu de le faire pendant le malaxage

Utilisation de SP + retardateur



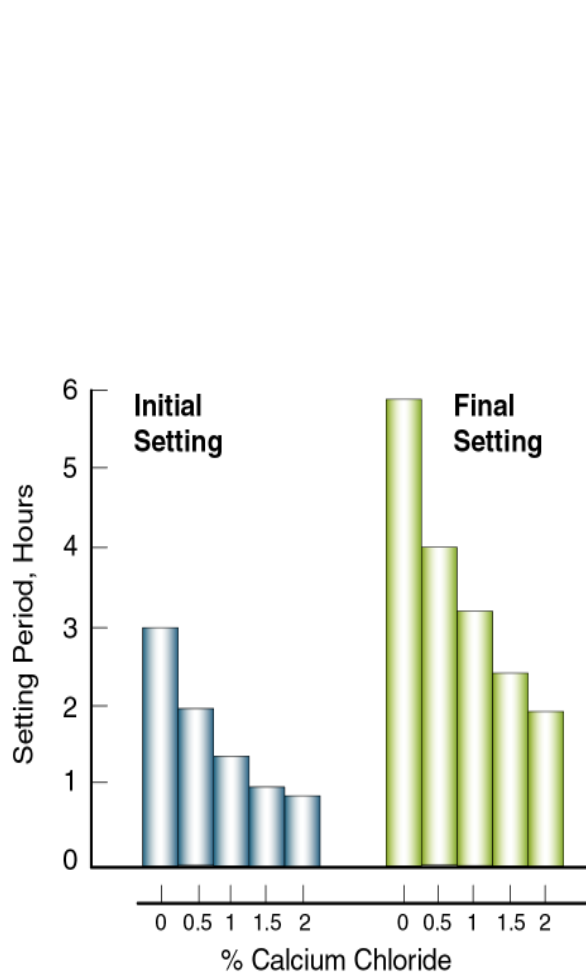
Utilisation des accélérateurs

Modification des propriétés du béton,
particulièrement en temps froid

- Pour avancer les opérations de finition et si nécessaire l'application d'isolation.
- Réduire le temps pendant lequel il faut faire une « cure » et protéger.
- Augmenter la vitesse de durcissement pour le décoffrage et la mise en service.

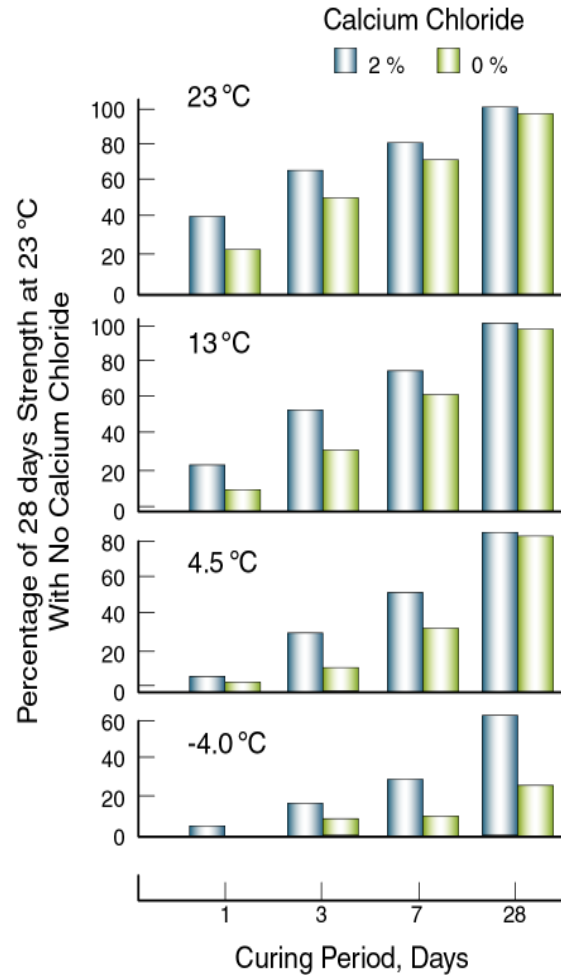
Accélérateurs pour le ciment

- Le plus connu est le chlorure de calcium, CaCl_2 mais celui-ci promouvoit la corrosion des armatures.
- Accélérateurs sans chlore:
formate de calcium, nitrate de calcium, etc.



(a)

Effet de CaCl_2 sur le temps de prise du ciment



Effet de CaCl_2 sur le développement de la résistance pour différentes températures

Retardateurs

- **Compense les effets de haute température.**
- **Quand il y a besoin de prolonger la période avant la prise, ex: grande structures; pompage**

ATTENTION:

**Un retardateur très efficace
pour le béton est le sucre**

**Les sels de métaux lourds (ex. Pb, Zn, Sn)
ont aussi une action retardatrice
prolongée et difficile à contrôler**

Retardateurs pratiques

- poly acides organique ou ses sels:
 - Acide gluconate
 - gluconate de soude
 - Acide tartrique
 - Tartrate de soude
- Formation de produits bloquants sur la surface des grains.

