

Matériaux de Construction

Prof. Karen Scrivener

Laboratoire de Matériaux de Construction

Departement des Matériaux

Professeure Karen SCRIVENER

- **Anglaise**
- **Science des Matériaux**
- **Thèse - microstructure du ciment**
- **Enseignante - chercheuse, Imperial College, Londres**
- **1995 Lafarge, Lab. Centrale de Recherche plus grand groupe des Matériaux de Construction**
- **Mars 2001 EPFL**

Aujourd'hui

- **Objectives du cours**
- **orientation du sujet**
- **plan et planning des cours**
- **PAUSE**
- **Rappel sur le comportement mécanique des matériaux**

Objectives du cours

- **Comprendre la fonction des matériaux dans la construction;**
- **comprendre les propriétés et sollicitations qui orientent le choix des matériaux de construction**
- **comprendre les bases de la chimie, de la physique et de la microstructure qui sont responsables de leur comportement**
- **sensibilisation aux questions environnementales**

Objectives du cours, suite

Pour les bétons:

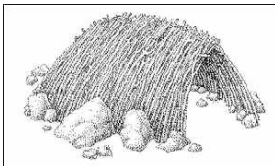
- connaître les bases de leur « technologie » pour sa bonne utilisation;
- Les aspects de leurs comportements mécaniques liés au matériaux
- sensibilisation à la durabilité:
 - choix pour la meilleure économie sur tout le cycle de vie
 - diagnostics des pathologies éventuelles

Orientations du cours

- perspectives historiques
- gamme de construction
- perspectives économiques
- science des matériaux
- classifications des matériaux
- coûts, quantité utilisée des matériaux
- fonctions des matériaux de construction

Perspectives historiques

se loger/abriter - un des besoins fondamentaux des êtres humaines



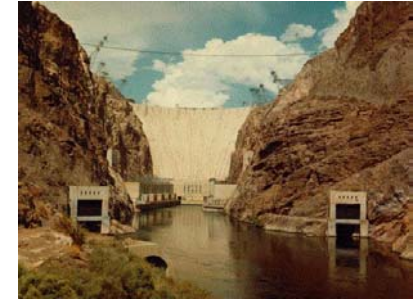
<u>Matériaux</u>	<i>1ere usage</i>	<i>T prod.</i>
brique en boue et argile	8000 av. JC	
obj. en céramique, briques et terre cuite	6000 av. J.C.	
mortier pour les joints de briques en bitume	5000 av. J.C.	
murs en briques couverts d'un enduit de gypse	5000 av. J.C.	180°C
encadrements des portes en bois, poutre en bois	5000 av. J.C.	
agréats et fibres pour l'armature	5000 av. J.C.	
travaux en cuivre et bronze	4000 av. J.C.	
objets en verre	3000 av. J.C.	
mortier de chaux et chaux hydraulique	1000 av. J.C.	800 – 1000°C
béton à base de chaux hydraulique, ciments pouzzolaniques	100 av. J.C.	1100°C

<u>Matériaux</u>	1ere usage	T prod.
Ironbridge, UK	1779	
ciment hydraulique, Edison lighthouse	1793	1300°C
béton à base de ciment Portland (Joseph Aspdin)	1824	1450°C
Béton armé (Monier)	1848	
Tour Eiffel	1889	
First reinforced concrete bridge	1889	
ciment alumineux	1914	1600°C
béton précontraint	1929	
béton haute performance	1980s.	
béton ultra haute performance	2000	

Gamme de construction



« Ironbridge »,
premier pont en fer, 1779

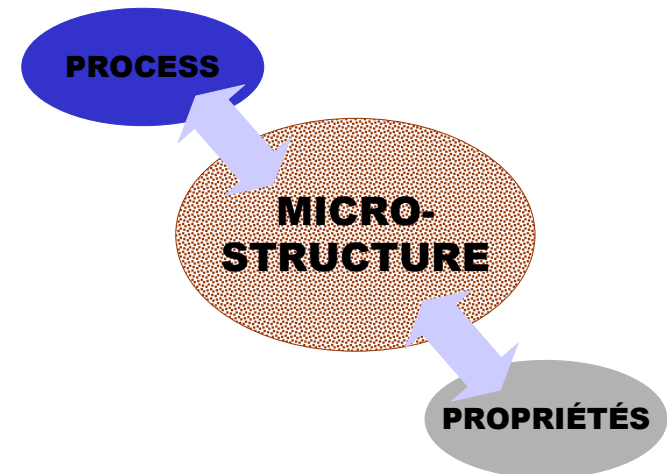


Hoover Dam
premier barrage en béton, 1936

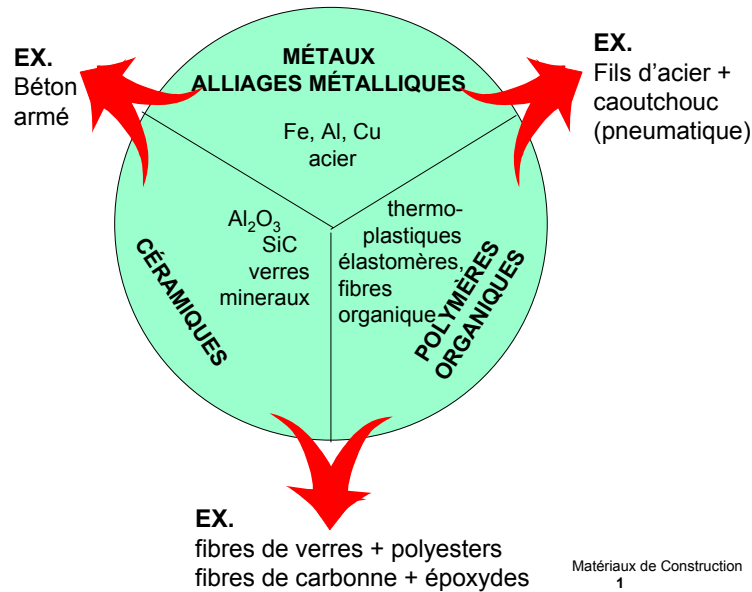
Perspectives économique

- En Europe l'industrie de la construction est:
- 800 billion Euro / an
- 11% PIB (GDP)
- 30 million employés
- 20% de workforce

Science des Matériaux



Classification des Matériaux



Classification des matériaux basés sur la nature des liaisons et la structure atomique :

1. Métaux et leurs alliages

- Les métaux les plus utilisés: Fe, Al, Cu
- alliages : la combinaison de deux ou plusieurs métaux , peuvent contenir des éléments non métalliques

Liaison Métallique >

- état cristallin, opaques, brillants, lourds, durs, rigides, déformables plastiquement
- bonnes conductivité thermique et électrique

Matériaux de Construction
1

2. Ceramiques

- Matériaux inorganiques, en général combinaison des éléments métalliques (Mg, Al, Fe) et non métalliques (oxygène)
- Liaisons covalentes, ionocovalentes et ioniques
- Résistance mécanique et thermiques élevées isolants électriques et
- Durs et fragiles

Matériaux de Construction
1

3. Polymères organiques

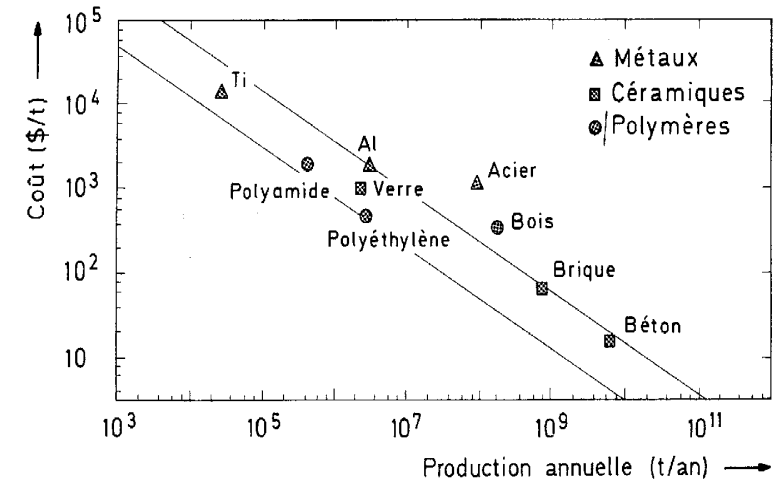
- origine naturelle ou synthétique
- molécules formées de longues chaînes d'atomes de carbone sur lesquelles sont fixées des éléments comme l'hydrogène et le chlore, ou des groupements d'atomes comme le radical méthyle ($-CH_3$). D'autres éléments comme le soufre, l'azote, le silicium etc. peuvent intervenir.
- liaisons secondaires et liaisons covalentes
- isolants électriques et thermiques
- mous et légers
- ne supportent pas des températures supérieures à $\sim 200^\circ C$
- faciles à mettre en œuvre

Matériaux de Construction
1

4. Composites

- Combinaisons des matériaux
- ...

Coût / consommation des matériaux



Source: INTRODUCTION à LA SCIENCE DES MATÉRIAUX, Mercier, Zambelli, Kurz

Utilisation des matériaux

Choix du matériau le plus adapté aux applications envisagées.

Les critères de choix des matériaux doivent tenir compte des facteurs suivants :

- **fonctions principales de la construction** : modes de mise en charge, des températures et des conditions générales d'utilisation.
- **comportements intrinsèques du matériau** : résistance à la rupture, à l'usure, à la corrosion, conductibilité, etc.
- **prix du revient** des diverses solutions possibles

Fonctions Mat. de Construct.

