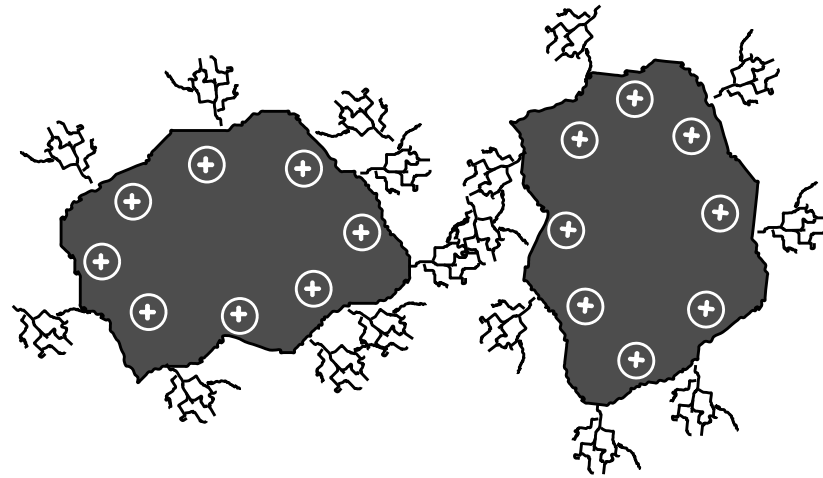


Adjuvants et nouvelles tendances dans le béton et perspective écologique spécifique



Sommaire

- 1. Généralités**
- 2. Les entraîneurs d'air**
- 3. Les accélérateurs**
- 4. Les retardateurs**
- 5. Les plastifiants / super plastifiants et BAP**
- 6. Les agents viscosants et les réducteurs de retrait**
- 7. BHP / BFUP**
- 8. L'essentiel**

1. Généralités

Adjuvants:

- Liquides ou poudre
- Ajoutés au mélange pendant le malaxage
- Dans une proportion de 5% maximum de la masse du liant (en général le ciment)
- Par leur action physique et/ou chimique, ils modifient les propriétés du béton frais et/ou du béton durci.



1. Généralités

But des adjuvants :

- Améliorer les performances (résistances mécaniques et durabilité)
- Compensation des déficiences (par exemple fissuration de retrait)

Dosage

- En petites quantités et dans les bonnes proportions, ils peuvent modifier radicalement les propriétés essentielles du mélange.
- En trop petites quantités : ils passeront inaperçus
- En trop grande quantité : ils peuvent entraîner des effets indésirables
- Plus les adjuvants sont puissants, moins les quantités nécessaires sont importantes, MAIS il devient plus facile de les surdoser.

Les mélanges

Les adjuvants peuvent être mélangés avant d'être utilisés et fournis tels quels. Cela simplifie les applications spécifiques, mais ils ne peuvent pas être utilisés pour tout et partout.

Remarque : L'utilisation d'adjuvants augmente le coût du béton

2. Les entraineurs d'air

Pourquoi entrainer l'air?

Impacts sur les applications réelle



2. Les entraîneurs d'air

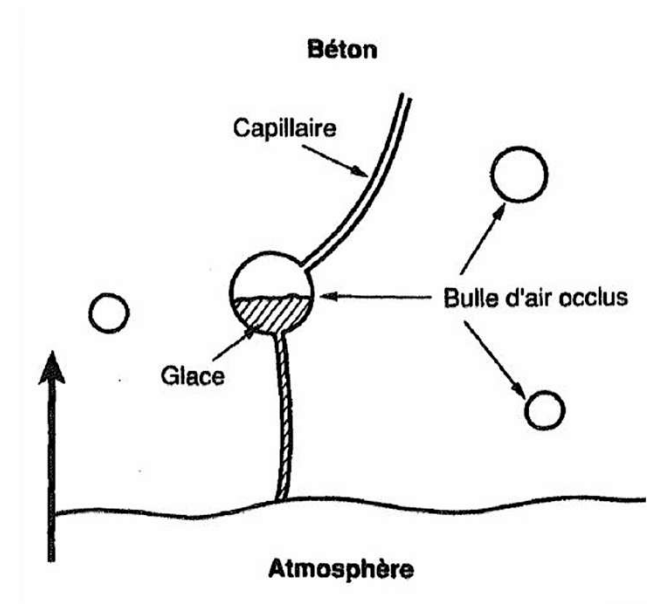
Problématique :

Résistance au gel-dégel

Solution :

Ajout d'entraîneur d'air :

- Créer le volume nécessaire à l'expansion de la glace sans endommager la microstructure du béton
- Volume total d'air piégé dans le béton :
 - $< 3\%$ sans entraîneurs d'air (diamètre de 0,5 à 5 mm)
 - $> 3\%$ (3-8 %) avec entraîneurs d'air selon les spécifications
- Favorisent la formation de nombreuses bulles d'air stables et plus fines (diamètre de 1 à 100 μm).



© Pr. K. Lahlou

2. Les entraîneurs d'air

Composition :

- Composés **tensio-actif** comme des sels de sodium ou des acides gras organiques, principalement anioniques

Mécanisme des tensioactifs :

- Polymères à **longues chaînes** avec un groupe polaire à une extrémité
- Les molécules se concentrent à **l'interface air-liquide**

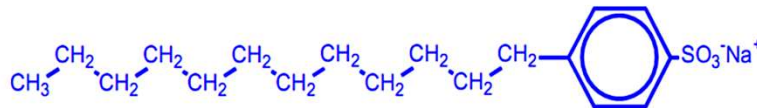
Chaîne hydrophobe
(insoluble dans l'eau)

Tête hydrophile
(soluble dans l'eau)



Anionique – COO^-
– SO_4^{2-}
– SO_3^-

Ex: Dodecylbenzenesulfonate de Na (DDBS)

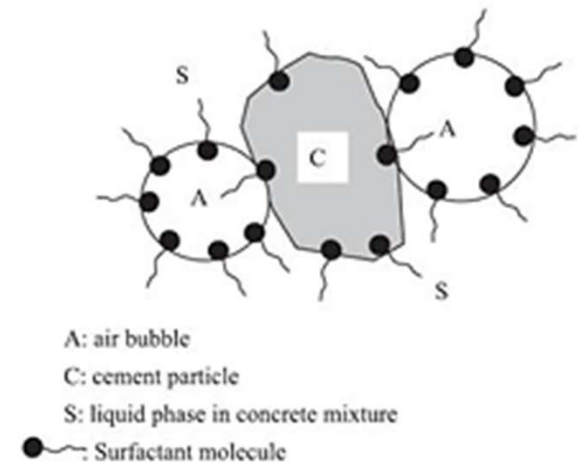
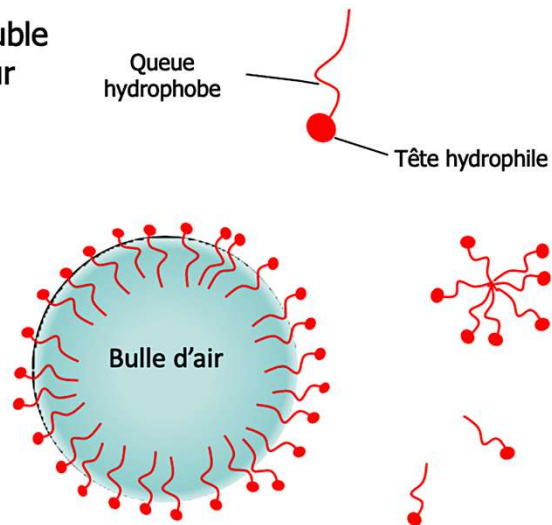


2. Les entraîneurs d'air

Mécanisme des tensioactifs :

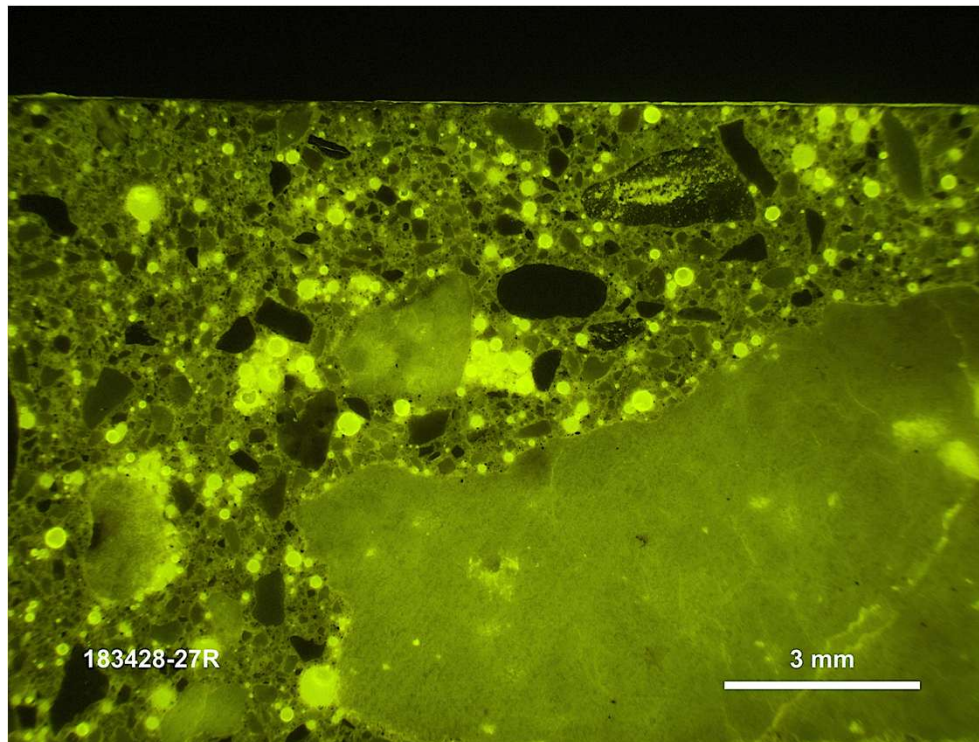
- Les groupes **polaires** s'alignent côté **liquide**
- Les groupes **non-polaires** s'alignent côté **air/ciment**

Formation d'un film insoluble
(et hydrophobe) autour
des vides d'air



2. Les entraîneurs d'air

Béton avec entraîneur d'air (pores de diamètres 10 à 500 microns) :



- L'ajout d'entraîneur d'air améliore également l'ouvrabilité du béton frais
- Pour ne pas engendrer une perte trop importante de résistance à la compression, le volume total de pores ne doit pas dépasser env. 5%_{vol.}
- L'entraînement de l'air est moins efficace à des dosages d'eau élevés
- Finesse plus élevée du ciment, dosage plus élevé d'AEA pour obtenir un certain volume d'air.

3. Les accélérateurs

Pourquoi accélérer?

Impacts sur les applications réelle



3. Les accélérateurs

Problématique :

Besoin d'accélérer le processus d'hydratation pour avoir une prise plus rapide et une résistance au jeune âge améliorée

Nécessité de :

- Avancer les opérations de finition
- Réduire le temps de cure
- Augmenter la vitesse de durcissement pour le décoffrage et la mise en service
- Réduire le risque de gel du béton à l'état frais en hiver

Solutions :

- Augmenter la cinétique d'hydratation
- Ajout d'un accélérateur

3. Les accélérateurs

Les principales classes d'accélérateurs :

A. Effet instantané (accélérateur de prise)

Application : Shotcrete (béton projeté)

Composition : les sels d'aluminium (alumino-sulfates)

B. Effet dans les premières heures (accélérateur de durcissement)

Application : la préfabrication

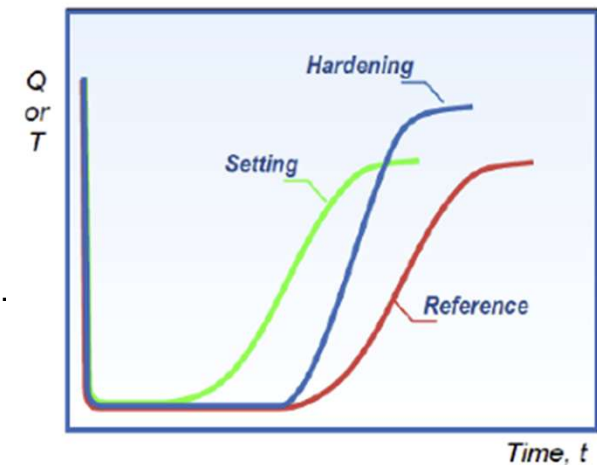
Composition : Les chlorures de calcium / sodium, les solutions de CSH ...