- En fort dosage; possibilité de désactiver le béton pendant 2-3 mois.
- Réactivation sur chantier.
- Lancement des produits, béton prêt à l'emploi.

Nouvelles tendances des bétons

Les développements récents dans la technologie des bétons dépendent de l'utilisation des adjuvants et SCMs

Bétons à haute
résistance /
Performance
BHP ou HPC
High performance
Concretes

Bétons autoplacants /
Autocompactant
BAP ou SCC
Self compacting
concretes

Bétons à haute résistance

Définition

Résistances:

> 42 MPa (6000psi) définition ACI

> 70 MPa (10,000psi)

jusqu'à 140+ MPa possible

$W/C < 0.35$

Pourquoi?

- **Gratte-ciel:**
 - Colonnes plus mince pour les étages bas - jusqu'à 30% d'espace en plus.
 - Construction plus rapide (haute résistance à jeune âge).
 - Réduction des coûts - moins d'acier, construction plus rapide.
- **Ponts, etc**
 - résistance (à court et long terme)
 - durabilité
 - étanchéité

Les Grattes-ciel

1966-67, Lake Point Tower, Chicago

52 MPa (7500 psi), 70 étages, un tous les 3 jours.

1976, Water Tower, Chicago

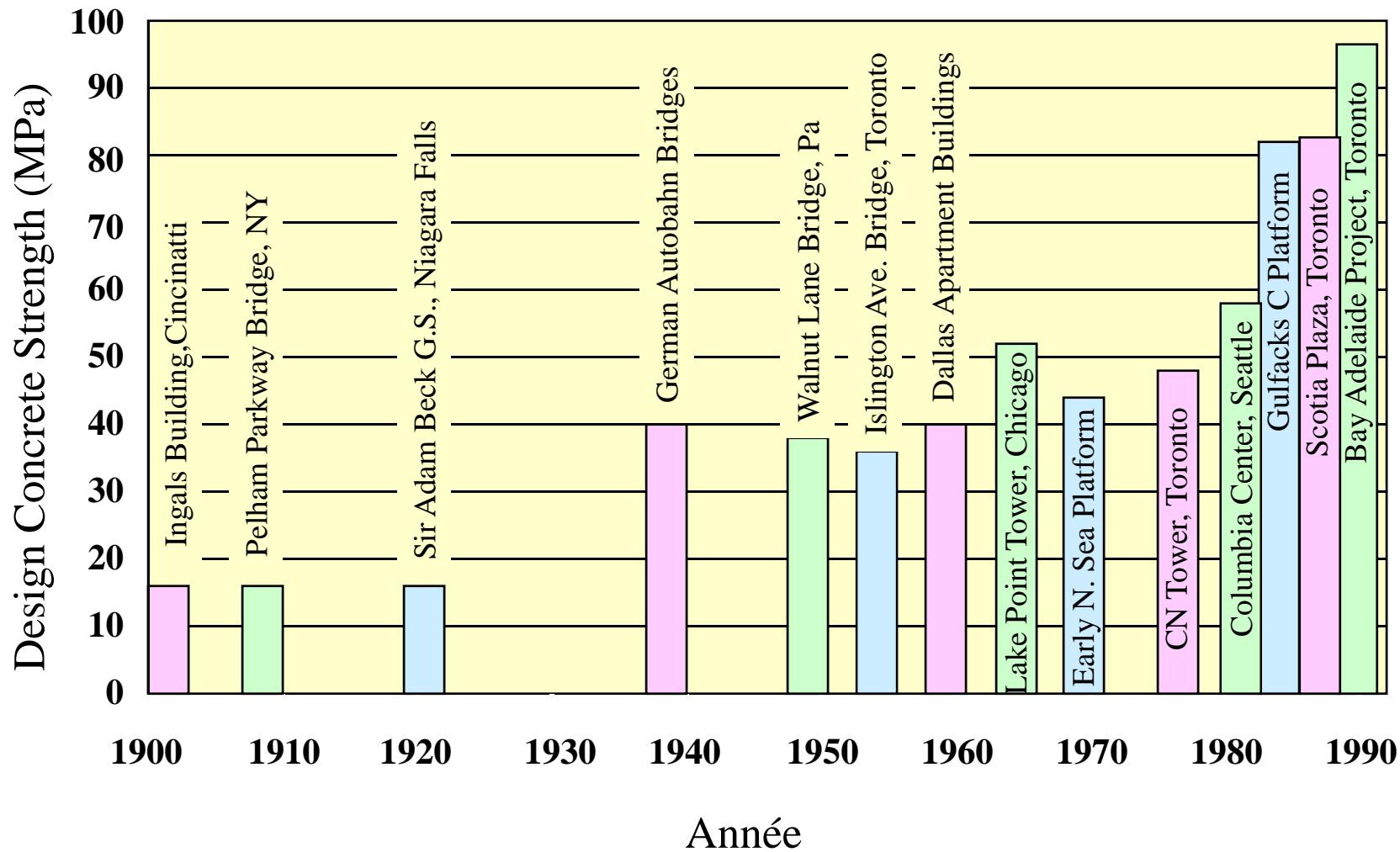
62 MPa (9000 psi), 76 étages,
à l'époque le plus haut bâtiment en béton renforcé.