Mécanique:

- **stabilité pour ne pas s'effondrer**
 - rigidité (stiffness)
 - résistance en compression (compressive strength)
 - résistance en tension (tensile strength)
- **durabilité**
 - fluage (creep)
 - relaxation (relaxation)

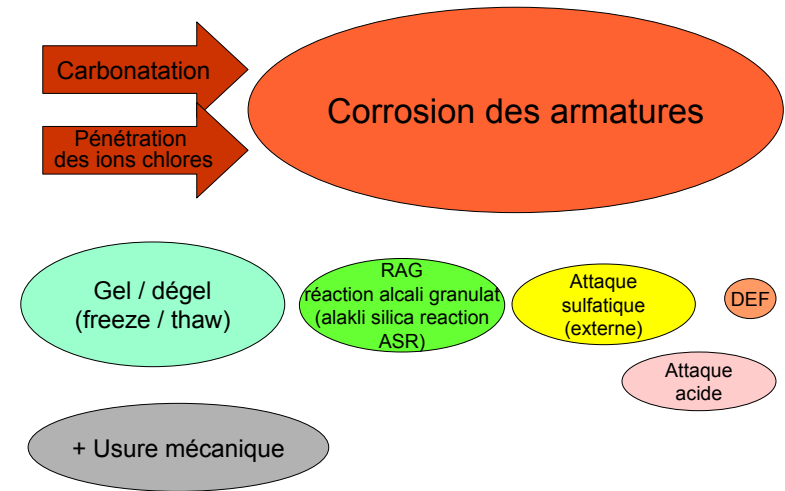
Fonctions Mat. de Construct.(2)

Echanges avec l'extérieur:

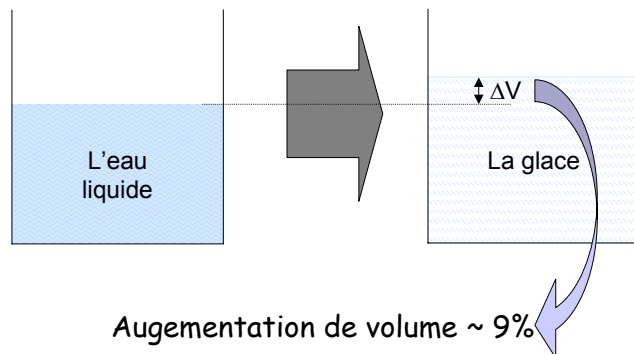
- **éviter la pénétration de pluie, de neige, de vent**
 - étanchéité (watertight)
 - ventilation contrôlée
- **thermiques**
 - l'isolation thermiques
- **phonique**
- **optiques**

Durabilité

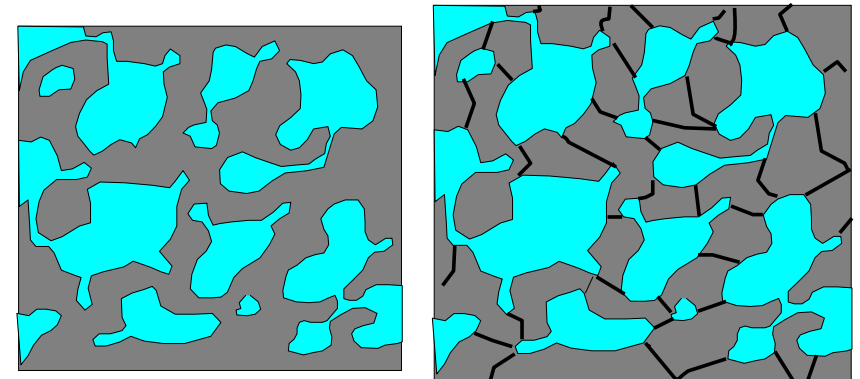
Causes de dégradation des bétons



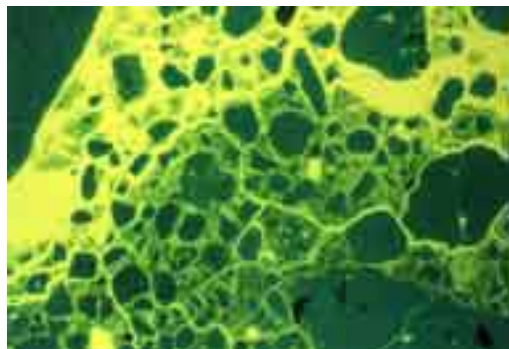
Gel Degel



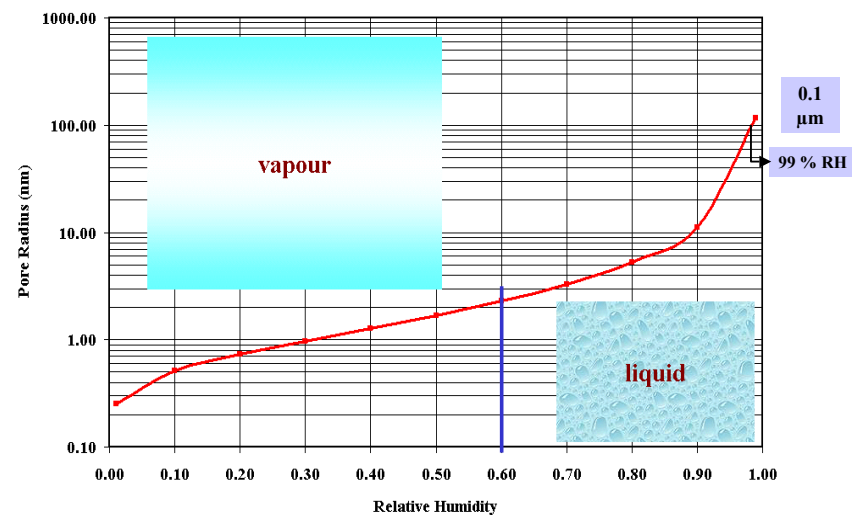
Pâte avec les pores saturée



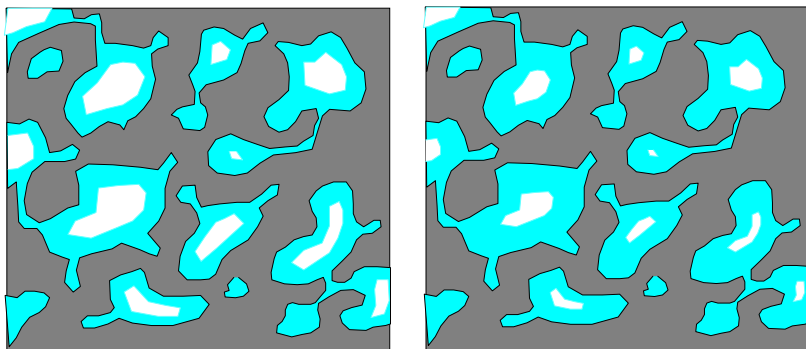
Gel = Rupture du pâte



Loi Kelvin-Laplace



Pâte avec les pores
partiellement saturée



Gel = pas de endommagement

Pour les dalles,

l'eau sur la surface peut saturer la couche près de surface



→ l'ecailage

Pour éviter l'endommagement

Introduction de vides d'air - ~ 6 - 8 %

Par utilisation des entraineurs d'air, adjuvants liquide

Taille ~50 µm (difficile à saturée)

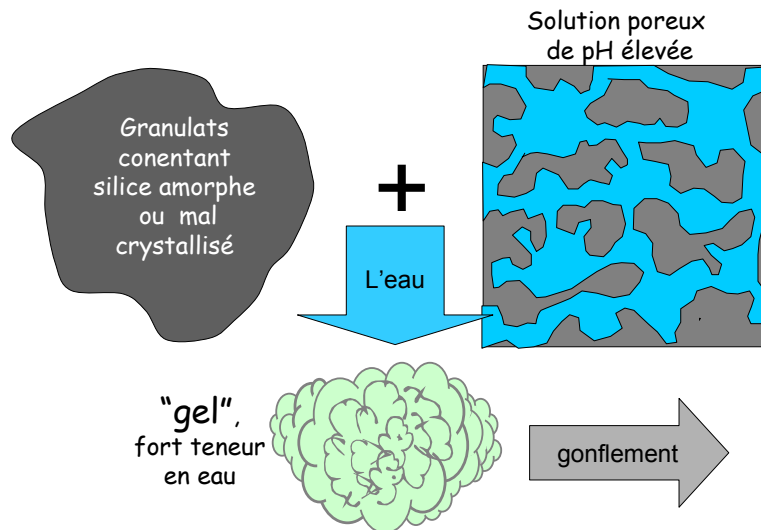
L'eau dans les pores du pâte peut « échapper »
dans ces vides, s'il y a un gel

Espacement des vides <0.2 mm

Réaction alcali granulat RAG

Alkali aggregate reaction AAR

Alkali silica reaction ASR

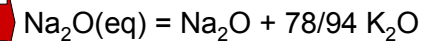


Caractérisation du ciment

Analyse oxyde (XRF)