→ **Attention à la corrosion des armatures par les chlorures!**

C. Effet dans les premiers jours (accélérateur de durcissement)

Application : Mélanges prêt à l'emploi (démoulage rapide)

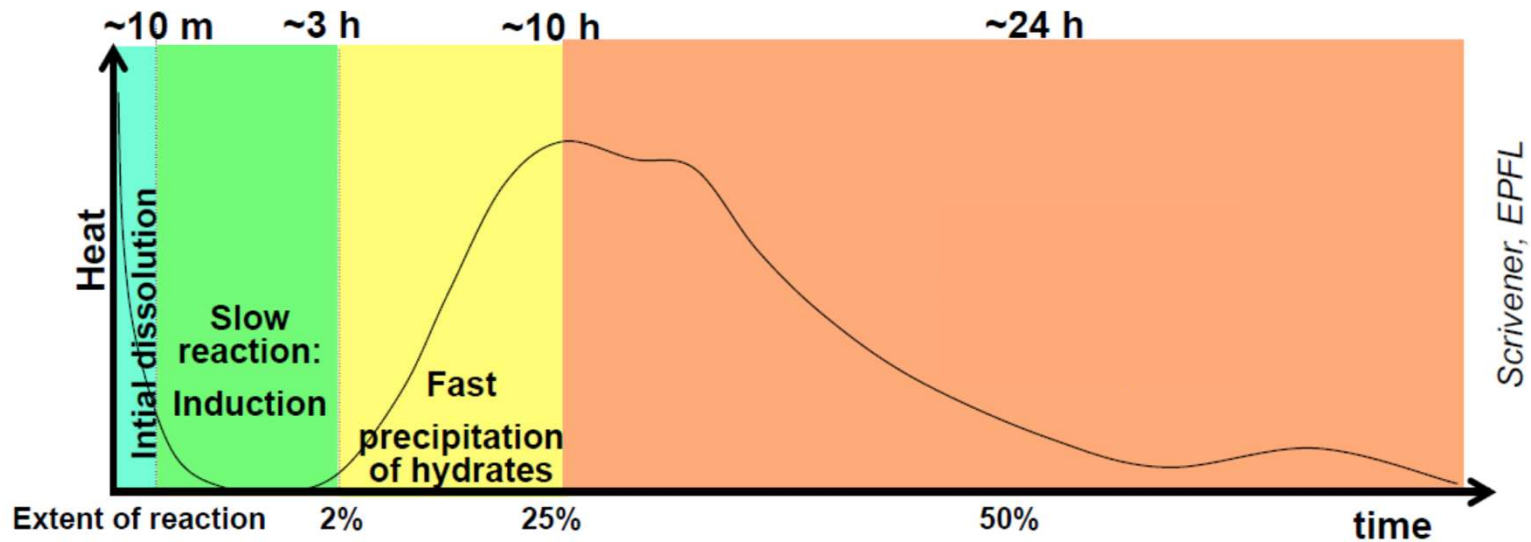
Composition : Tri-isopropanol amine TIPA



Myrdal, 2007

3. Les accélérateurs

Processus d'hydratation, rappel

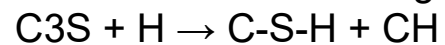
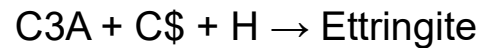


Phases anhydres :

Silicates: Alite (C3S), Belite (C2S)

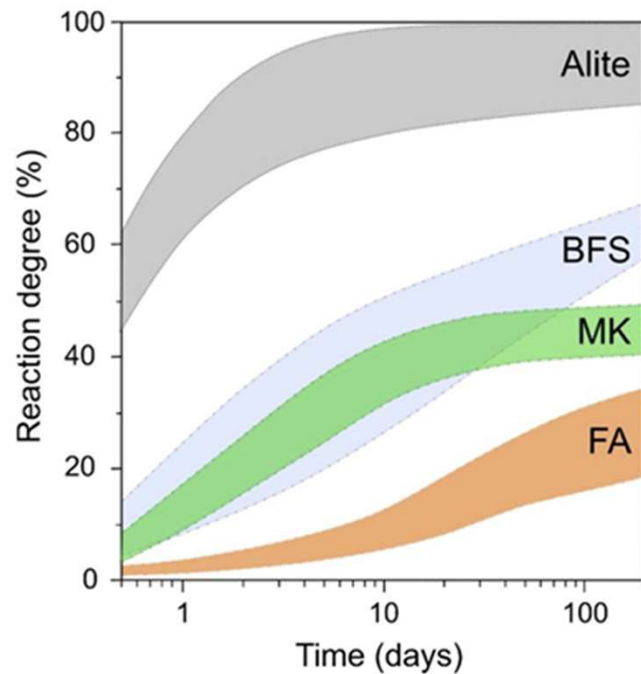
Aluminates: C3A, C4AF

Hydratation :

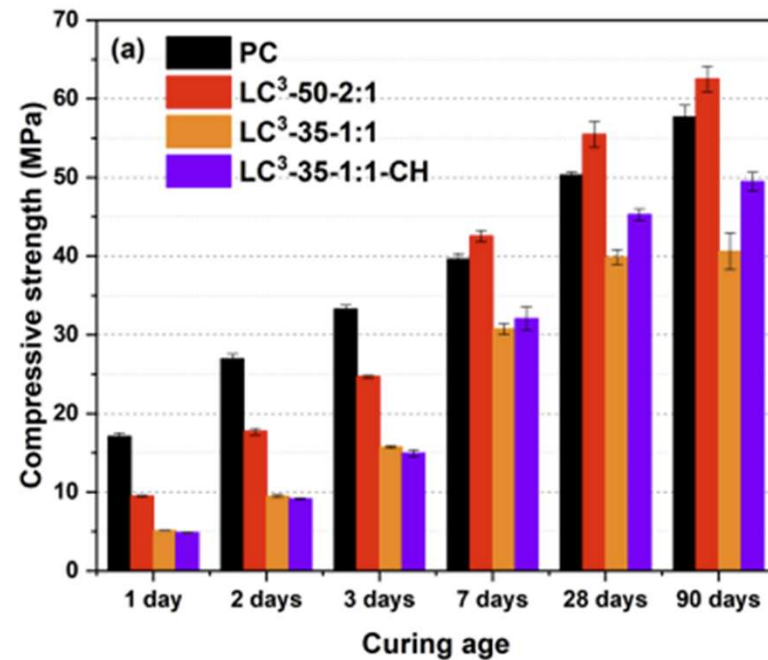


3. Les accélérateurs

L'importance d'accélérer la résistance à jeune âge pour le ciment avec remplacement du clinker



Skibsted & Snellings, Cement and Concrete Research, 124, 2019



Zunino et al., 2023

3. Les accélérateurs

Exemple : Effet du CaCl_2

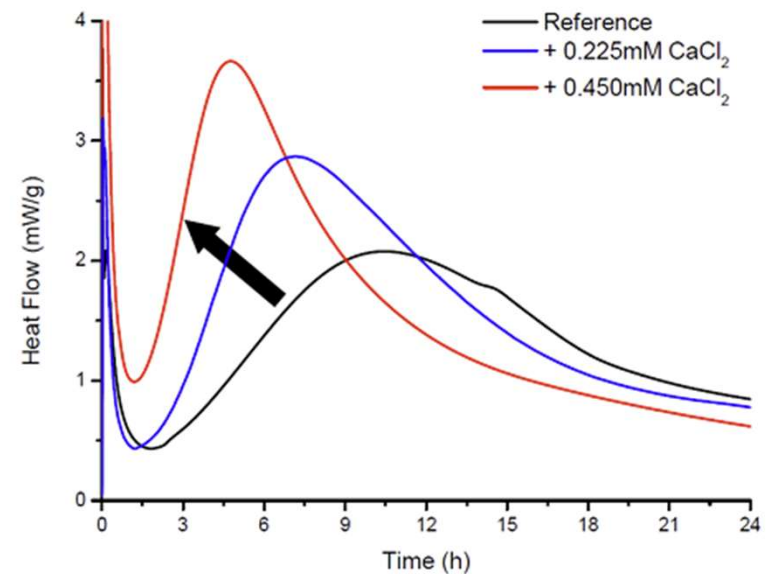
- Accélérateur le plus efficace
- Utilisé dans le béton depuis 1873 (brevet en 1885)
- L'utilisation dans le béton est autorisée avec des restrictions ou interdite

Mécanisme :

Pas encore clair pour le moment

Hypothèses :

- Augmentation de la solubilité des ions calcium en solution
- Effet des chlorures sur la cinétique de dissolution
- Effet des chlorures sur la croissance des hydrates



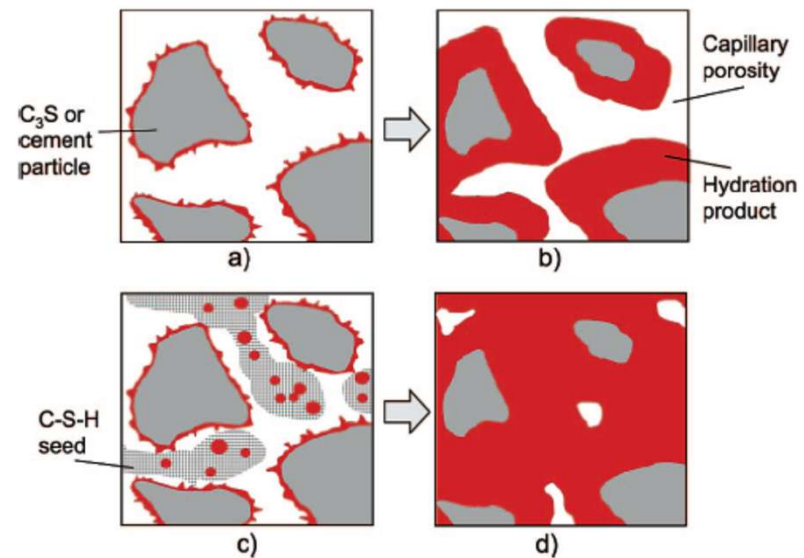
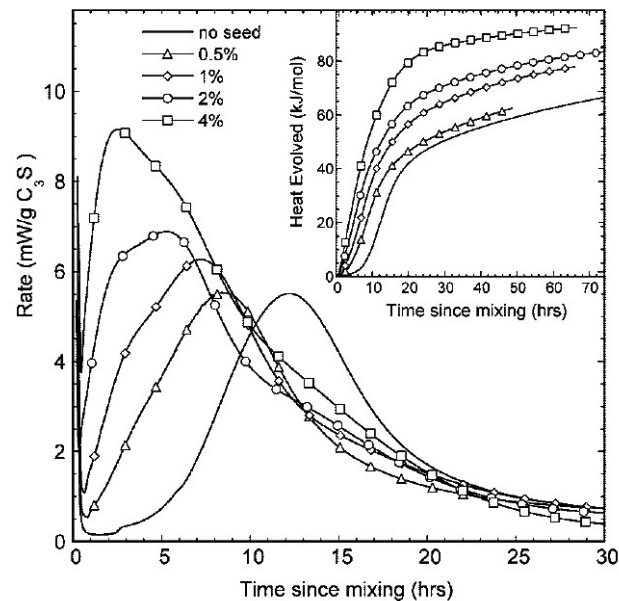
Courtesy of Dr. P Juilland (Sika AG)

→ Attention à la corrosion des armatures!