Two Union Square, Seattle

131 MPa (19000 psi) la plus haute résistance pour des applications commerciales.



Evolution de BHR

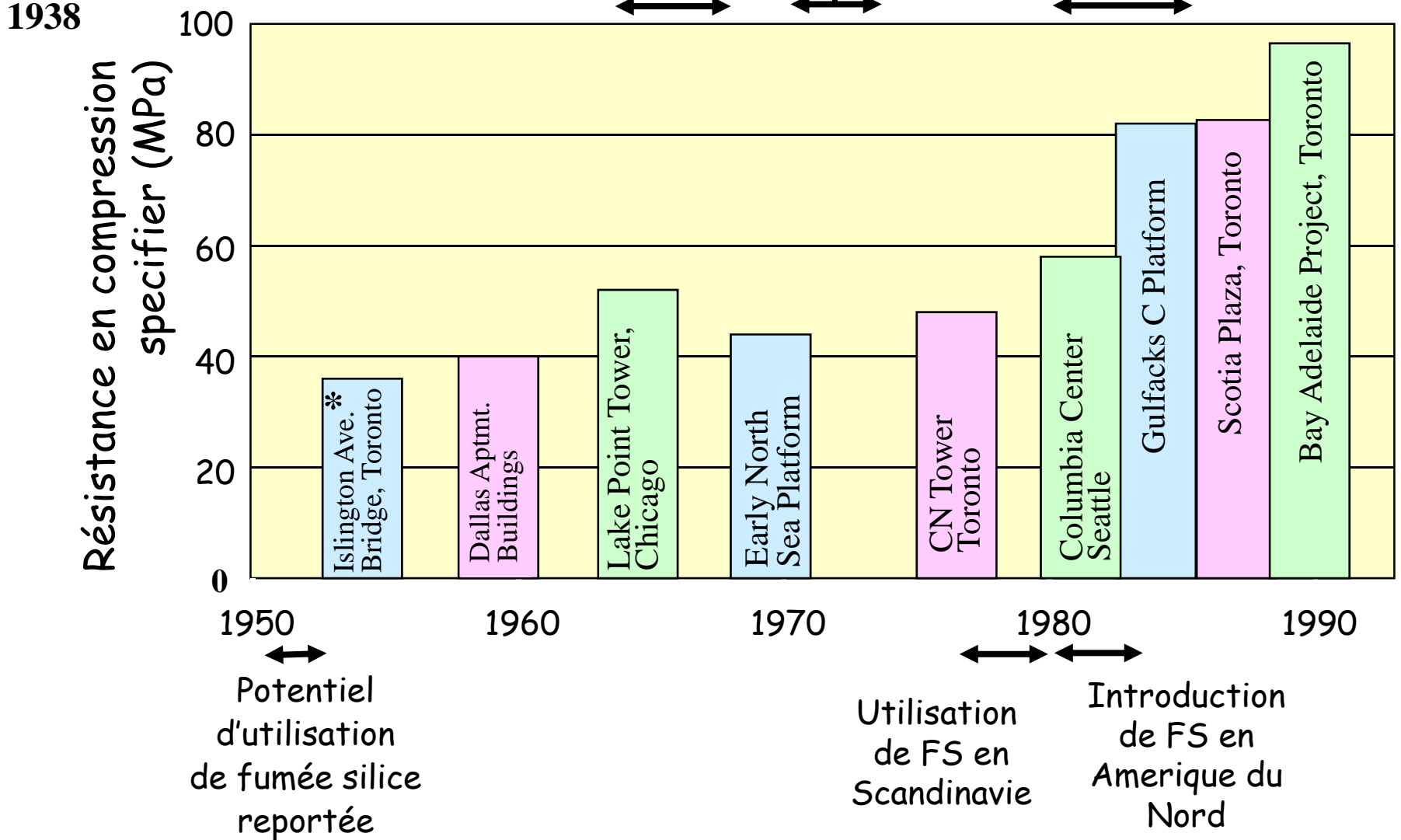


Premier brevet US par réduction d'eau et par utilisation des polycondensateurs de naphthalene sulfonate

1^{er} utilisation des superplastifiants
En Allemagne et au Japon

SPs arrive sur le marché d'Amérique du Nord

Début d'utilisation des SP pour la réduction de l'eau



Comment?