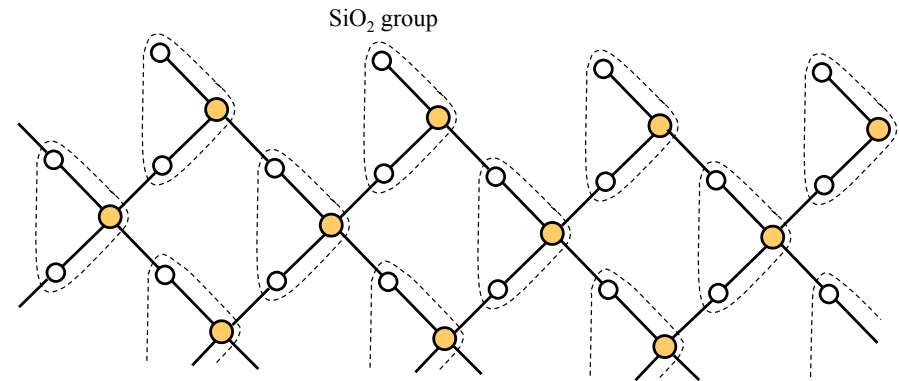
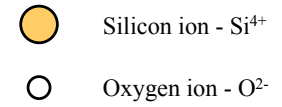
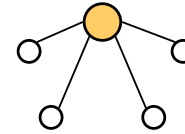
SiO ₂	20,5	(19 – 21)
Al ₂ O ₃	6	(4-7)
Fe ₂ O ₃	2,5	(2-3)
CaO	64	(62-65)
MgO	1,2	(1-4)
SO ₃	2,8	(2,5-3,2)
K ₂ O	0,5	(0,3-1)
Na ₂ O	0,2	(0,2-0,5)
PaF(LO	1	(1-2)
CaO libre	1	(0,5-1,5)
resid	0,3	(0,2-0,4)

insol
+Mn₂O₃, TiO₂, P₂O₅, CO₂

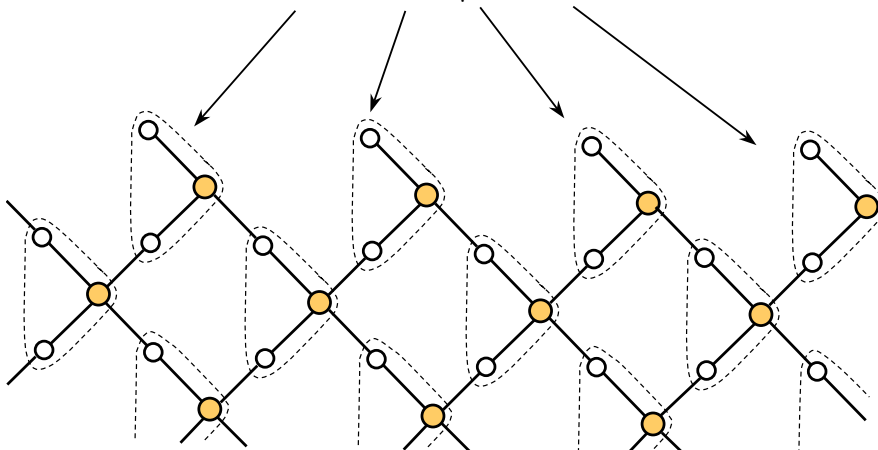


Le reaction entre silice et alcali

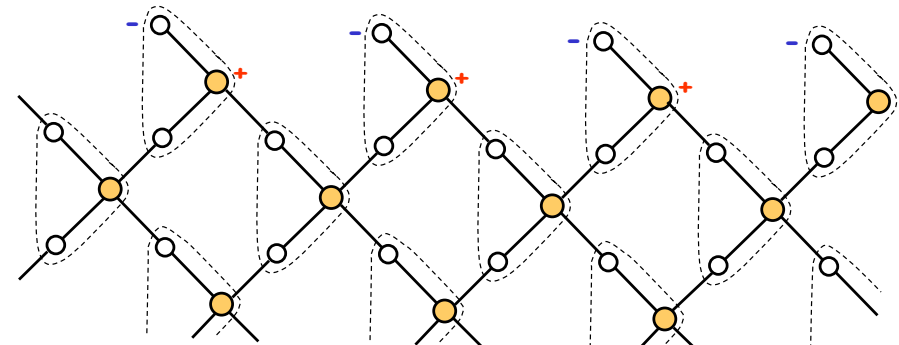
Structure du silice en tetrahedre



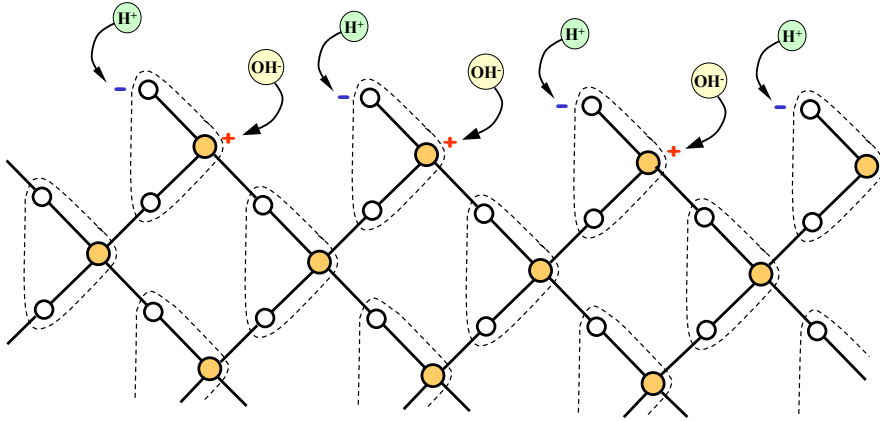
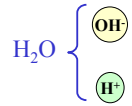
Tetrahedre incomplete au surface



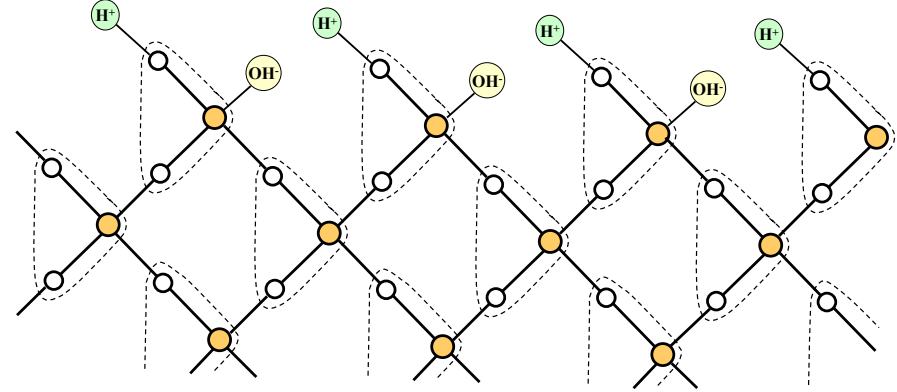
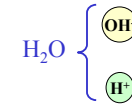
Ces tetrahedre incomplete donne un charge au surface



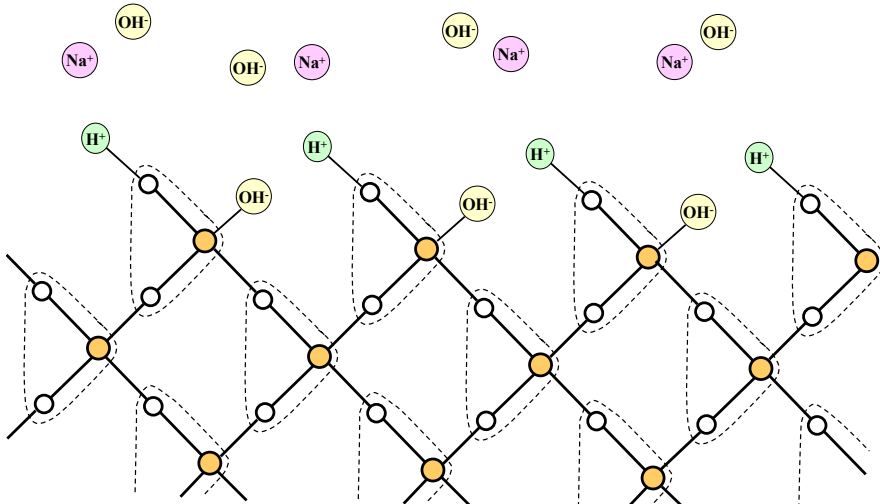
En presence d'eau, le charge du surface
est neutralisé par absorption des ions de H^+ et OH^-