3. Les accélérateurs

Exemple : **Addition de nuclei de C-S-H**

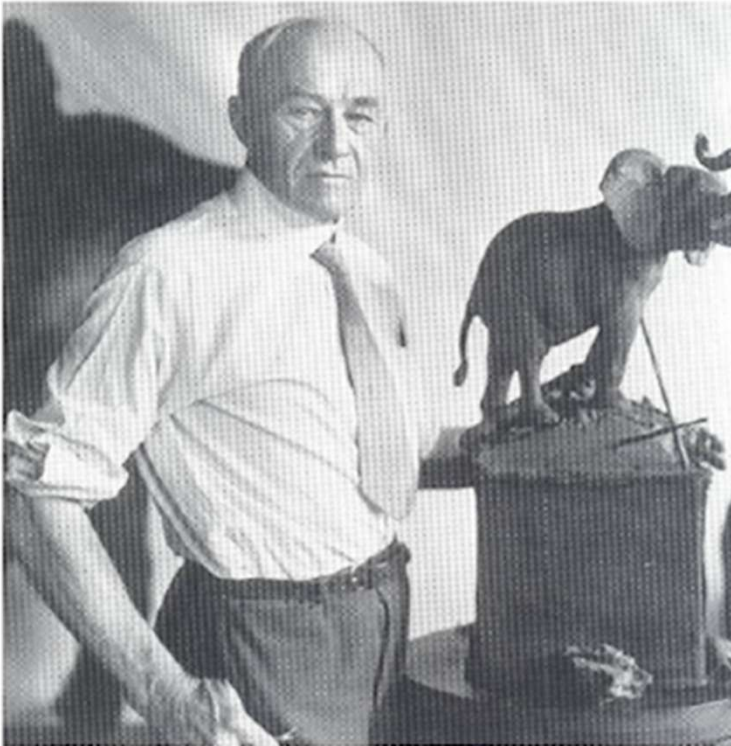
- Effet physique : augmentation des surfaces disponibles pour la précipitation des hydrates et réduction de l'énergie de nucléation
- La croissance des hydrates peut commencer presque instantanément
- Réduction de la porosité capillaire, distribution plus homogène des C-S-H par rapport au C_3S simple.



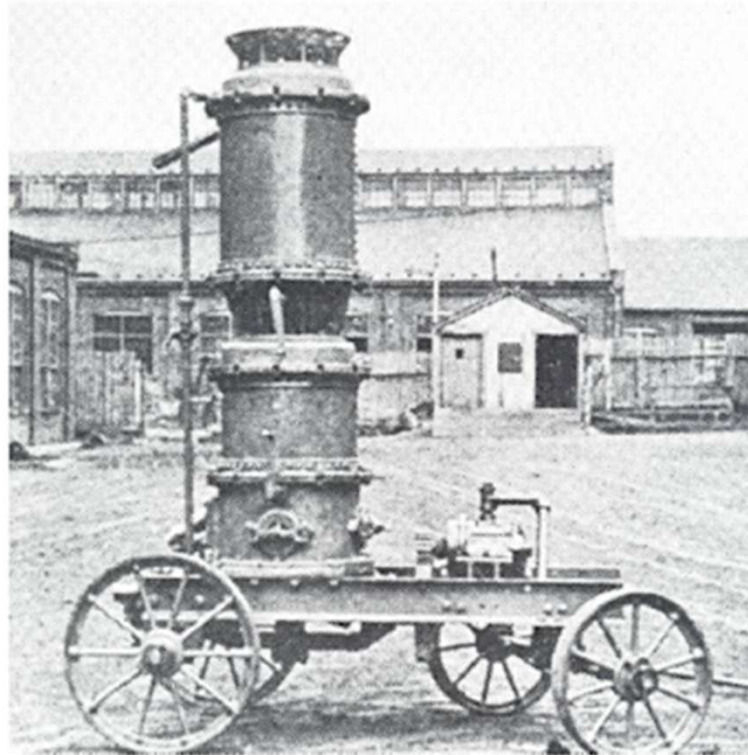
[Thomas et al., The Journal of Physical Chemistry C, 113, 11, 2009]

3. Les accélérateurs

Invention du béton projeté (shotcrete) : 1907



Carl E. Akeley (1864-1926)



'cement-gun' 1910

3. Les accélérateurs

Béton projeté - exemple d'application

Retenue d'eau des Marécottes (1926)

Alexandre Sarrasin (1895-1976)

voûte en béton projeté



3. Les accélérateurs

Béton projeté - exemple d'application

Stabilisation de falaises



3. Les accélérateurs

Béton projeté - exemple d'application

Construction du M2, Lausanne : tunnel St-Laurent



3. Les accélérateurs

Béton projeté - exemple d'application

Tunnels



3. Les accélérateurs

Application :



Shotcrete

SIKA TUNNELING AND MINING

© Copyright Sika Services AG 2014 - All rights reserved



4. Les retardateurs

Pourquoi retarder?

Impacts sur les applications réelle



4. Les retardateurs

Problématique :

besoin d'empêcher la prise

Nécessité de :

- Prolonger la période avant la prise
- Compenser l'accélération de la prise sous les effets de la chaleur

Solution :

retarder la cinétique d'hydratation

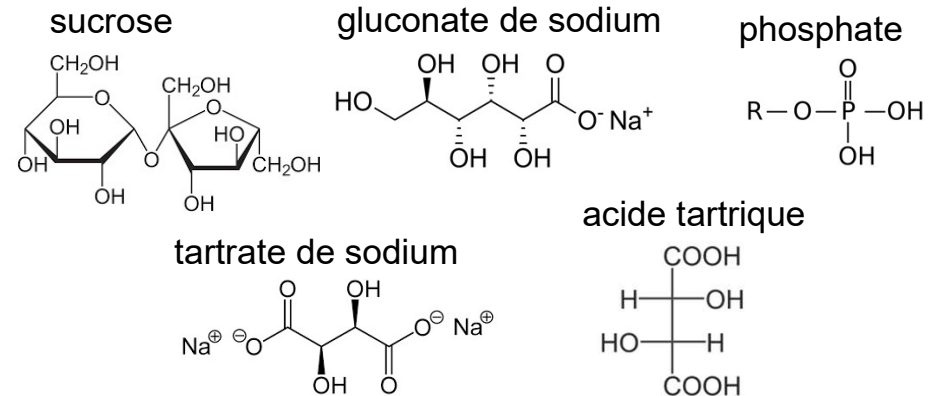
→ ajout d'un retardateur



4. Les retardateurs

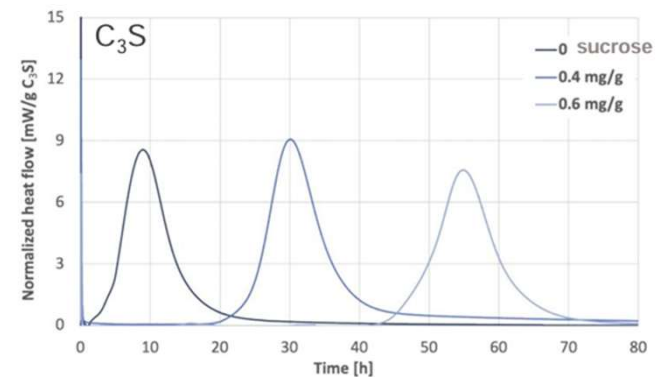
Composition :

- lignosulfonates, certains sels d'acides carboxyliques, sucres ou dérivés de sucres, certains sels inorganiques.
- De nombreux retardateurs ont également une action de réduction de l'eau, et de nombreux réducteurs d'eau retardent l'hydratation du ciment
- Les sucres sont utilisés comme retardateurs d'hydratation du ciment : Le sucre est le plus efficace



Nonretarding	Good retarders	Excellent retarders
α -Methyl glucoside ^b Thehalose ^b	Glucose ^a Maltose ^a Lactose ^a Cellobiose ^a	Sucrose ^b Raffinose ^b

Thomas & Birchall, 1983



Xu et al, Cement and Concrete Research, 181, 2024

4. Les retardateurs

Mécanisme :

Pas encore clair pour le moment

Hypothèses :

- **Adsorption** de l'adjuvant sur les phases en dissolution ou précipitées
→ réduit la cinétique d'hydratation
- L'adjuvant réagit avec des composants du mélange et se **précipitent** sur les anhydres
→ formation d'une couche protectrice
- **Complexation** de l'adjuvant avec les ions Ca^{2+}
→ réduction des ions Ca^{2+} disponibles
- L'adjuvant bloque les sites de nucléation des hydrates par **nucléation**
→ inhibe la formation de nouveaux hydrates

5. Les plastifiants / super plastifiants

Pourquoi plastifier?

Impacts sur les applications réelle



5. Les plastifiants / super plastifiants

Problématique :

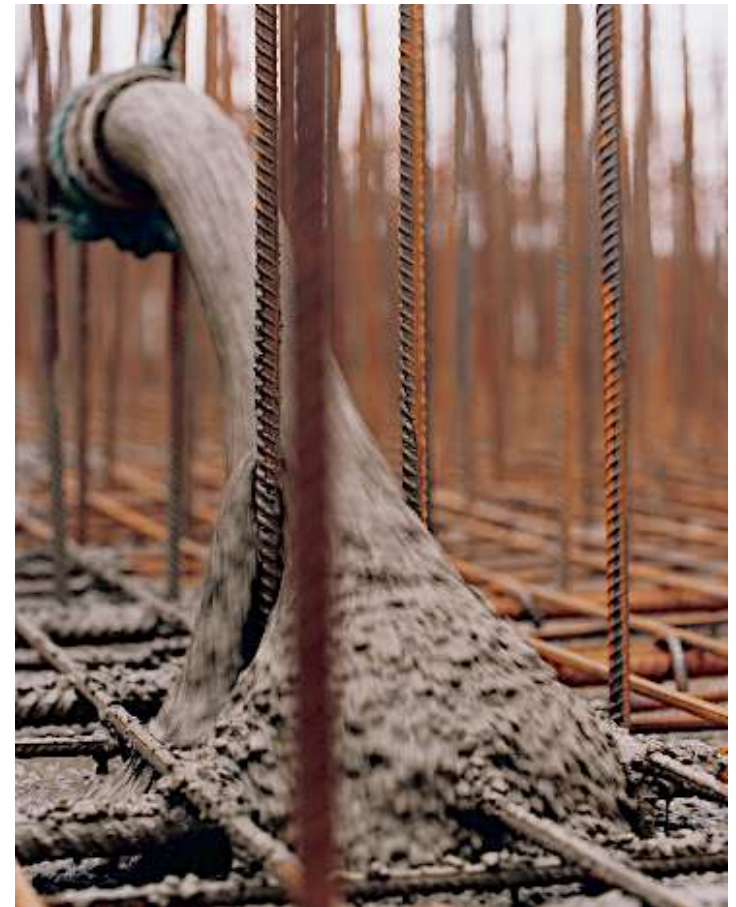
Besoin d'ouvrabilité pour la mise en place sans perdre de propriétés mécaniques et/ou de durabilité

Respecter les exigences normatives
SN EN 206

→ Rappel : l'ajout d'eau augmente la porosité capillaire!

Solution :

Addition d'un plastifiant ou superplastifiant (dosage 0.1-1%)



5. Les plastifiants / super plastifiants

Développements récents de la technologie des bétons:

→ adjuvants organiques et additions minérales



HPC
High Performance
Concretes

BFUP
Béton fibré à ultra
haute performance



Béton projeté



SCC / BAP
Béton auto plaçant



5. Les plastifiants / super plastifiants

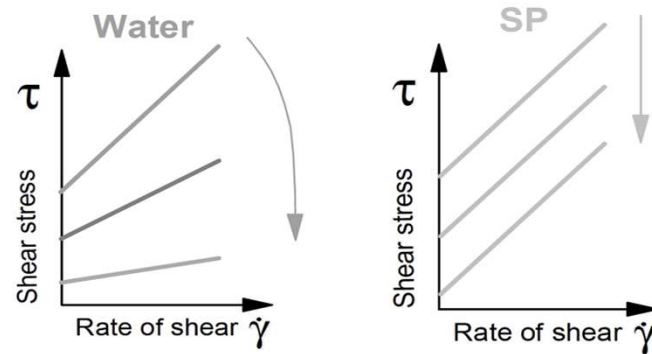
Fluidification

OU

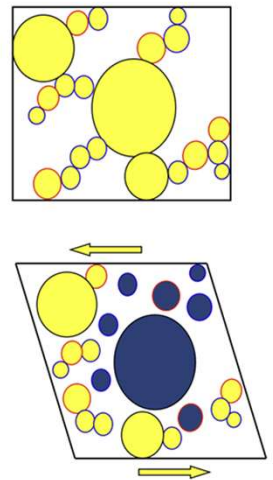
Réduction du rapport e/c
(durabilité - résistance)