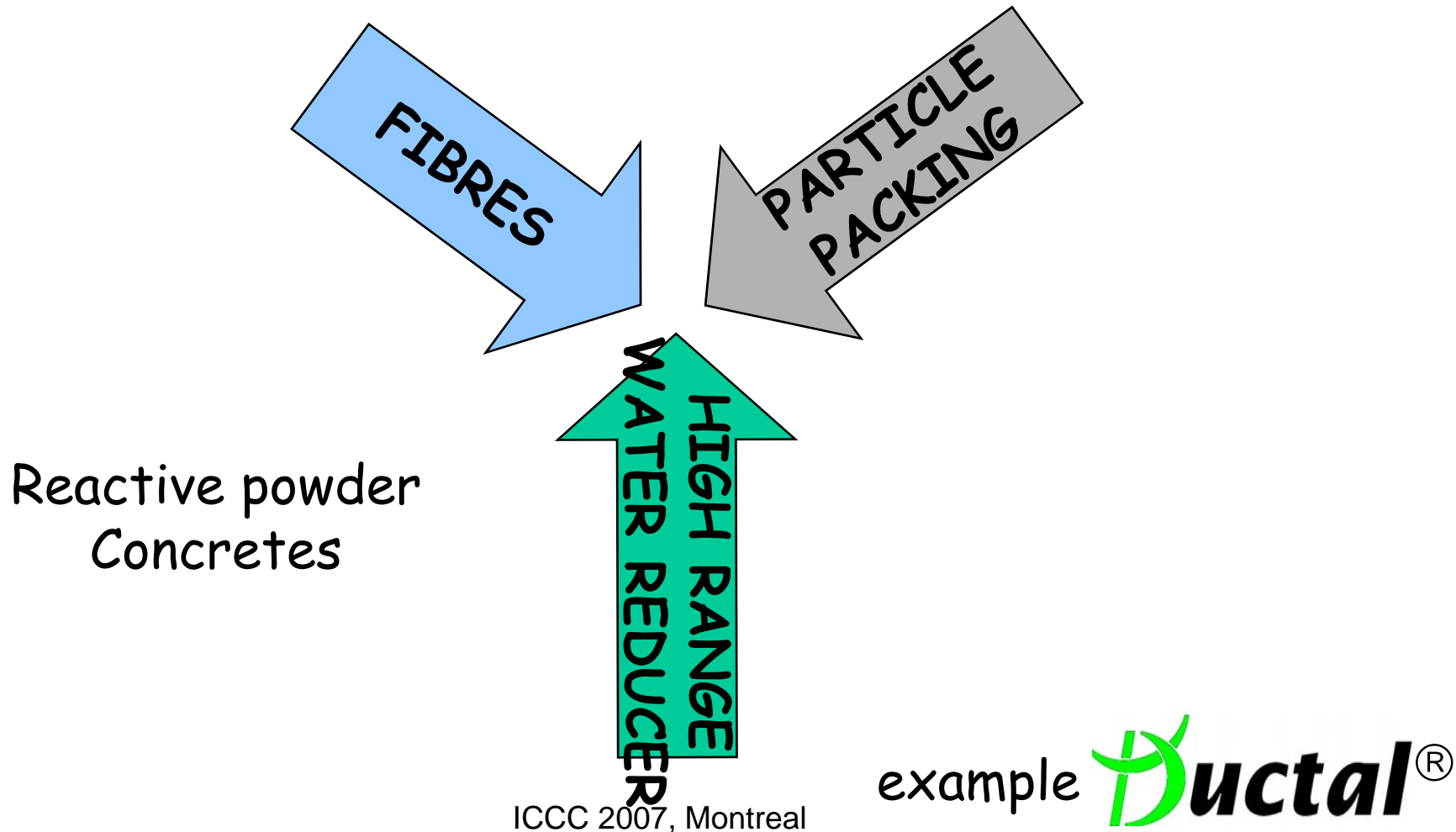
- E/C plus bas SPs
- Granulat haute résistance
- Amélioration de ITZ (zone de transition interfaciale) FS
- Compacité:
 - Fillers FS
 - Granulométrie des granulats