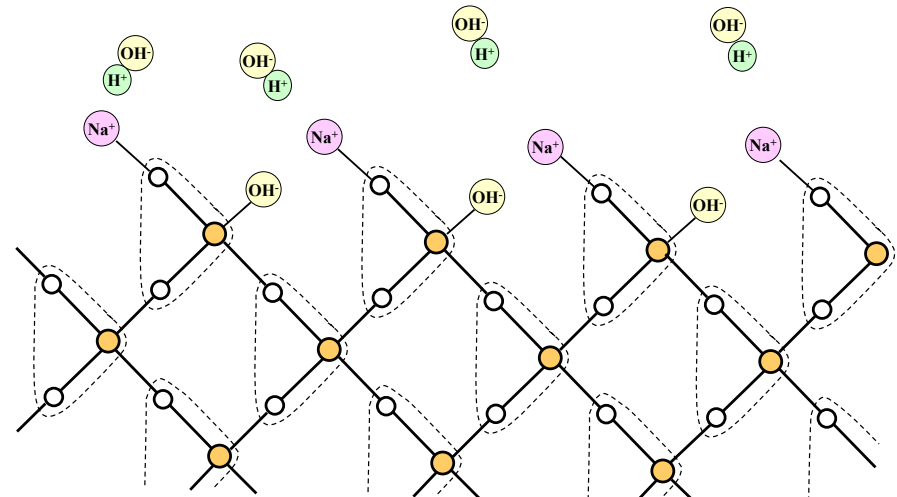
Le surface devien legerement acide

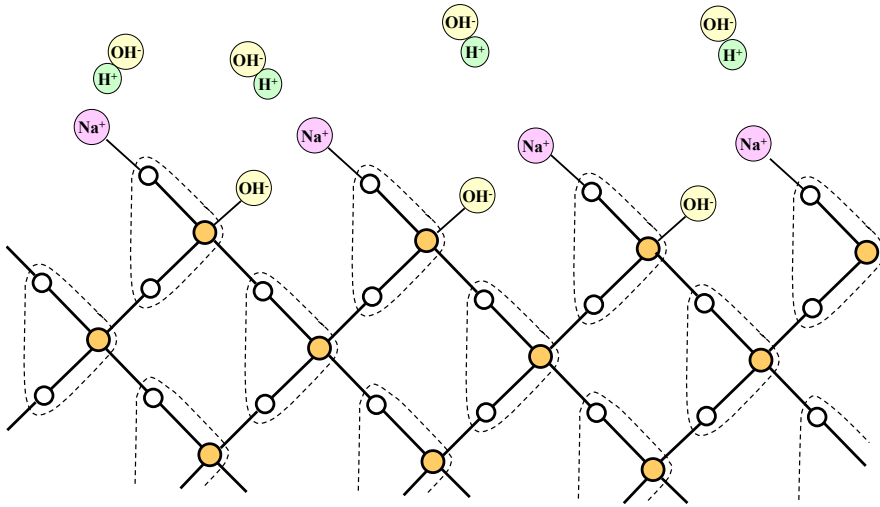
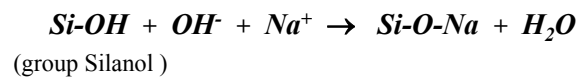


Dans les solutions alcalins (ex. NaOH)

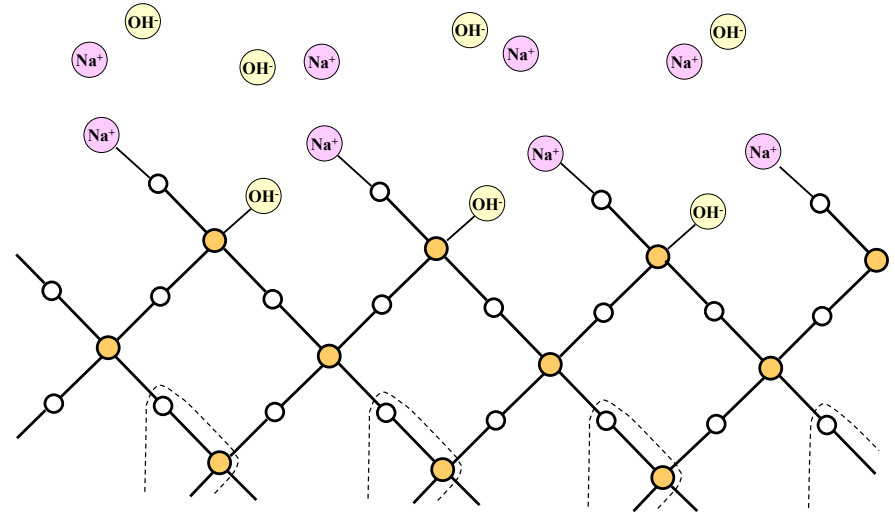


Les ion d'hydrogen sont remplacer par les ions alcali

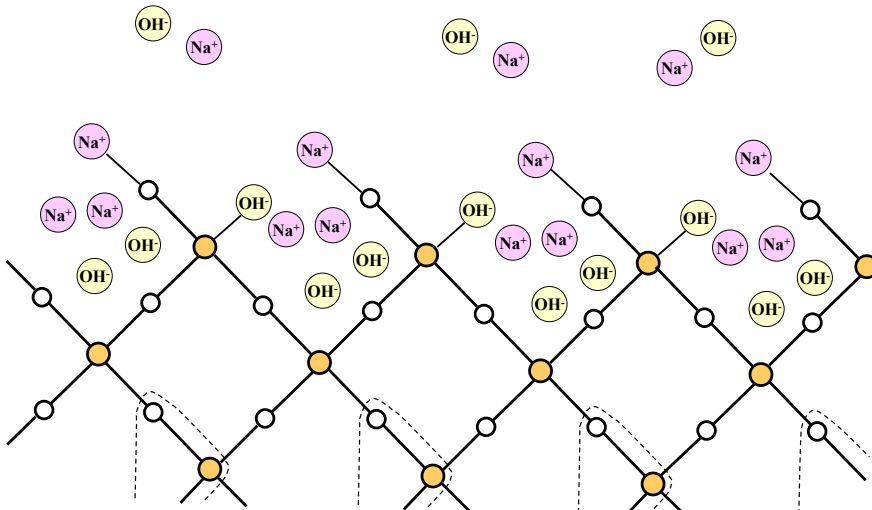




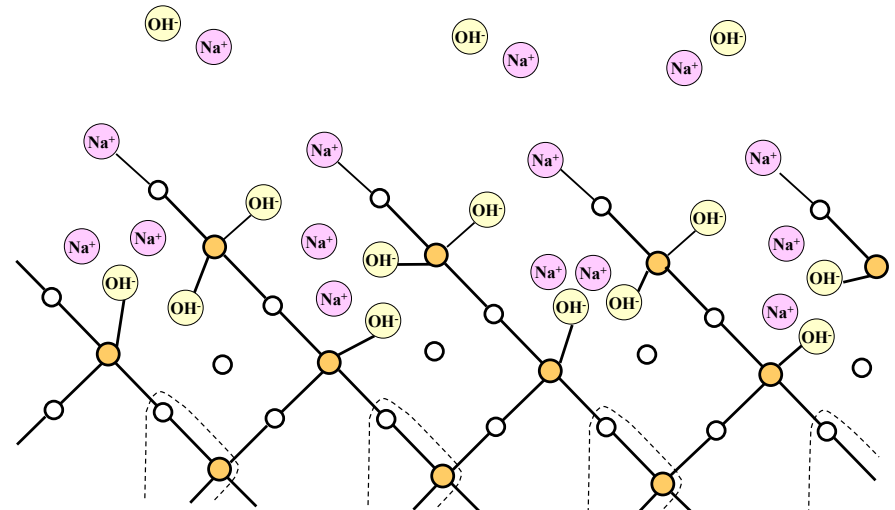
S'il reste d'alcali après cette neutralisation

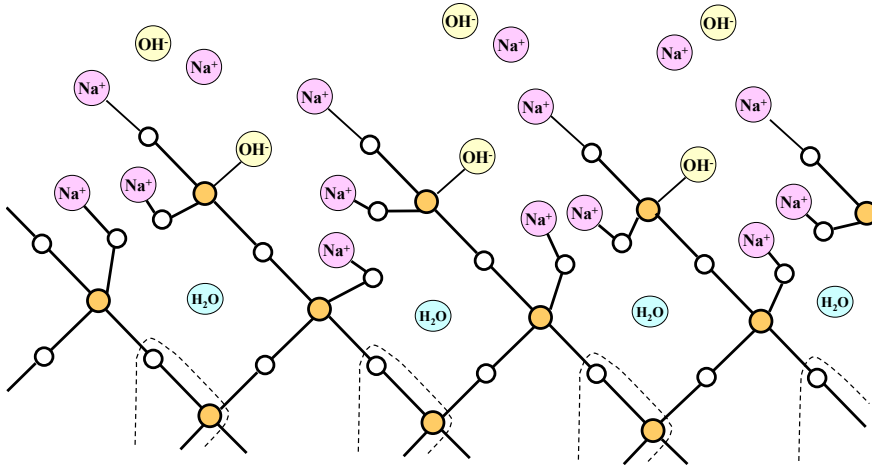
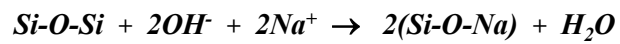


S'il reste d'alcali après cette neutralisation

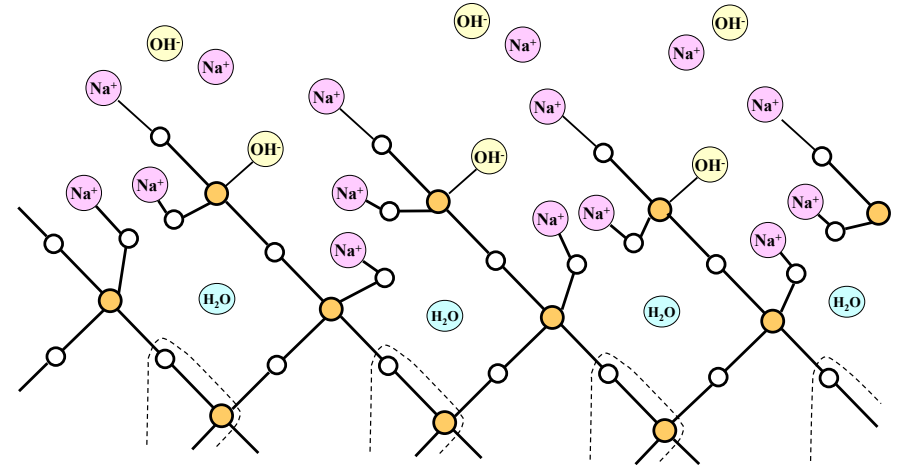


Les ions d'hydroxide attaque les liaisons siloxane (Si-O-Si)