OU

Réduction de la teneur en ciment

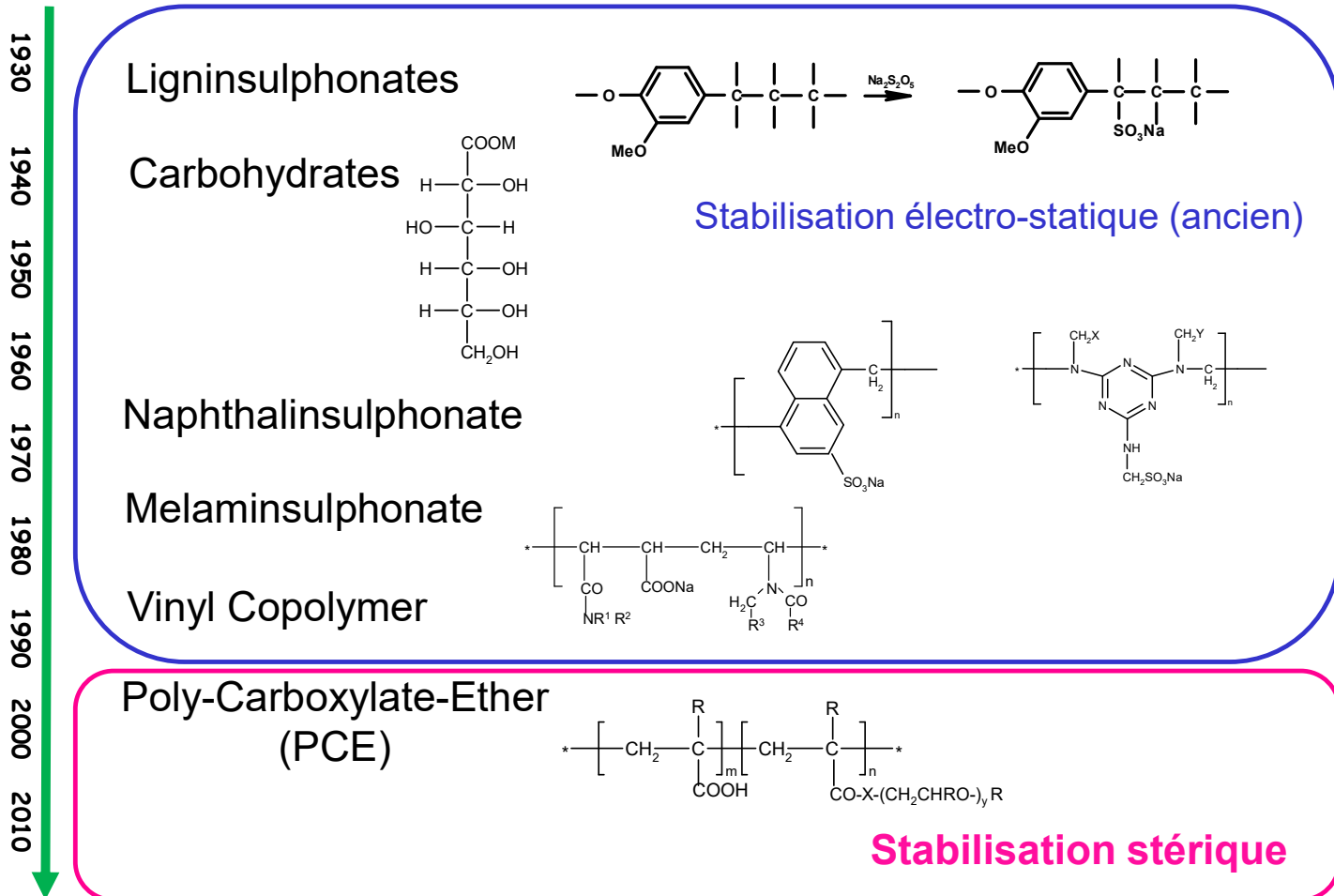


Wallevik, 2020



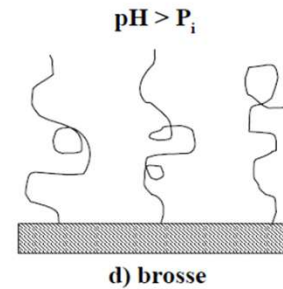
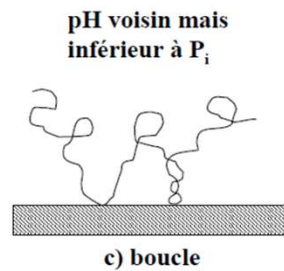
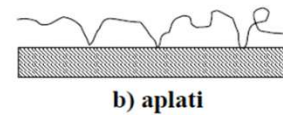
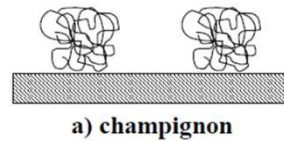
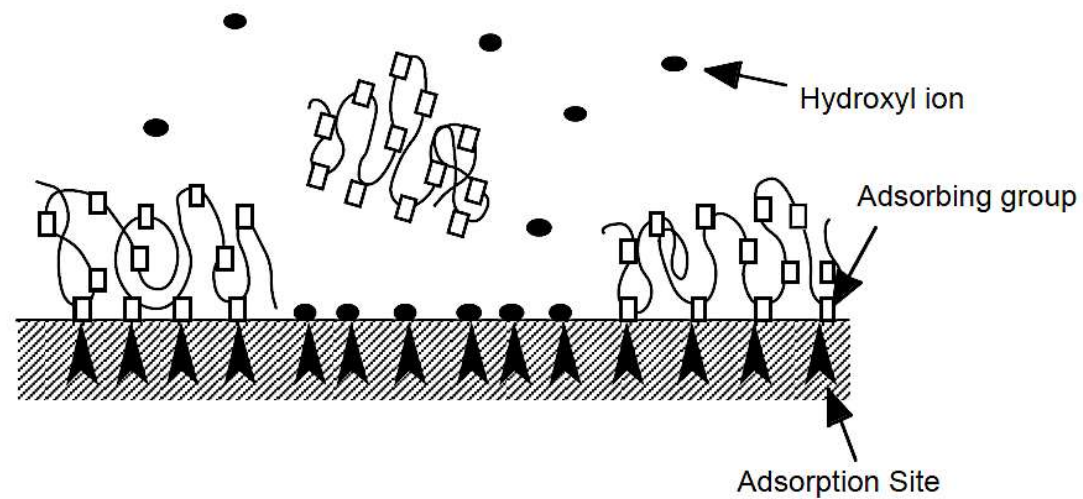
5. Les plastifiants / super plastifiants

Historique des plastifiants / super plastifiants et composition



5. Les plastifiants / super plastifiants

Mécanisme :

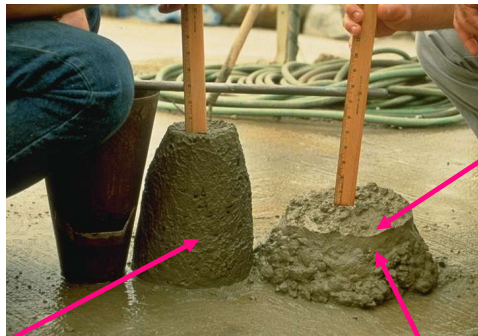
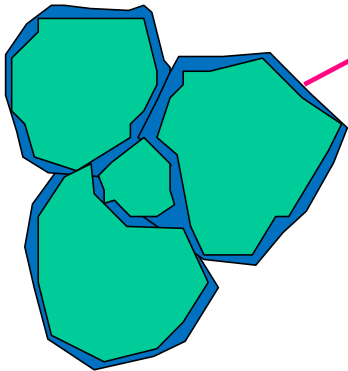


[Flatt, 1999]
[Perche, 2004]

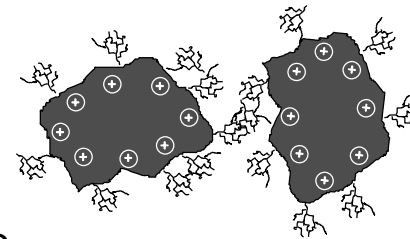
5. Les plastifiants / super plastifiants

Mécanisme :

Forces de Van der Waals
(attractive)

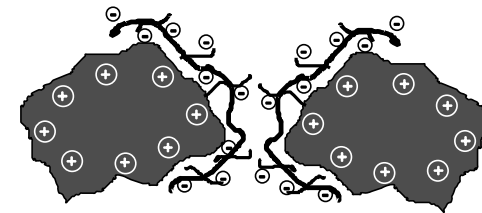


Répulsion stérique



Ou:

(Répulsion électrostatique)



La surface spécifique du mélange influence l'effet de l'adjuvant!

→ Importance des « fines » dans le sable du mélange

5. Les plastifiants / super plastifiants

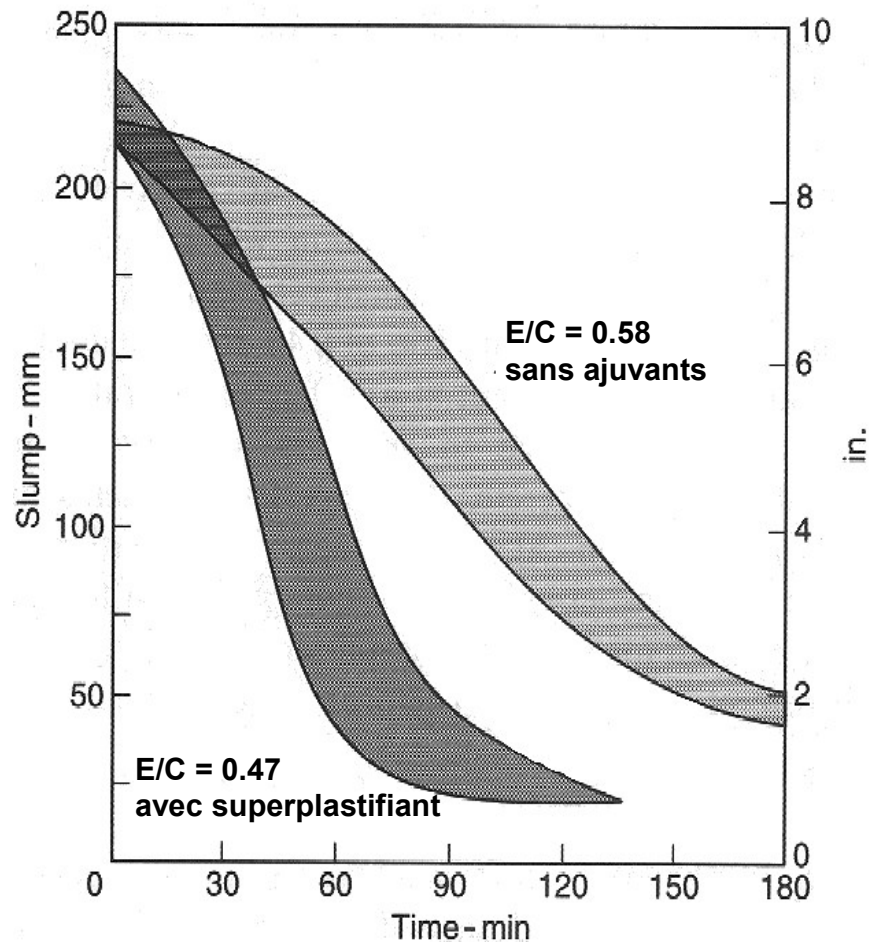
Mécanisme :



5. Les plastifiants / super plastifiants

Mécanisme :

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:

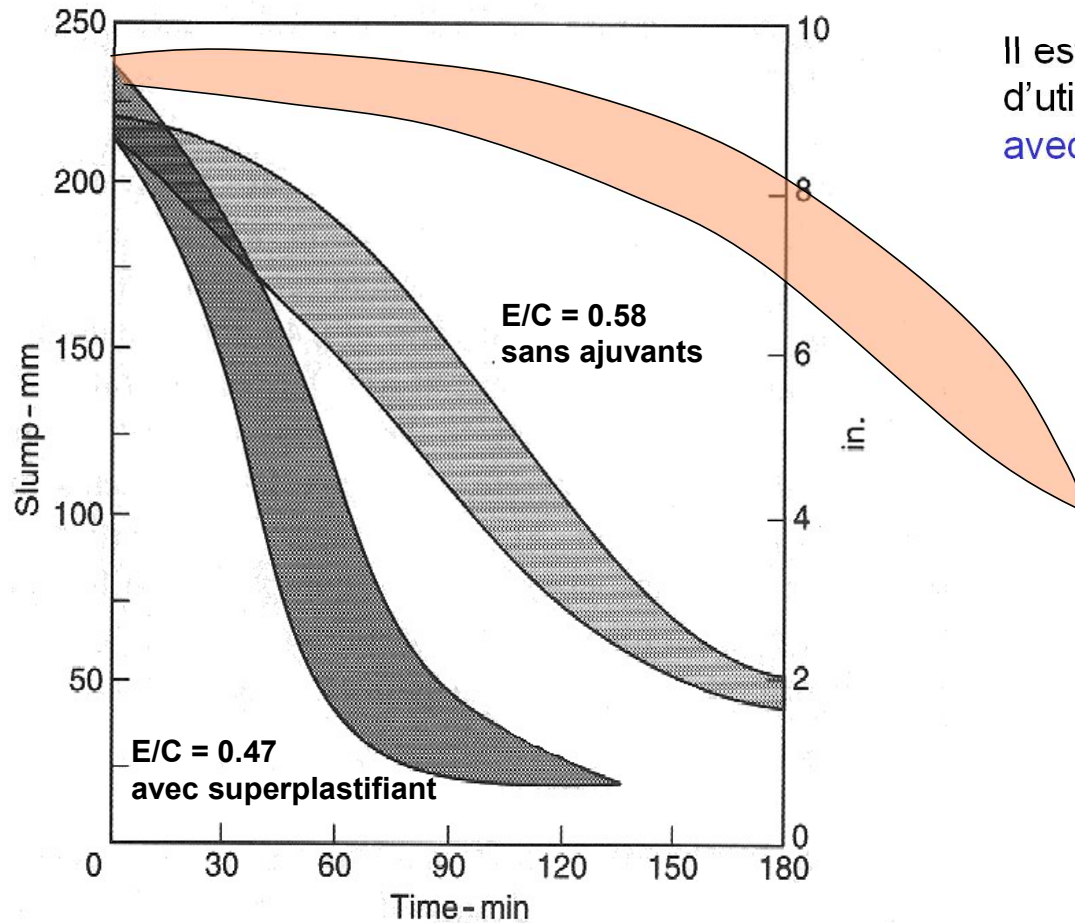
- C_3A , SO_3 , alcalins
- température
- finesse

La perte de l'effet peut être minimisée en retardant l'addition d'adjuvant (sur chantier)

5. Les plastifiants / super plastifiants

Mécanisme :

Perte de slump :

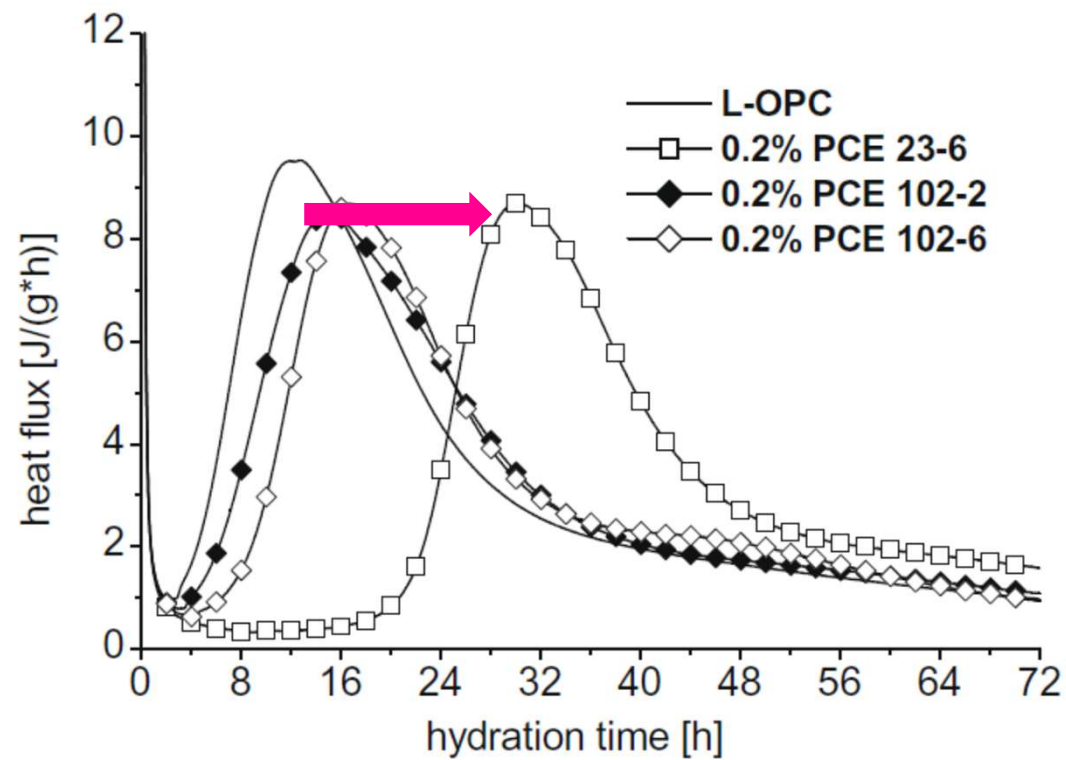


Il est également possible
d'utiliser le superplastifiant
avec un retardateur

5. Les plastifiants / super plastifiants

Attention cependant à l'effet des PCE:

Certains ont un effet retardateur



6. Les réducteurs de retrait

Pourquoi réduire le retrait?

Impacts sur les applications réelle



6. Les réducteurs de retrait

Les différents types de retrait :

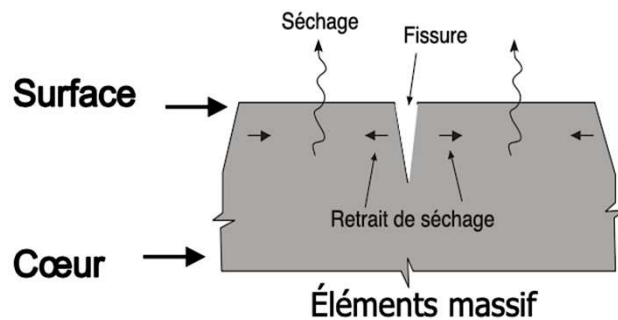
- **retrait plastique**
 - évaporation de l'eau de gâchage pendant la prise
 - Quelques heures après la mise en place
 - Fissures superficielles précoces
- **retrait autogène**
 - Consommation d'eau interne par l'hydratation du ciment
 - Pendant l'hydratation initiale
 - Réduction du volume interne
- **retrait de séchage/hydraulique**
 - évaporation de l'eau de la porosité capillaire (après la prise)
 - Jours à mois après le durcissement
 - Fissuration à moyen terme
- **retrait thermique**
 - Variation de température due à l'hydratation
 - Pendant et après la prise
 - Fissures dues aux gradients thermiques

6. Les réducteurs de retrait

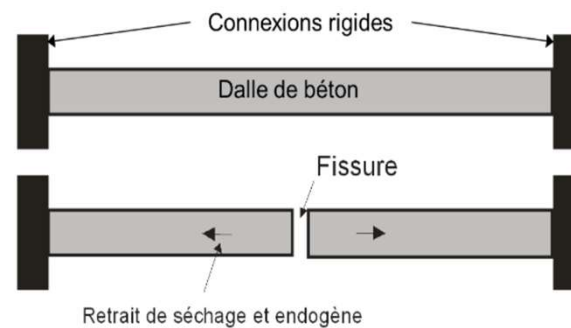
Problématique :

risques de l'apparition de fissures lors du retrait

fissuration de retrait :



fissuration de retrait entravé :



Solutions :

Ajout d'agents anti-retrait de type surfactant

6. Les réducteurs de retrait



Photo 3 – Contrecoeur de fenêtre fissuré (sud)



Photo 4 – Fissure pénétrant profondément dans le béton (mur nord)

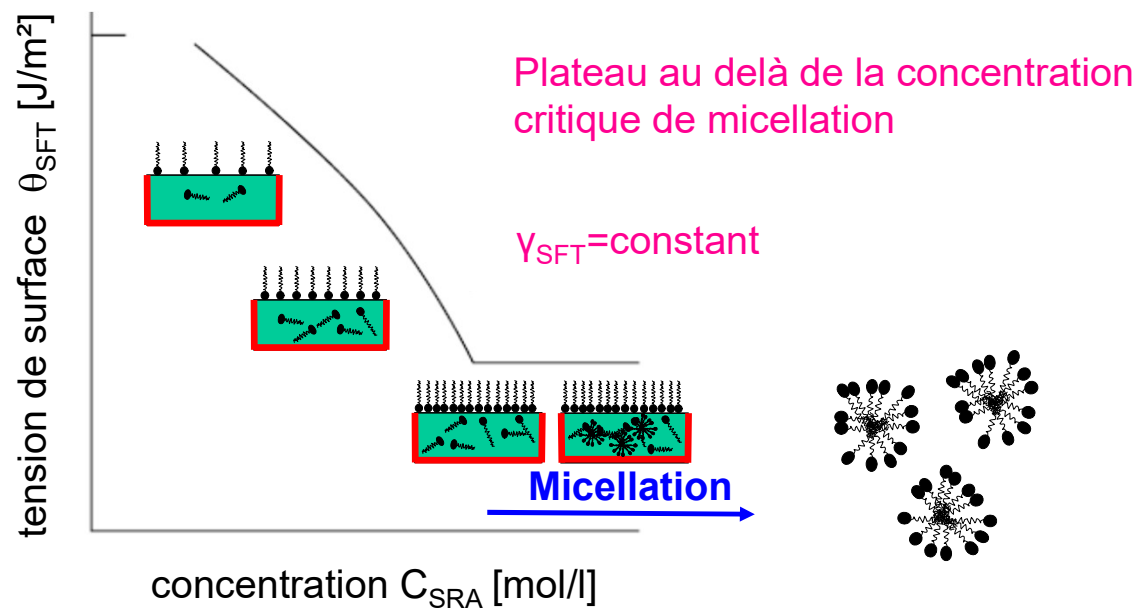
6. Les réducteurs de retrait

Mécanisme :

Activité de surface des surfactants non-ioniques

Composition : p. ex. éthers de glycoles

⇒ Un excès de surfactants en surfaces [mol/m²] réduit la tension de surface du béton



6. Les réducteurs de retrait

Composition:

Généralement des alcools polyéthyléniques ou des esters solubles dans l'eau.

Exemple : polyéthylène glycol, dérivés d'éthers, etc.

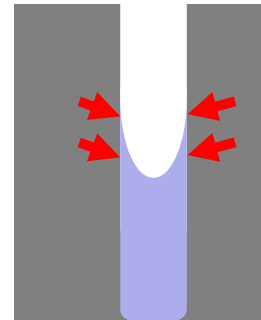
Mécanisme : Réduction de la tension superficielle de l'eau

- L'eau contenue dans les pores capillaires exerce une pression capillaire pendant le séchage (dessiccation). Cette pression tire sur la matrice cimentaire et cause le retrait.

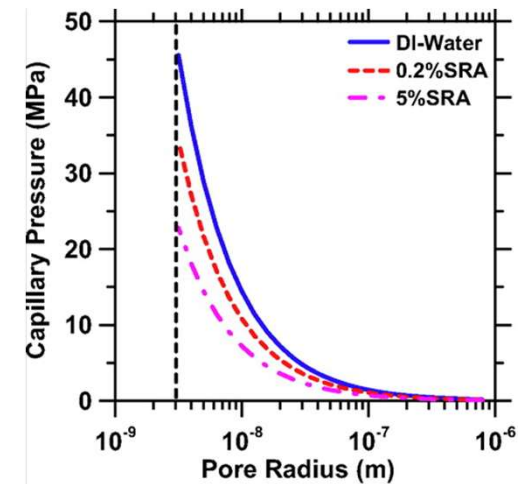
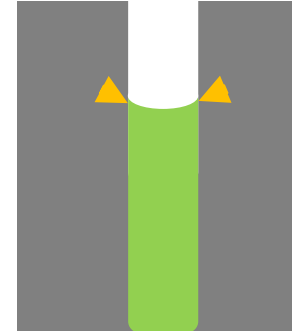
Le SRA réduit cette tension → diminution du gradient de pression dans la pâte.