Limitations

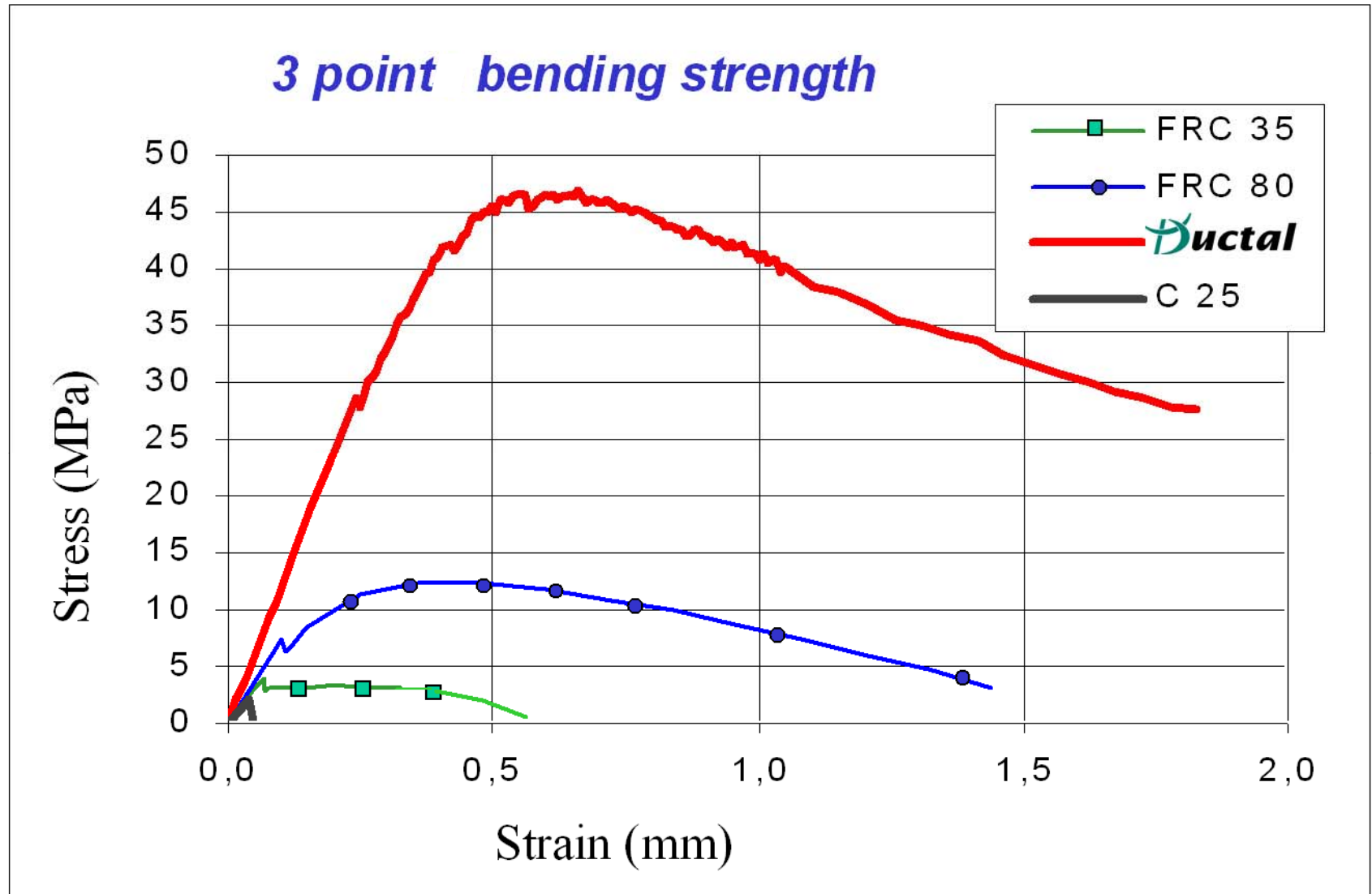
- Besoin pour les codes plus sophistiqués
- Fragile - rupture catastrophique
- Dans le feu, dégradation explosive
- Formulation souvent pointue
 - Sensible aux fluctuations de la température
 - Interactions du ciment - SP
- Sensible au retrait et à la fissuration endogène (autodessiccation)

UHPFRC

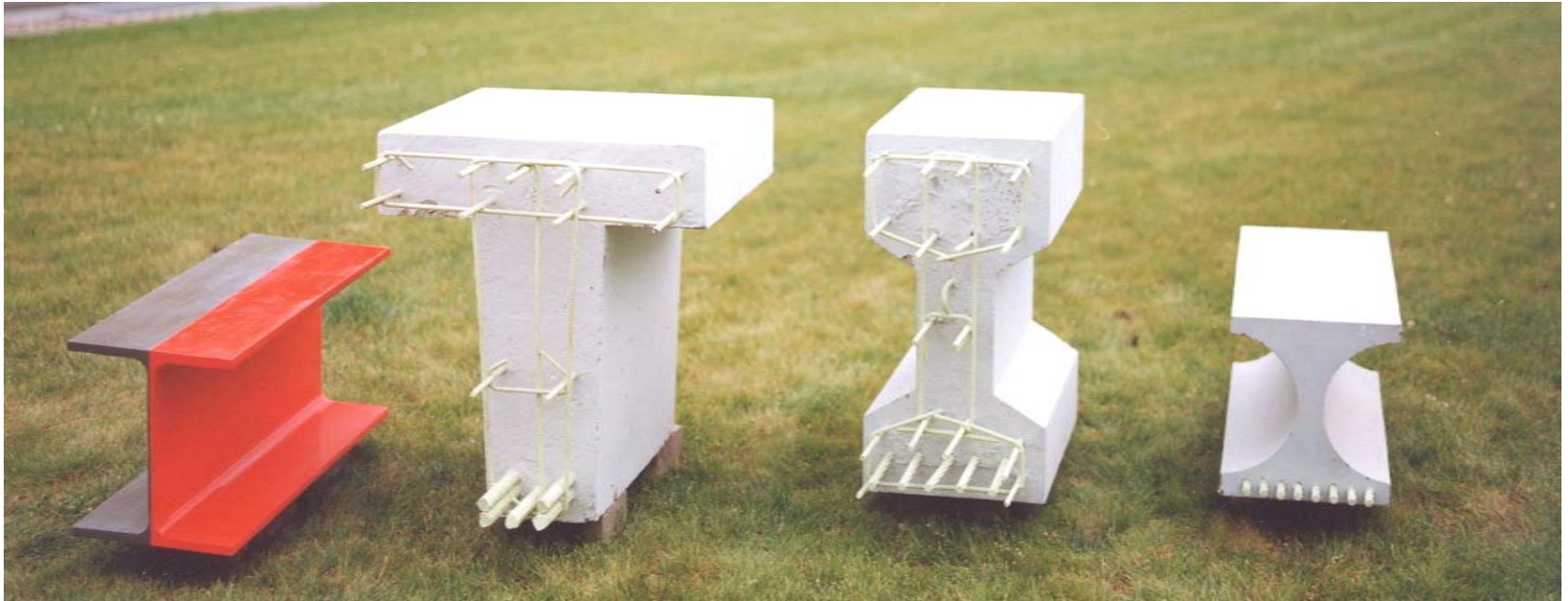
Ultra High Performance, Fibre Reinforced Concretes