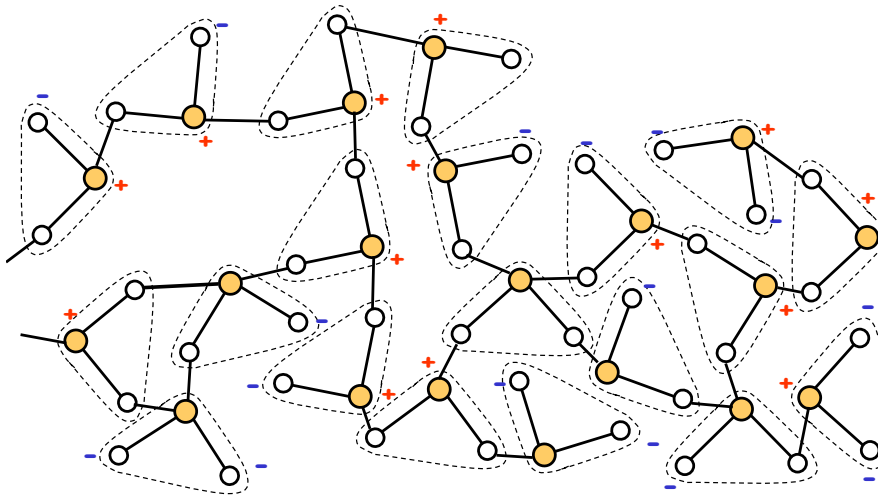




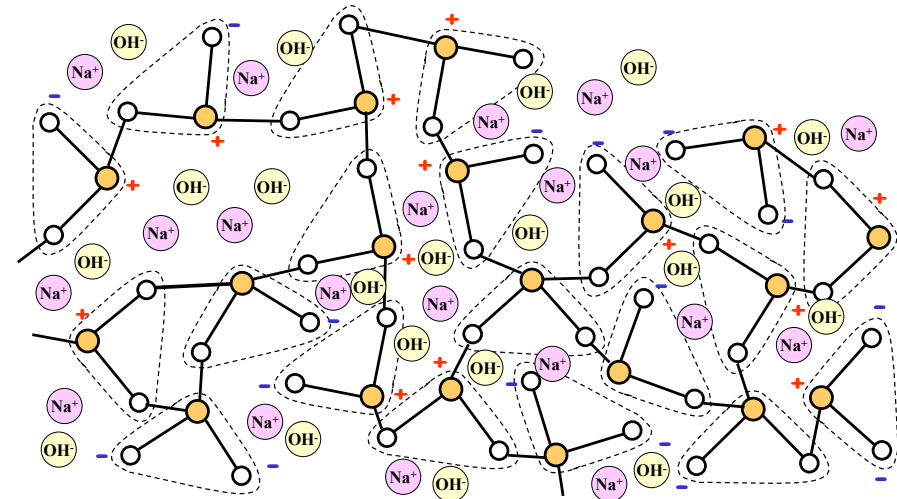
Avec les silices bien cristalline (ex. Quartz) le réaction est limité au surface



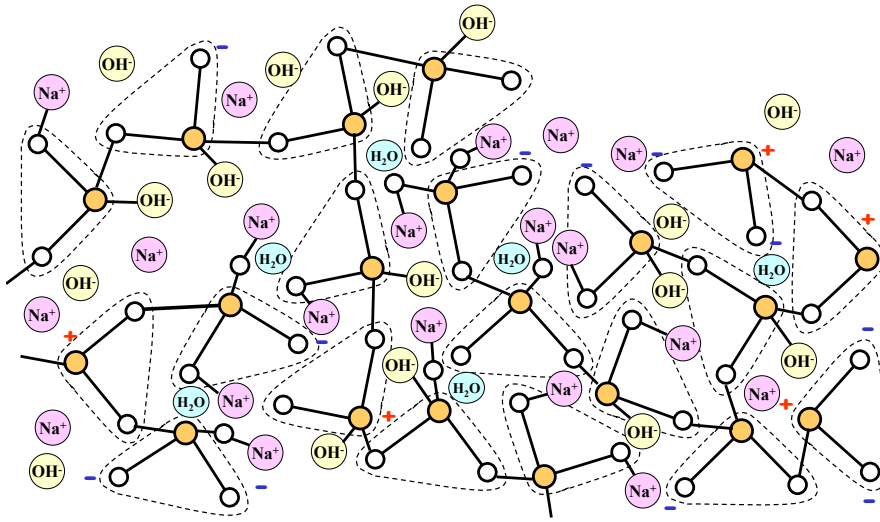
Avec silice mal cristallisée ou amorphe, l'hydroxide d'alcali pénètre plus profondément



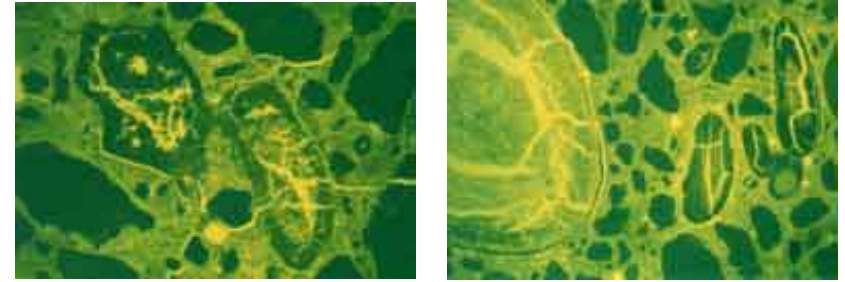
Le taux de dissolution dépend de la degré d'organisation de la silice



Le « gel » formé, absorbe de l'eau et augmente en volume



Manifestation microscopique:



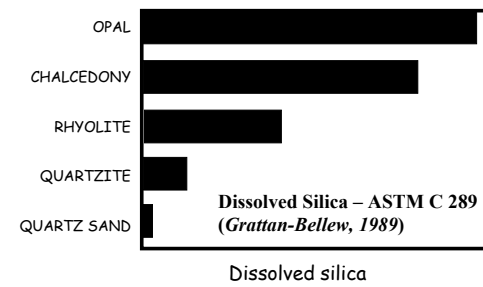
Manifestation macroscopique:



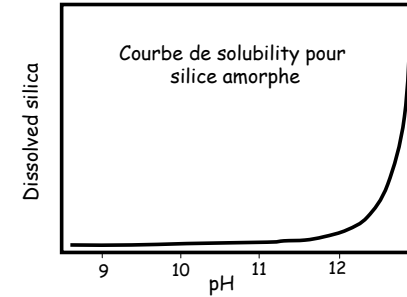
Distribution des Fissures – “Map Cracking”



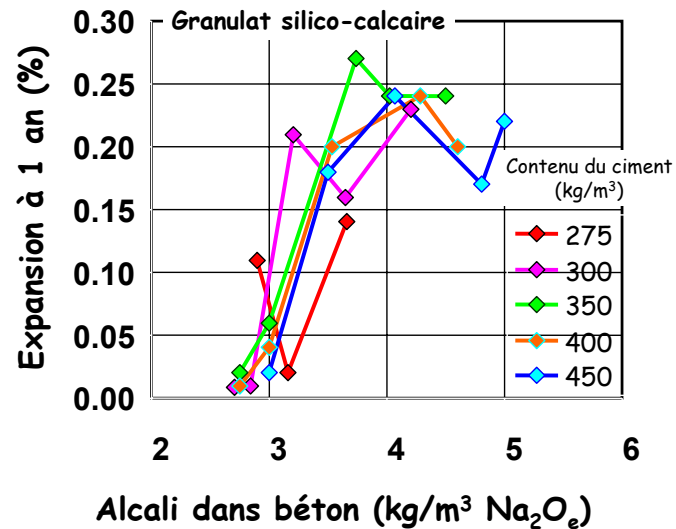
Misalignment (Distorsion)



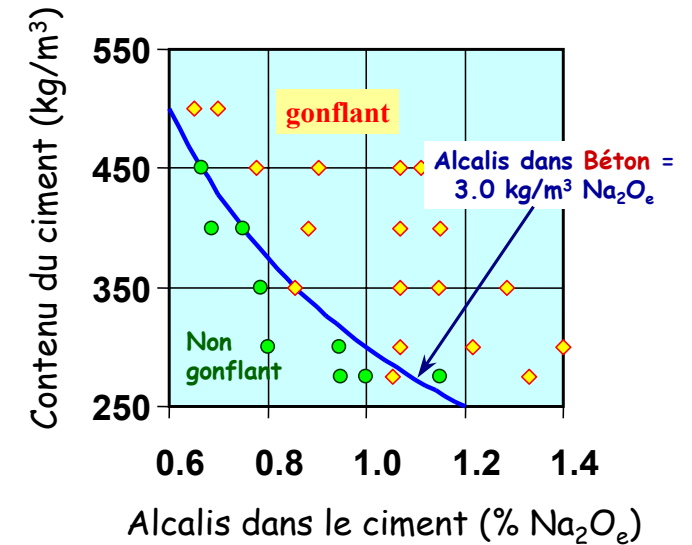
Le solubilité dépend du structure minerale et pH