- ⊖ Moins de pression capillaire
- ⊖ Moins de contraction du béton
- ☑ Réduction du retrait

surface de béton
sans SRA:



surface de béton
avec SRA:



Gaurav Sant et al. 2010

6. Les agents viscosants

Pourquoi contrôler la viscosité?

Impacts sur les applications réelle



6. Les agents viscosants

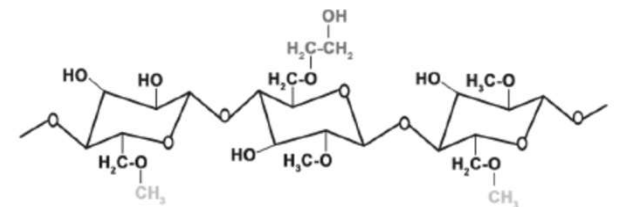
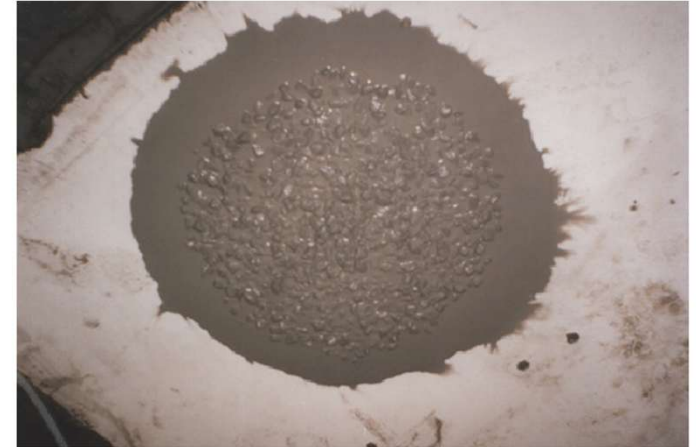
Problématique :

- Ségrégation du béton
- Ressuage
- Faible cohésion

Solutions :

Ajout d'agents de viscosité comme les éthers de cellulose, glucose, ou les gommes naturelles pour:

- Augmenter la viscosité sans trop nuire à sa fluidité
- Stabiliser et épaissir
- Diminuer le ressuage
- Empêcher la ségrégation des granulats
- Améliorer la cohésion du mélange pour le béton projeté.

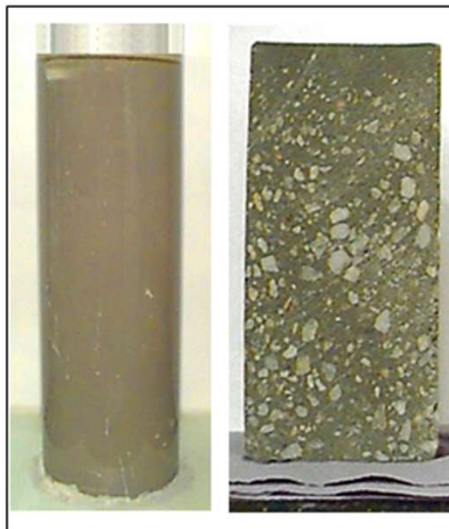


6. Les agents viscosants

béton homogène :



béton ségrégué :



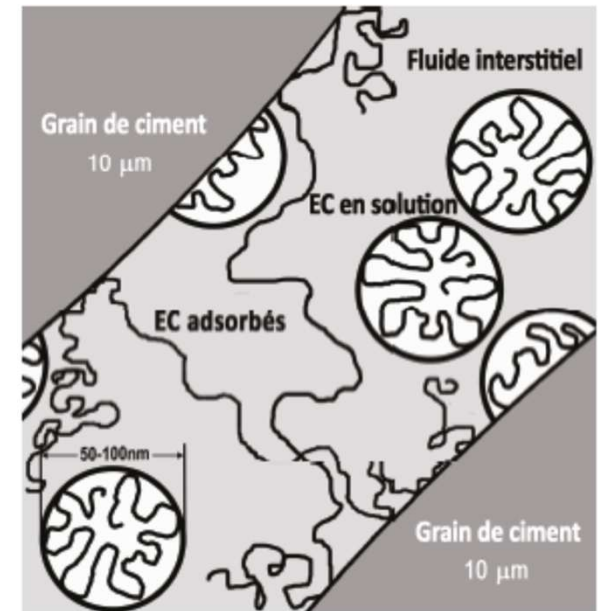
6. Les agents viscosants

Mécanisme :

Le **mécanisme d'action des agents viscosants pour le béton** repose principalement sur leur capacité à modifier la **viscosité** de la phase liquide.

e.g. **Polymères hydrosolubles (gomme de xanthane, cellulose, polyacrylamides...)**

- **Hydratation et gonflement** des chaînes polymériques :
Ils absorbent de l'eau, gonflent et forment un réseau gélifié dans la pâte.
- **Augmentation de la viscosité apparente** :
Le réseau de polymères freine le mouvement des particules solides (ciment, fines, sables).
- **Stabilisation du mélange** :
Le béton devient plus **cohésif**, ce qui **limite la ségrégation** des granulats et le **ressuage**.



Brumaud, C. PhD thesis 2011

6. Les agents viscosants

Caractéristique	Superplastifiants	Agents Viscosants
Rôle principal	Fluidifier sans ajouter d'eau	Stabiliser et épaissir
Action	Dispersent les grains de ciment	Gélifient la phase aqueuse
Effet sur fluidité	Augmentation	Peu ou pas d'effet direct
Effet sur stabilité	Peut la réduire	L'améliore fortement
Utilisation typique	Tous types de béton	BAP, béton projeté

7. Nouveaux bétons

- **BAP**
- **BHP/BFUP**
- **Impression 3D**

7. Nouveaux bétons: BHP/BFUP et BAP

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

BAP

Bétons autoplaçants /
autocompactants

BHP

Bétons à haute performance

BFUP

béton fibrés à ultra haute perform.

7. BAP-Bétons autoplaçant

- Auto-nivelant
- Pas de ressuage
- Facile à mettre en place (enrobage des armatures)
- Pas de mise en place par vibration (gain de temps et de main d'oeuvre)



7. BAP-Bétons autoplaçant

- Cadence de construction augmentée
Le temps, c'est de l'argent et
le béton doit pénétrer rapidement et facilement entre les armatures.



250 m high building Roppongi Hills, Tokyo

April



June



August



October



December



7. BAP-Bétons autoplaçant

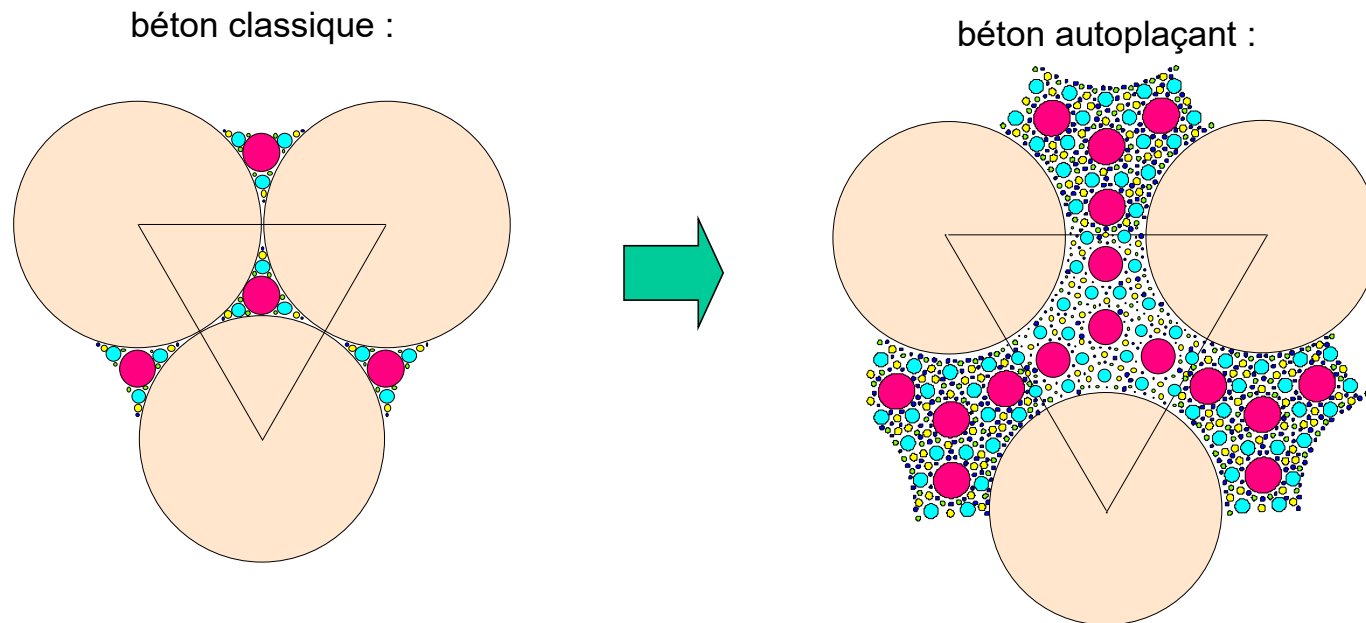
Technologie des matériaux :

- Augmentation du contenu en ciment et en additions minérales (p. ex. fillers calcaires, cendres volantes)
- Espacement des granulats
- Utilisation de super plastifiants
- Utilisation des viscosants pour éviter la ségrégation du mélange

7. BAP-Bétons autoplaçant

Augmenter la quantité de pâte avec l' **utilisation de fillers calcaire, cendres volantes, ...**

→ augmentation du film lubrifiant (réduction des frottements entre les granulats)