Flexural strength



Beams of comparable load bearing capacity



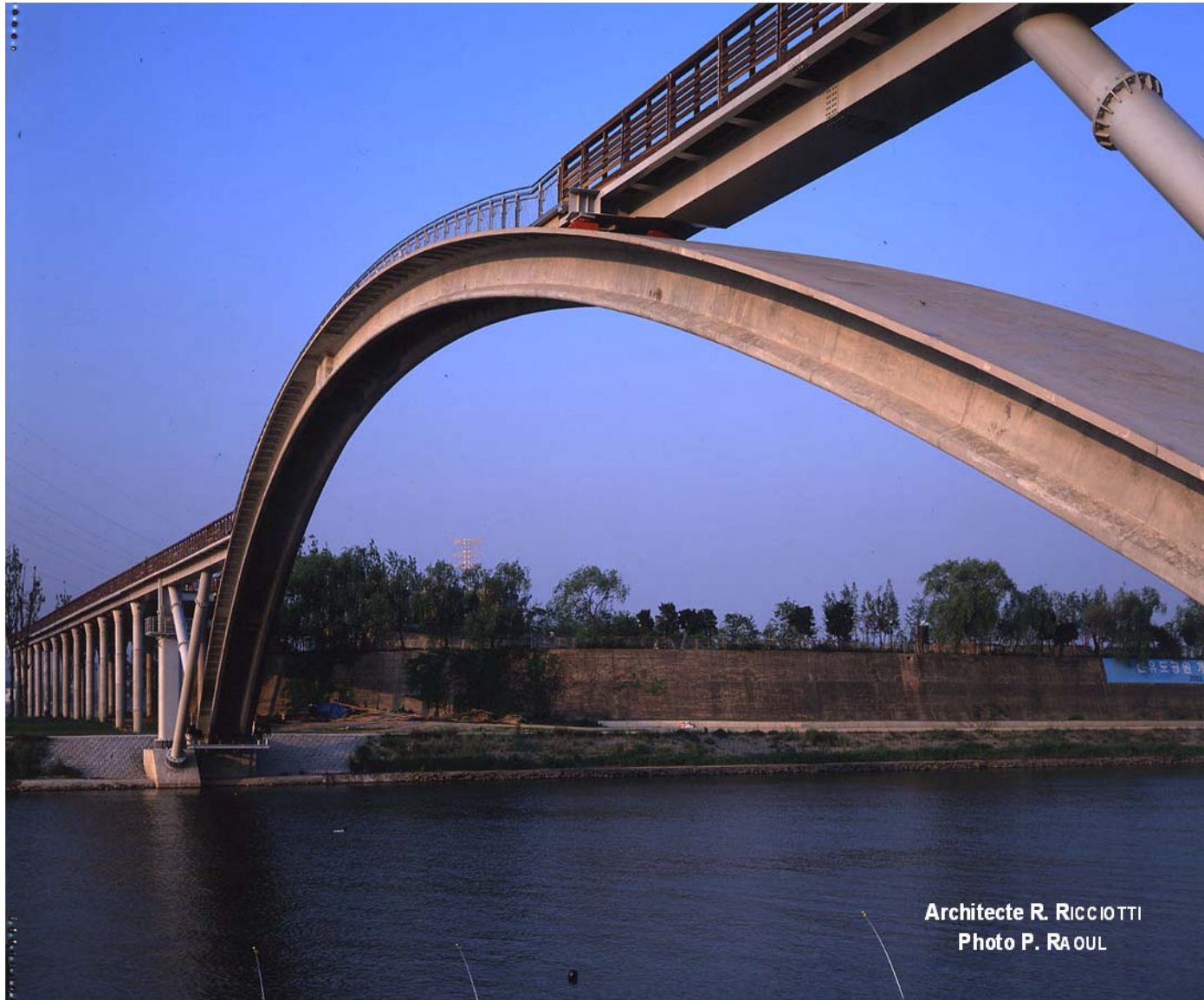
STEEL
117 kg

REINFORCED
CONCRETE
530 kg

PRESTRESSED
CONCRETE
467 kg

« DUCTAL »
140 kg

Seonyu Footbridge in Seoul, Korea

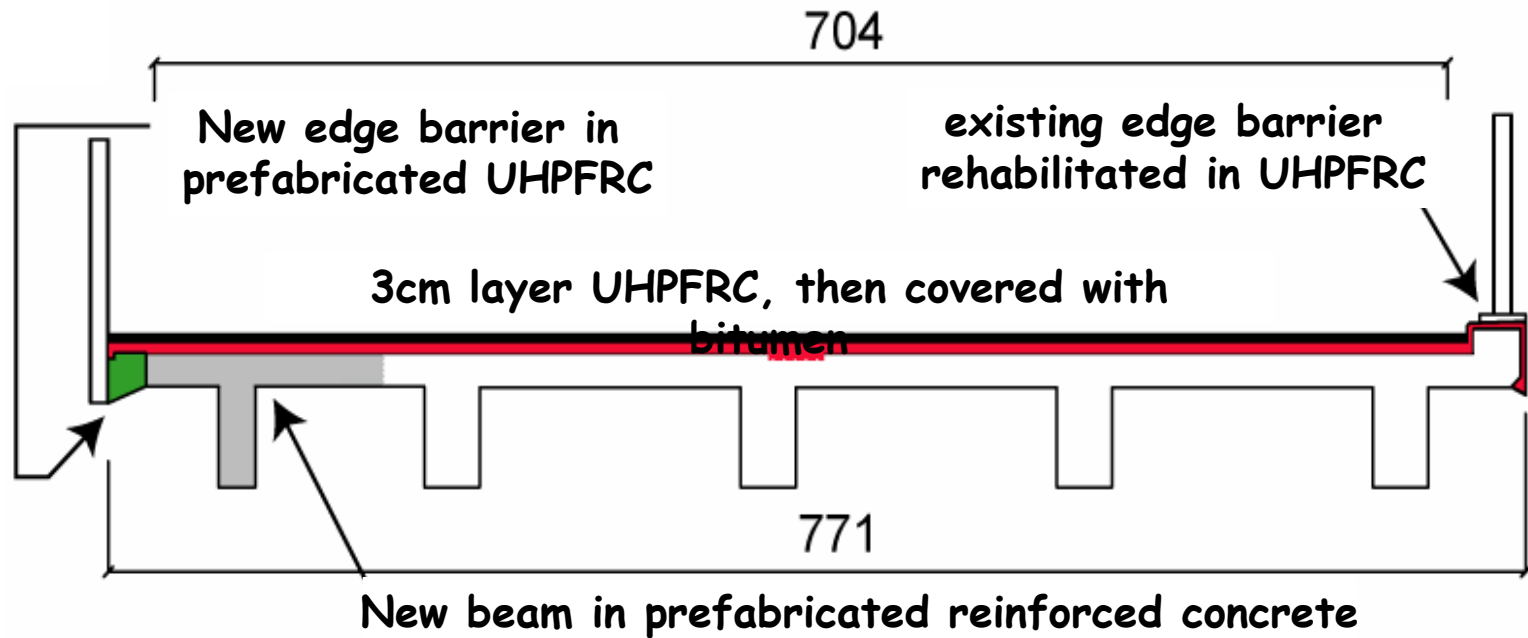


Arch span
120 m

Deck
Thickness
30 mm

Architecte R. RICCIOTTI
Photo P. RA OUL

Cost adapted applications



- Widening and renovating bridge in Switzerland:
- Laboratory MCS-EPFL
Professor Brühwiler:



Rehabilitation and widening bridge