Effet des alcali du béton sur expansion



Effet des alcalis du ciment sur expansion

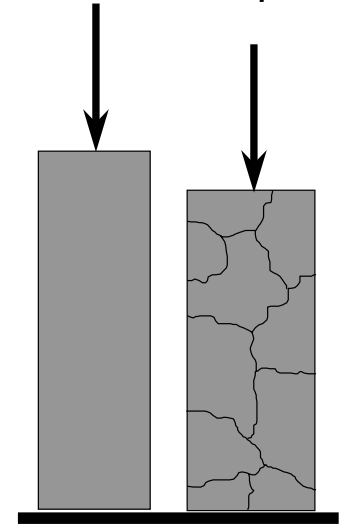


Effet de ASR sur propriétés mecanique

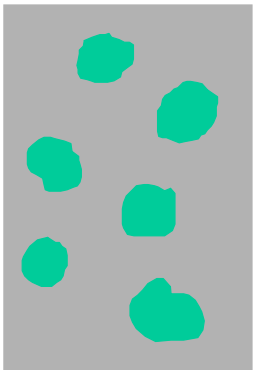
Seuil pour ASR $\sim 3\text{kg/m}^3 \text{Na}_2\text{O}_e$

Ciment basse teneur en alcali,
 $\text{Na}_2\text{O}_e < \sim 0.7 \%$

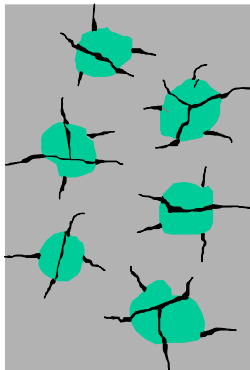
- Reducion de résistance en compression
- Baisse de module (d'Young)
- augmentation de fluage



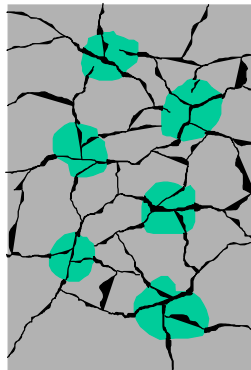
Developement de fissuration



Pas endommagé

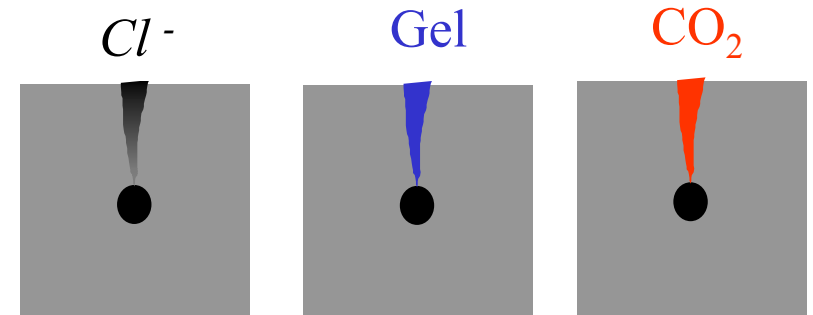


*Expansion faible
(0.04 - 0.06%)*



*forte expansion
($> 0.10\%$)*

Le fissuration peut augmenter les autres formes de dégradations



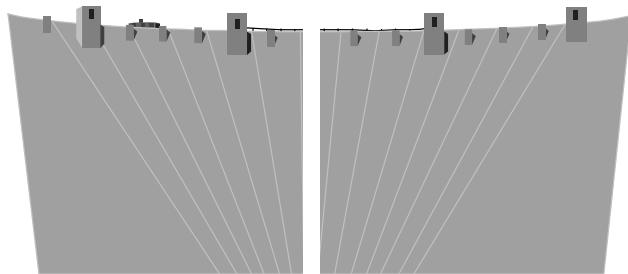
Methodes de prevention

- Evite les granulats reactifs
- Utilise le ciment basse teneur en alkali
- Utilise ciment avec cendre volant (à voir prochainement)

Mais des fois le reaction manifest
seulement après 30 / 40 ans

- Cosmetique ou structurelle?
- Remplace ou reparer?
- Des fois des mesures drastiques sont
nécessaire

Slot Cutting



Diamond
wire cutting



Provides
stress relief

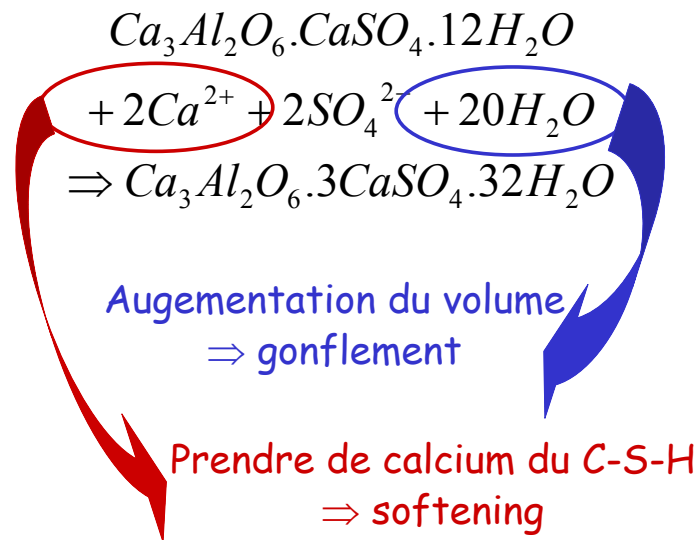
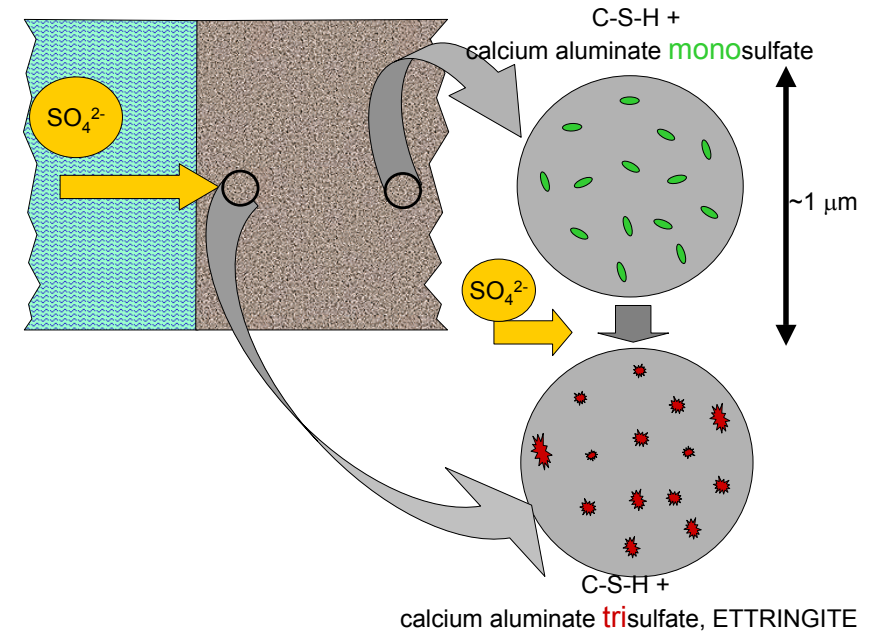


Slot Cutting at Mactaquac G.S.
New Brunswick



Attaque sulfatique

+ eau de mer



Necessaire d'avoir une dispersion fine de monosulfate dans le C-S-H

generation de pression de cristallisation

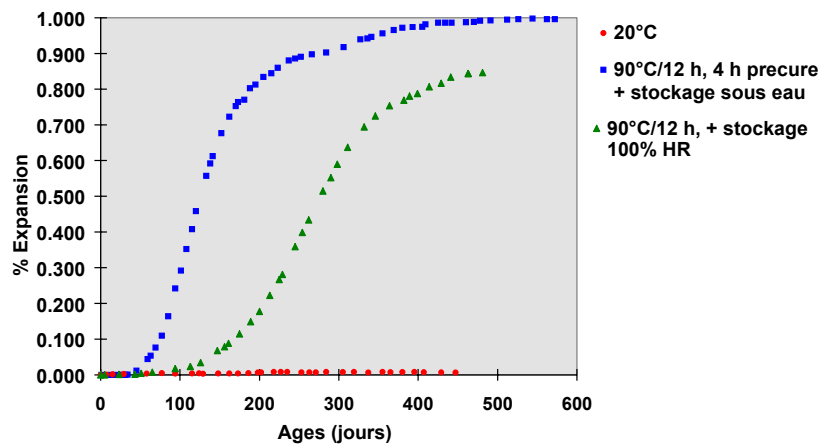
Comment éviter

- Moins de monosulfate pour transformer
- Ciment avec basse teneur en C_3A

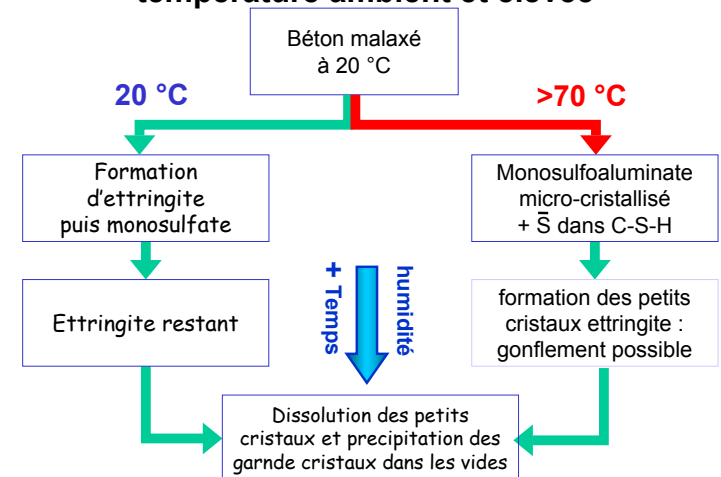
Gonflement après cure aux températures élevées