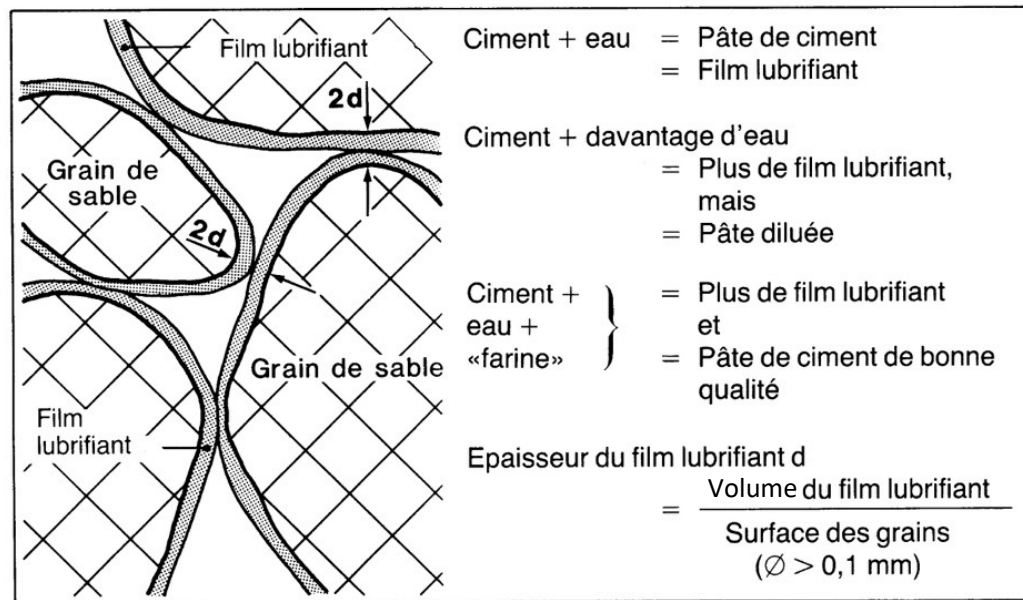


Figures: Vernet, MRS bulletin May 2004

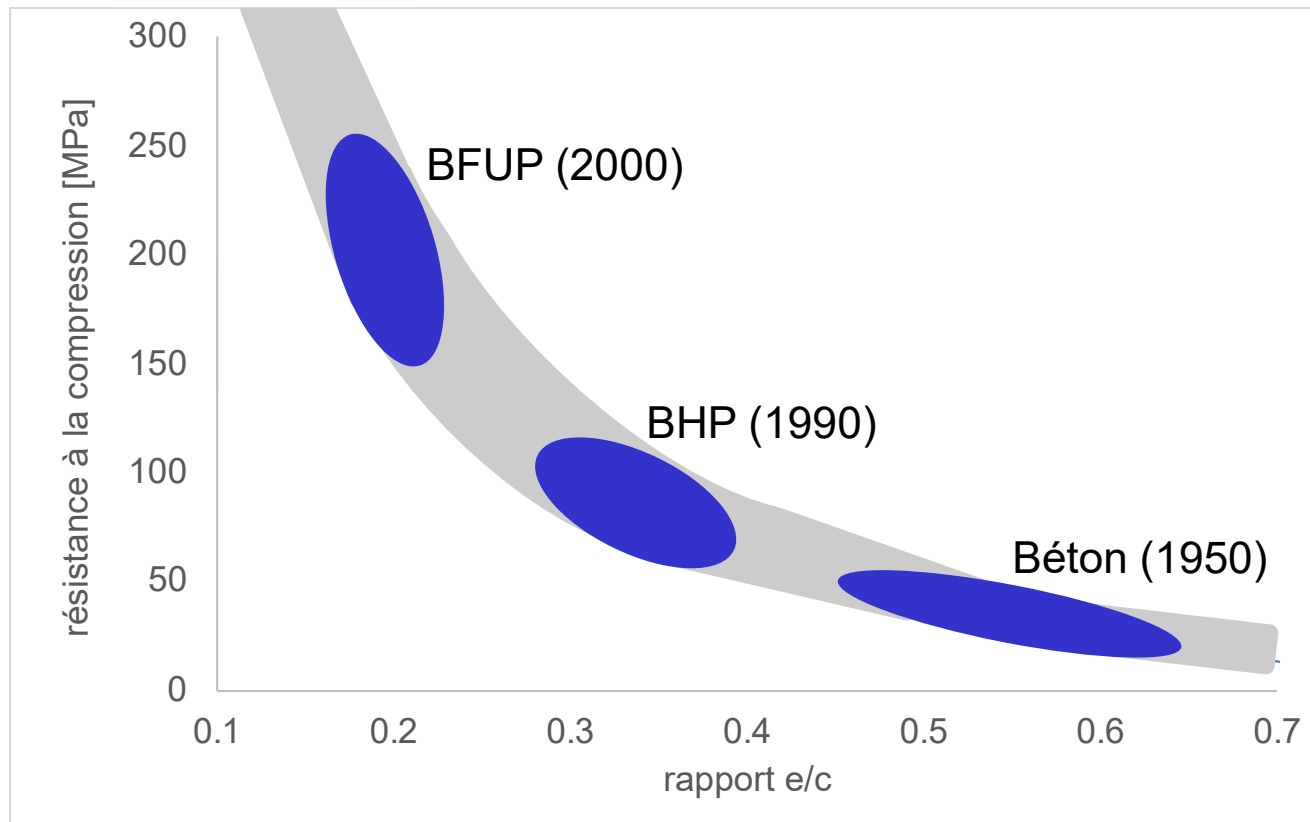
7. BAP-Bétons autoplaçant

Augmenter la quantité de pâte avec **Utilisation de fillers calcaire, cendres volantes, ...**

→ augmentation du film lubrifiant (réduction des frottements entre les granulats)



7. BHP/BFUP-Bétons à haute/ultra haute performance



7. BHP: Bétons à haute performance

Utilisation et avantages :

Gratte-ciel :

- Colonnes plus mince pour les étages bas – jusqu'à 30% d'espace en plus.
- Construction plus rapide (haute résistance au jeune âge)
- Réduction des coûts → moins d'acier, construction plus rapide.

Mais aussi :

- Résistance (à court et long terme)
- Durabilité
- Etanchéité

7. BHP: Bétons à haute performance

Les gratte-ciels

1966-67, Lake Point Tower, Chicago

52 MPa, 70 étages, un tous les 3 jours.

1976, Water Tower, Chicago

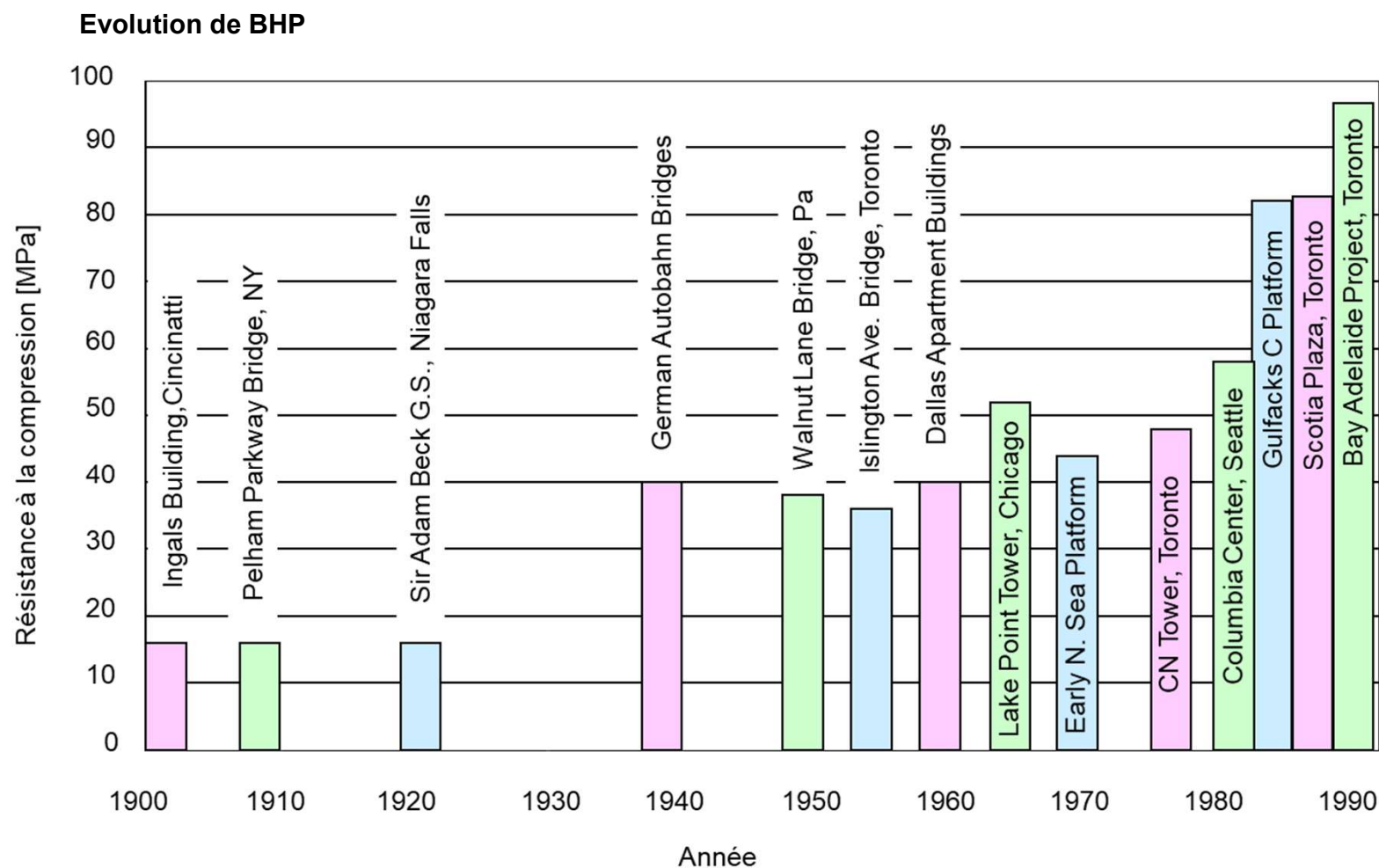
62 MPa, 76 étages,
à l'époque le plus haut bâtiment en béton renforcé

Two Union Square, Seattle

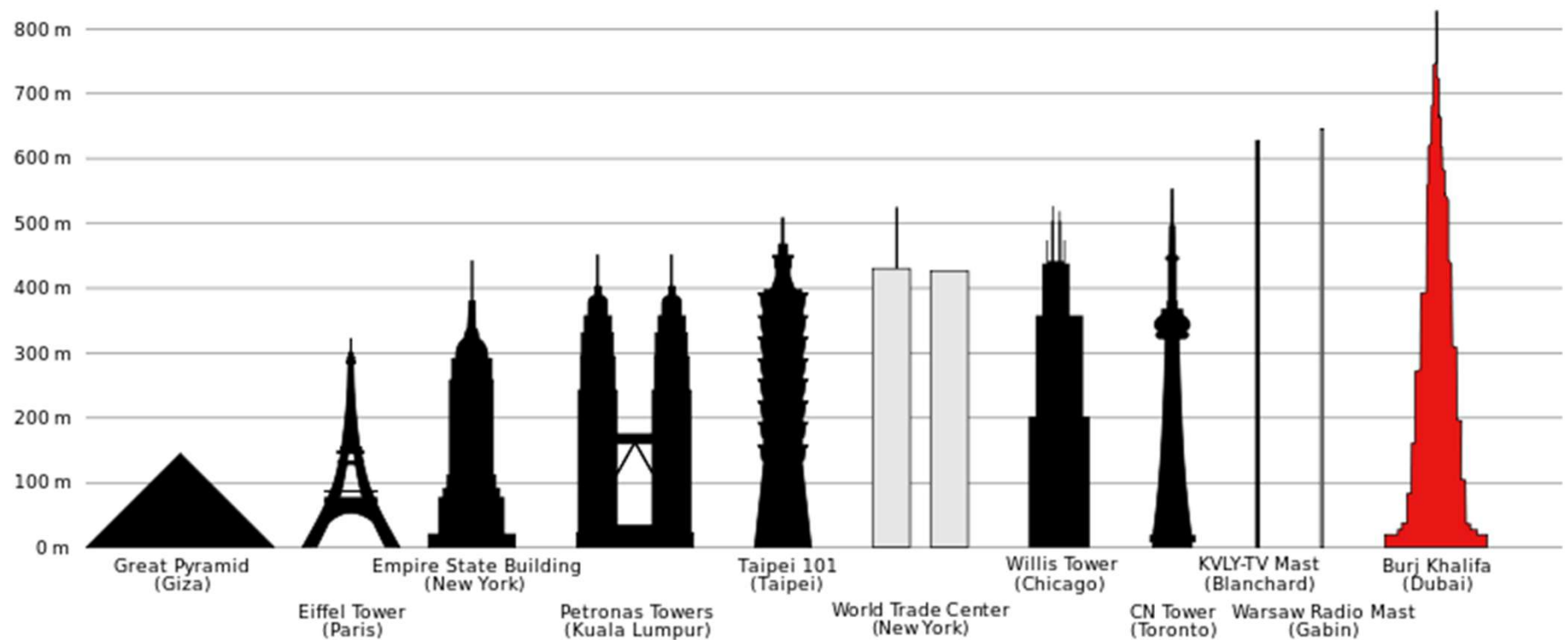
131 MPa la plus haute résistance pour des
applications commerciales



7. BHP: Bétons à haute performance



7. BHP: Bétons à haute performance



7. BHP: Bétons à haute performance

Technologie des matériaux :

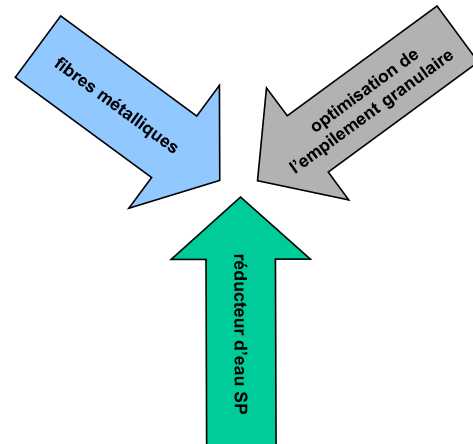
- **Augmenter la compacité de la pâte :**
 - Baisse du rapport e/c, augmentation de la teneur en fines
- **Augmenter la compacité du béton :**
 - Optimiser la granularité des granulats
- **Augmenter la résistance mécanique des granulat :**
 - Granulats haute résistance
- **Amélioration de l'ITZ** (zone de transition interfaciale)
 - Choix du granulat (surface rugueuse), utilisation de fumée de silice

7. BHP: Bétons à haute performance

Limitations

- Matériau fragile → rupture catastrophique
- Résistance au feu
- Formulation pointue
 - Qualification nécessaires pour la mise en œuvre et la mise en place
 - Sensibilité aux fluctuations de la température
 - Interactions du ciment avec les adjuvant
- Sensible au retrait et à la fissuration endogène (autodessication)