- **October / November 2004**

Extra cost ~12%



June
2006

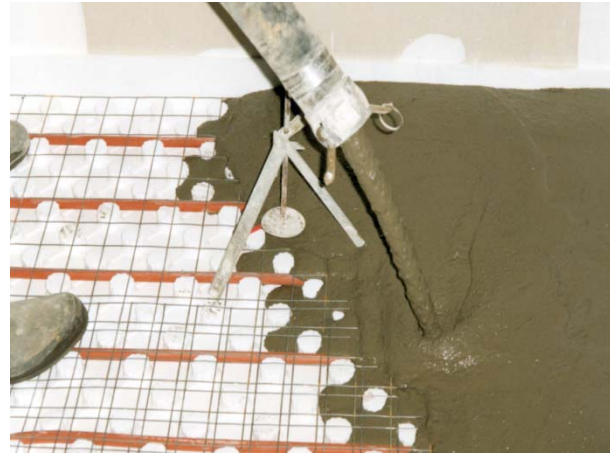
Béton autoplacant

- Une mise en œuvre à la pompe, avec un tuyau manuable
- Construction plus rapide
- Moins de personnel
- Pas de vibration, moins de bruits



- Très bon remplissage des voiles
- Parements soignés





Sols chauffants

Sols industriels



Self-Compacting Concrete

- autonivelant
- pas de ségrégation
- coule dans le coffrage et autour des renforcements
- pas besoin de vibrations