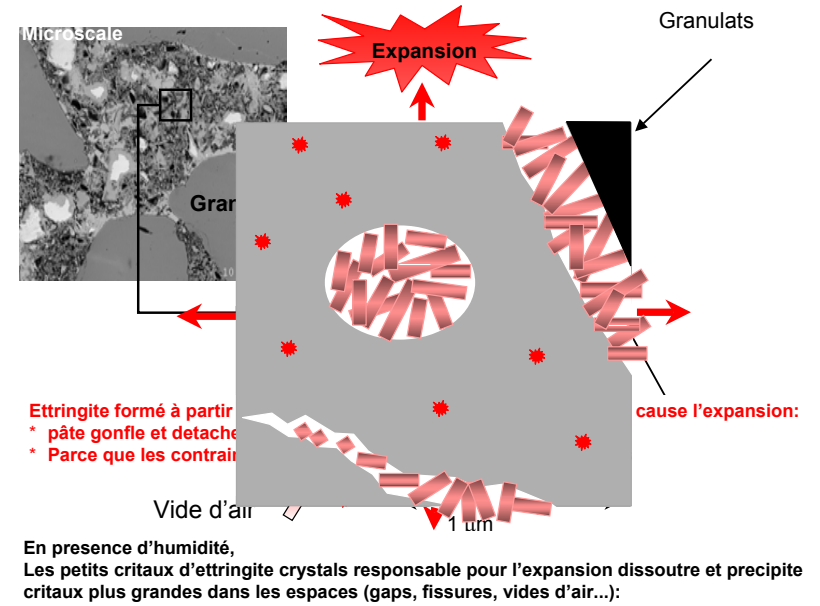
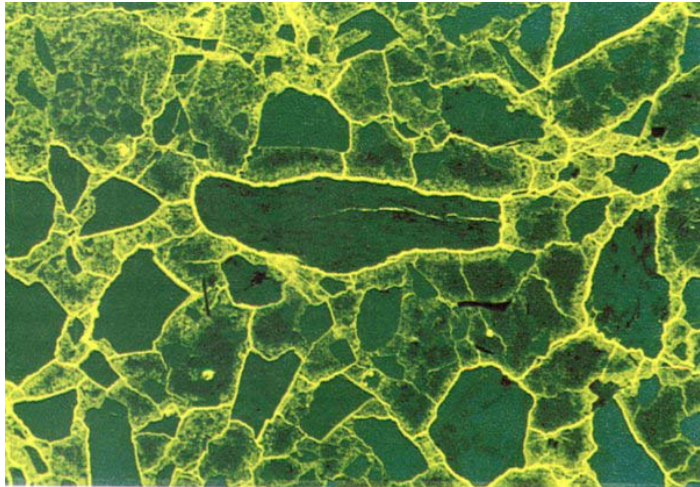
Formation d'ettringite retardée- DEF

Influence de température de cure

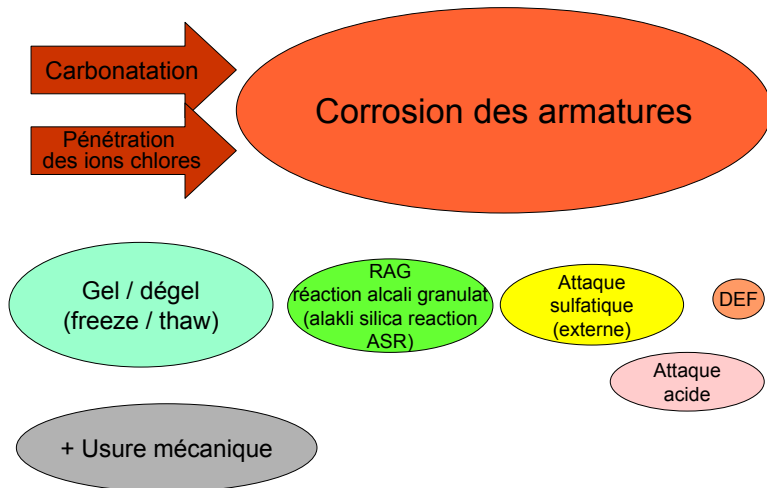


Comparison entre cure à température ambiante et élevée





Causes de dégradation des bétons



Les processus de penetration des ions

Processus de transport

- Béton saturé, pas de difference de pression:
 - Diffusion
- Saturé difference de pression
 - Convection, flux de liquid
- Non saturé
 - Absorption
- Un face saturé, un face sec
 - “wick action”

Permeabilité

Loi de Darcy

$$\frac{dq}{dt} = K_p \cdot \frac{\Delta h}{x} \cdot A$$

Diagram illustrating Darcy's Law with callouts:

- $\frac{dq}{dt}$: Flux
- K_p : Coefficient de permeabilité
- $\frac{\Delta h}{x}$: Gradient de pression
- A : aire

Diffusion

Loi de Fick

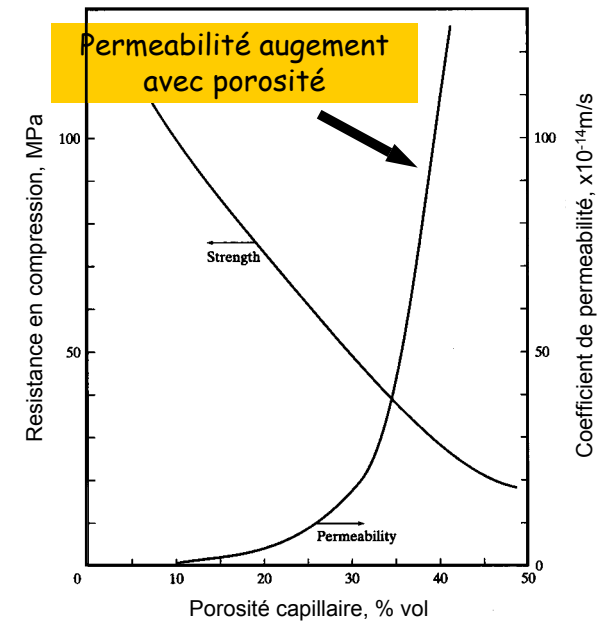
$$\frac{dc}{dt} = -D \cdot \frac{dc}{dx}$$

Diagram illustrating Fick's Law with callouts:

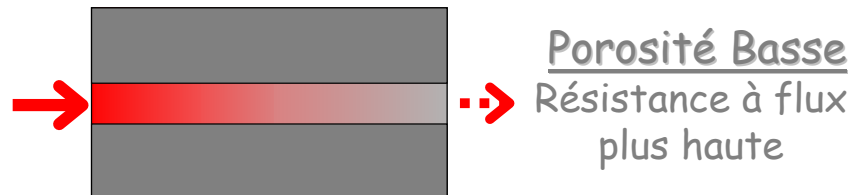
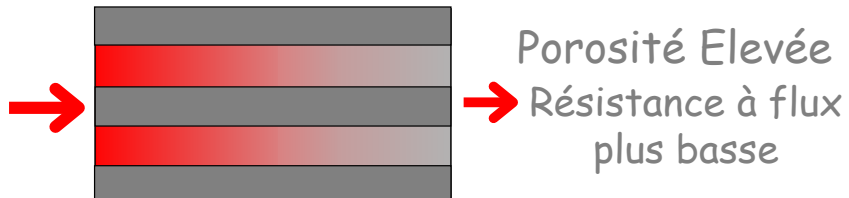
- $\frac{dc}{dt}$: Rate of diffusion
- D : Coefficient de diffusion
- $\frac{dc}{dx}$: Gradient de concentration

K_p
 D

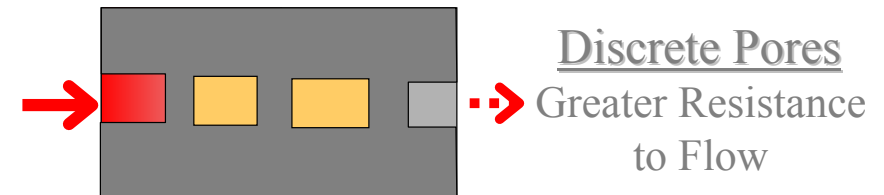
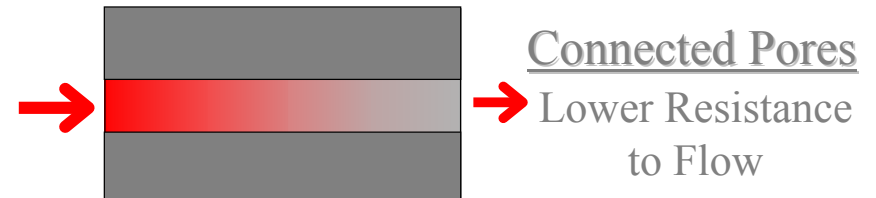
Depend des même parametres