7. BFUP-Bétons à ultra haute performance



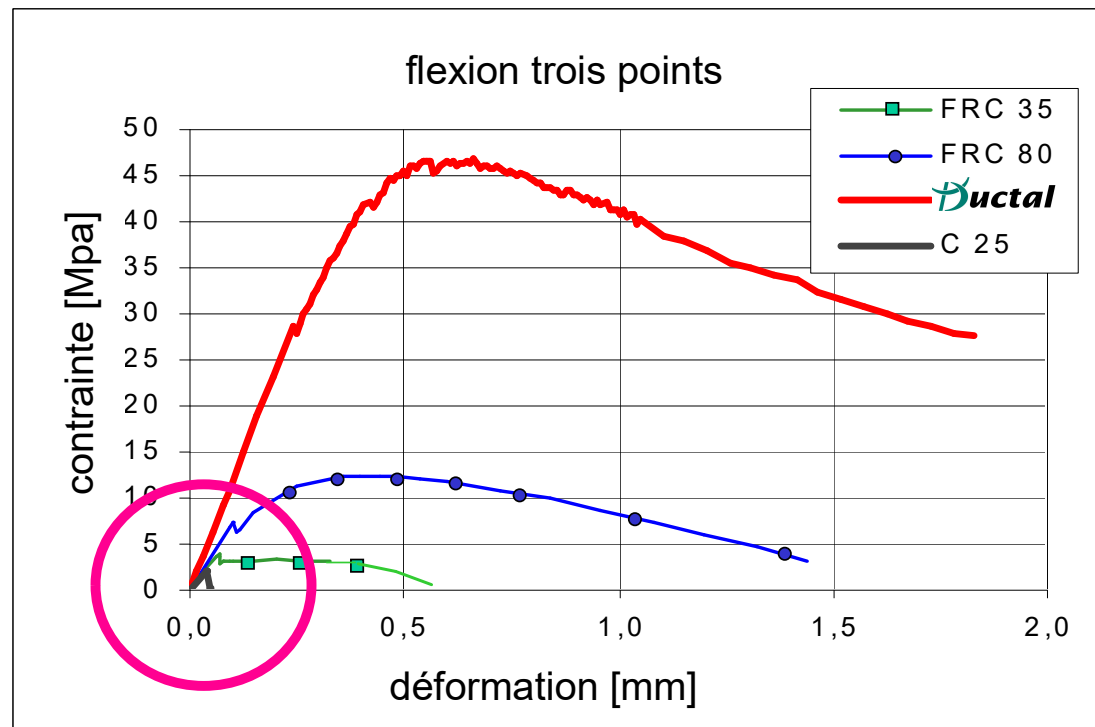
Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée à Marseille, façade et passerelle en BFUP. © Rudy Ricciotti



© Alain Herzog /EPFL

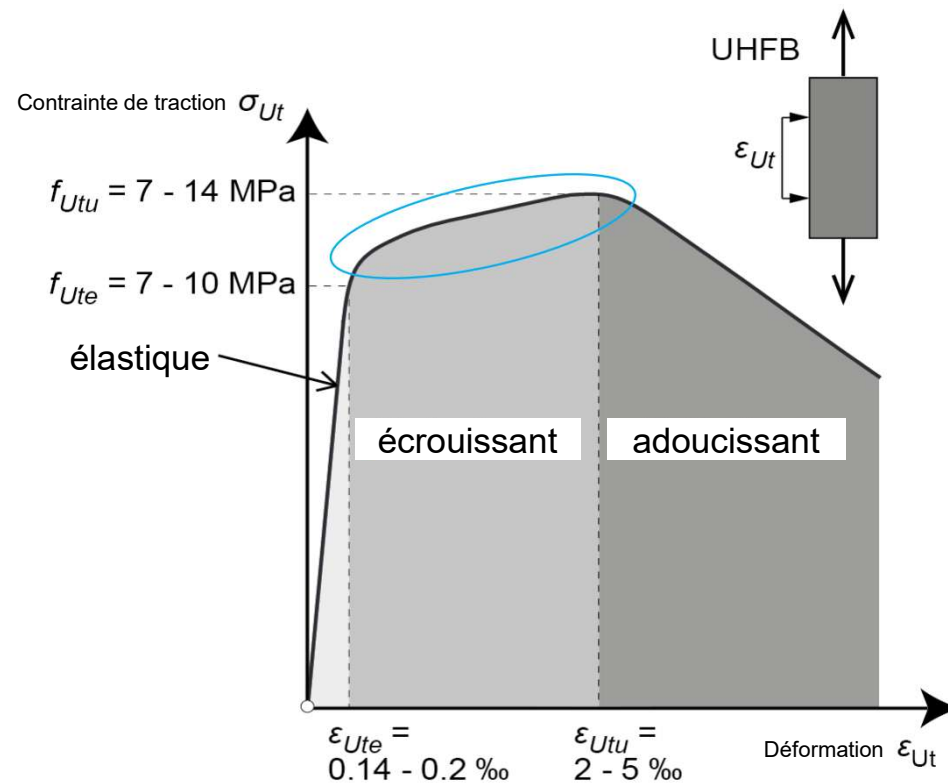
7. BFUP-Bétons à ultra haute performance

Résistance à la flexion :



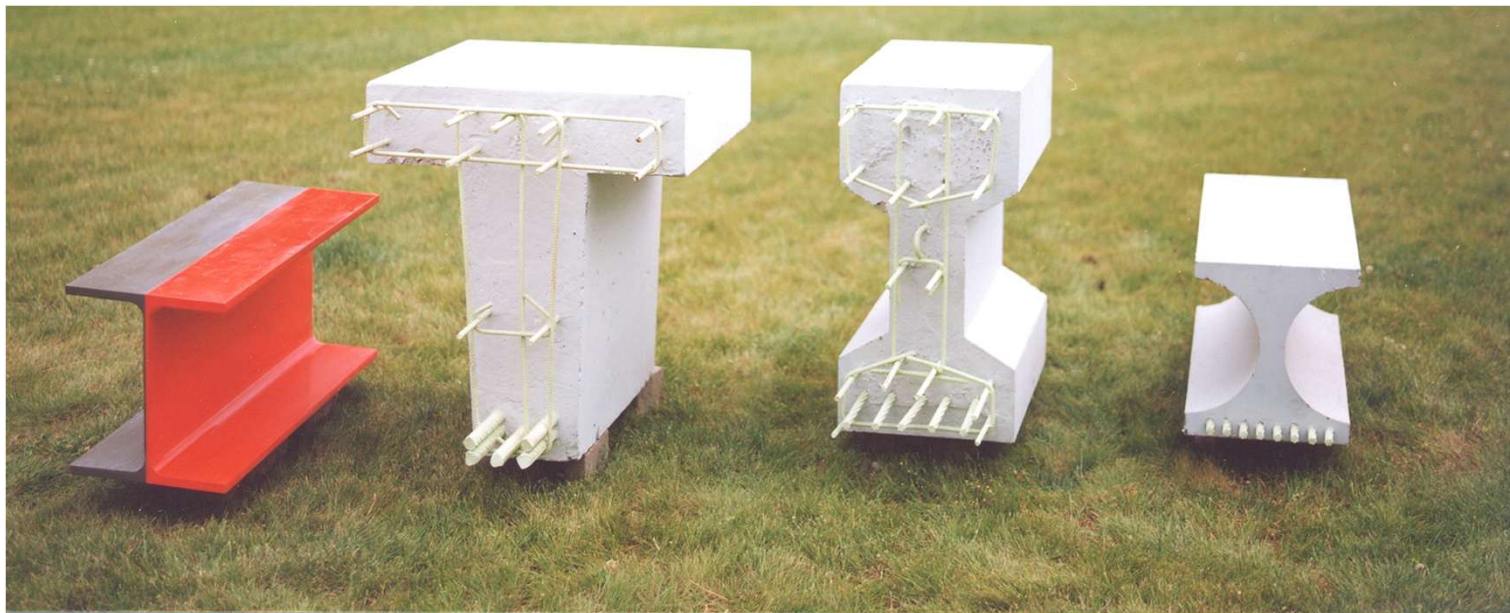
7. BFUP-Bétons à ultra haute performance

Résistance à la flexion (4 points) :



7. BFUP-Bétons à ultra haute performance

Poutres avec capacité porteuse équivalente



Poids [kg/ml]

ACIER

117

BÉTON ARMÉ

530

BÉTON
PRÉCONTRAIT

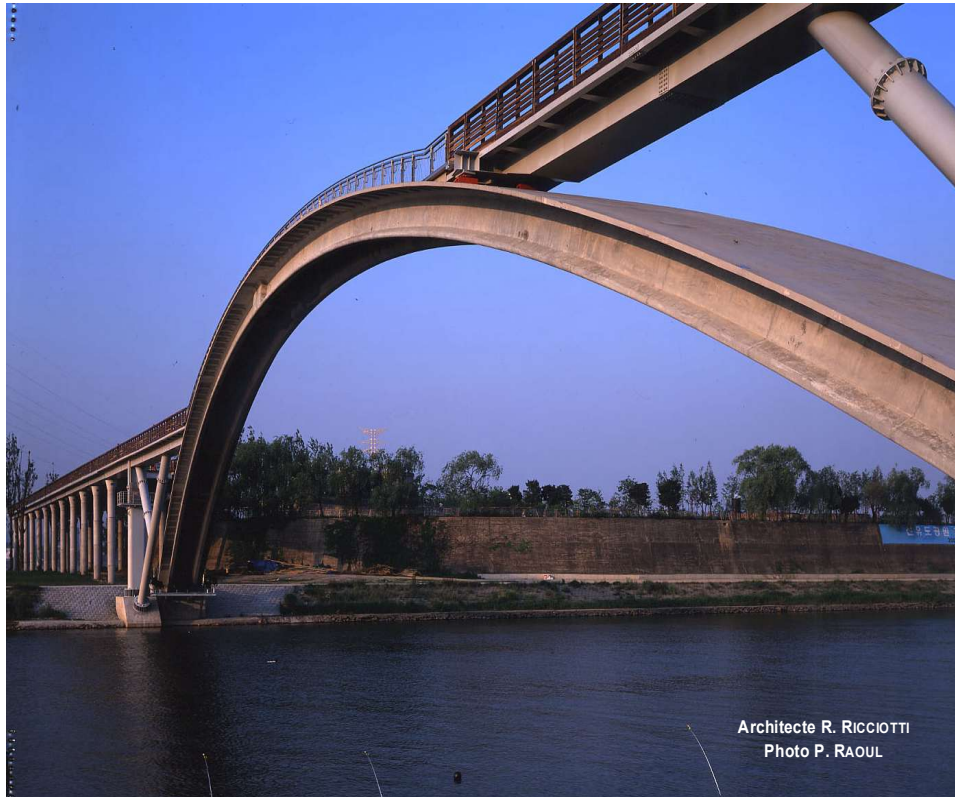
467

BFUP

140

7. BFUP-Bétons à ultra haute performance

Passerelle piétonne Seonyu, Séoul, Corée



Portée de l'arche : 120 m
Epaisseur de la dalle : 30 mm

7. BFUP-Bétons à ultra haute performance

Viaduc de Chillon – A9, remise en état du tablier : utilisation de BFUP



7. BFUP-Bétons à ultra haute performance

Viaduc de Chillon – A9, remise en état du tablier : utilisation de BFUP



Impression 3D du béton

- Possible grâce à une combinaison d'adjuvants
 - Pas de slump
 - Viscosité contrôlée
 - Vitesse de prise



- Produits et applications de niche pour le moment

Avantages	Inconvénients
Main d'oeuvre réduite	Main d'oeuvre très spécialisée
Peu de pertes de matière	Prix élevé (appareils, adjuvants)
Géométries optimisées	Difficulté à intégrer les armatures
	Mortier plutôt que béton

8. L'essentiel

- Quels sont les principaux types d'adjuvants?
- Quels sont leurs fonctions, expliquer les mécanismes?
- Comment la technologie des matériaux permet-elle de réaliser des bétons BAP?
- Quels sont les principaux avantages des BAP?
- Comment la technologie des matériaux permet-elle de réaliser des bétons BHP et BFUP?
- Quels sont les principaux avantages des BHP et BFUP?