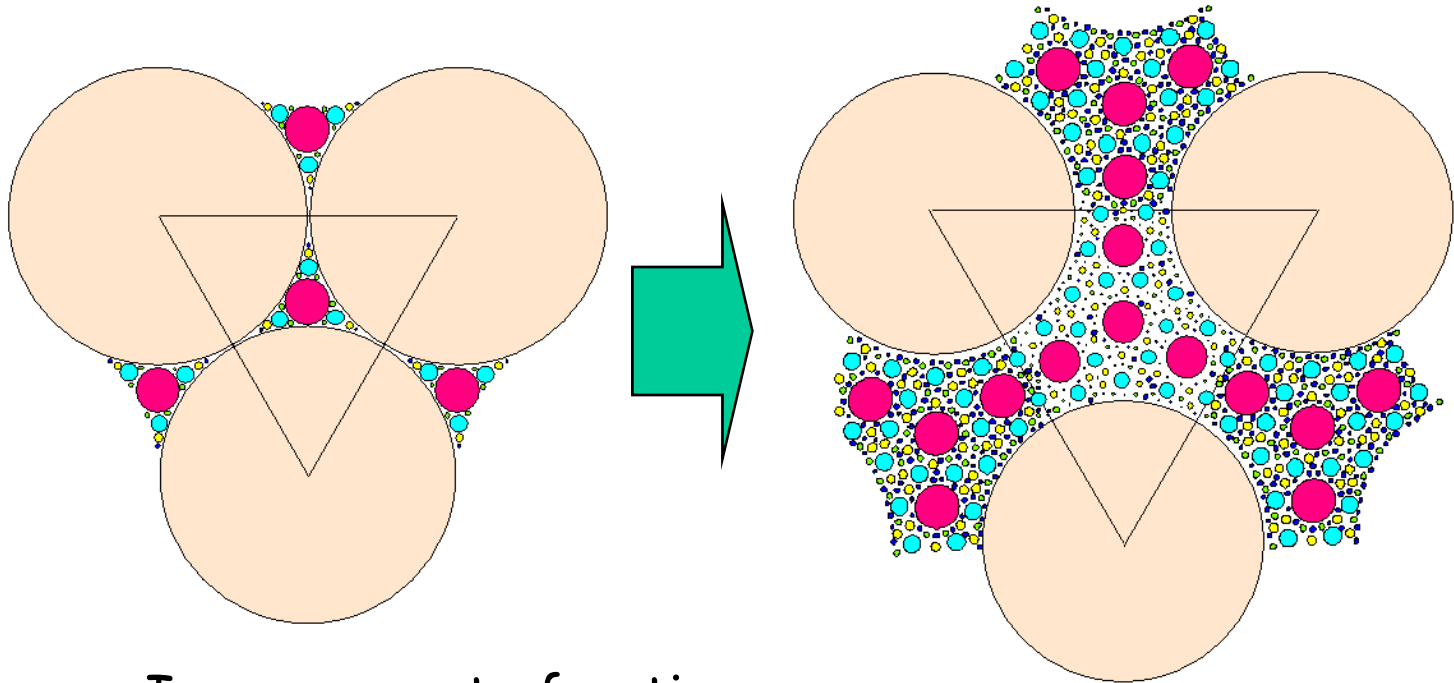


Comment

- Augmentation du contenu en ciment
+ **SCMs (cendres volantes)**
 - Espacement des granulats
- Utilisation des superplastifiants
- Utilisation des épaississants pour éviter la ségrégation

Self compacting:

Figures: Vernet, MRS bulletin May 2004

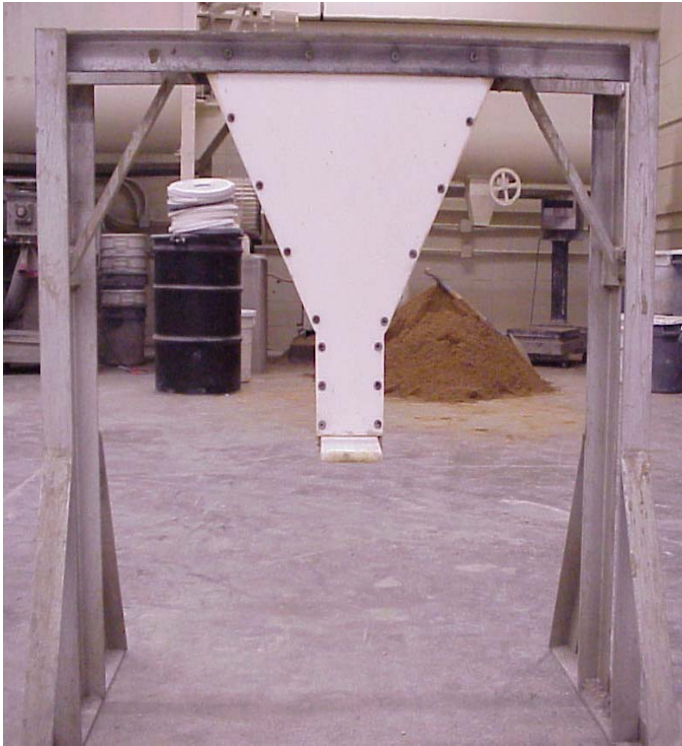


Increase paste fraction
- allows aggregates to move past each other:

Fillers: limestone, fly ash

Essais pour le béton de compactage

V-Flow
(V-coulé)



U-Flow Filling
(U-coulé en remplissant)



Coulé (et tassement) dans les éléments en masse renforcés