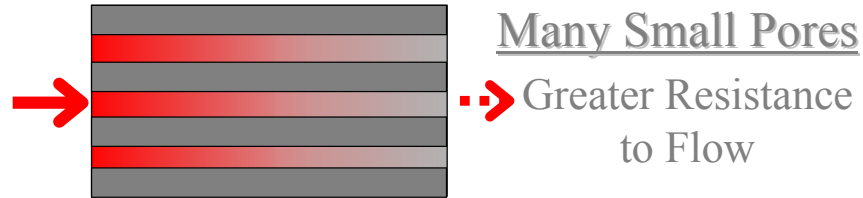
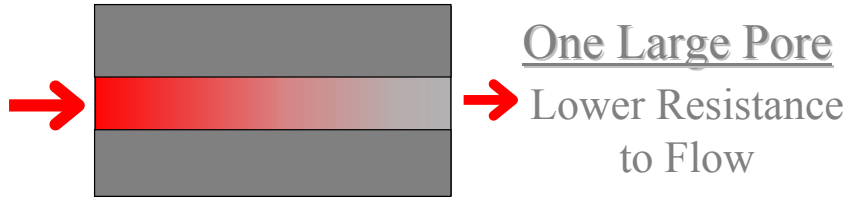
Effet de Porosité



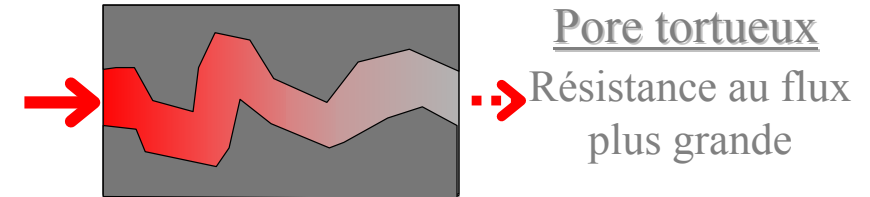
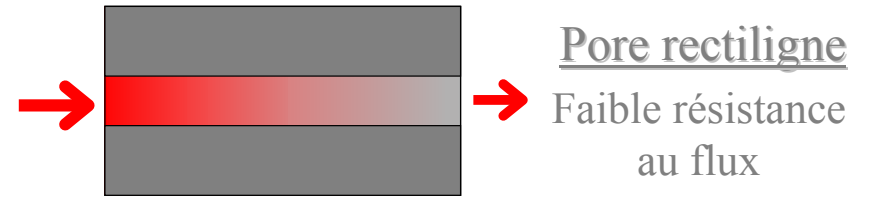
Effet de Connectivité



Effect of Constrictivity



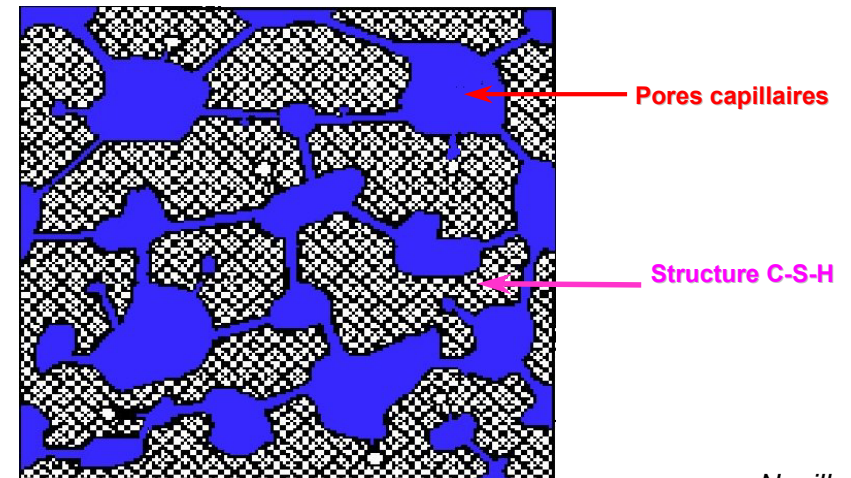
Effet de la tortuosité



Pour diminuer la perméabilité d'un matériau poreux:

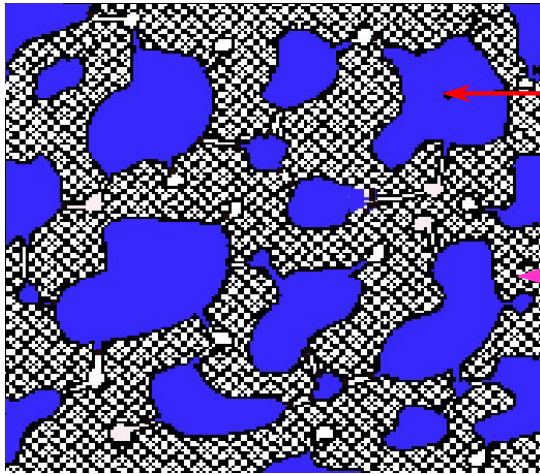
- Diminuer la porosité totale
- Diminuer la connectivité
- Diminuer la taille des pores
- Augmenter la tortuosité

Perméabilité élevée
(Interconnection des pores capillaires)



Faible Perméabilité

Pores capillaires segmentés et partiellement connectés

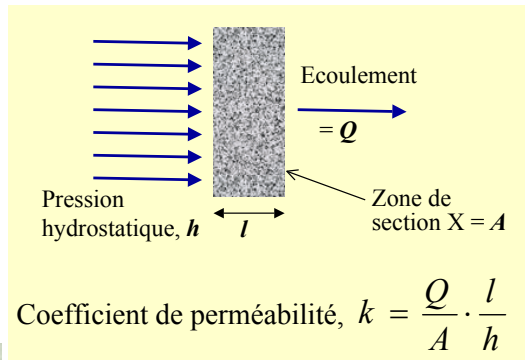
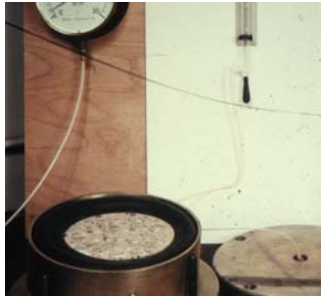


Pores capillaires

Structure C-S-H

Neville

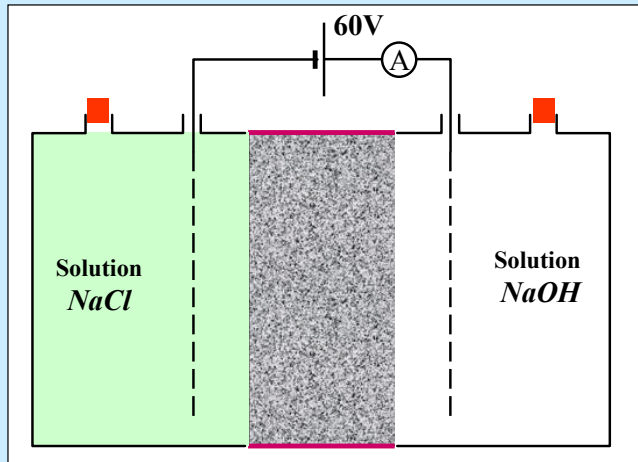
Techniques de mesure



Pas efficace pour bétons avec $W/C \leq \sim 0.4$

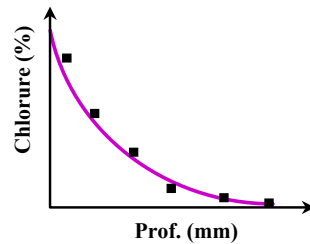
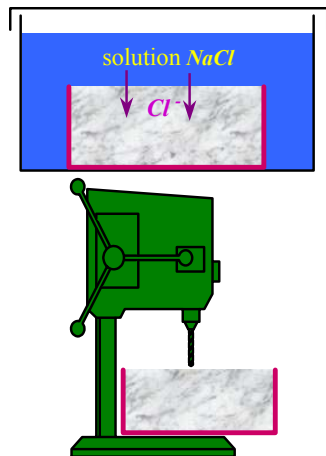


Test rapide de perméabilité avec chlorures (ASTM C1202)



Est ce que le migration de Cl^- sous effet de courant est le même que sur diffusion toute seul?

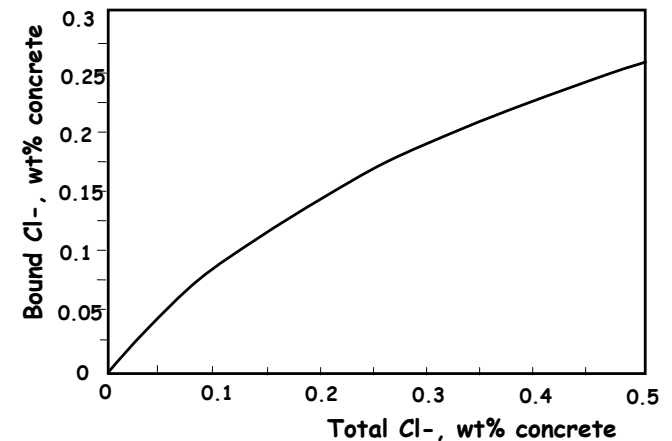
Test de diffusion par capillarité



$$\frac{C_x}{C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}\right)$$

C_0 et D_a trouvés par ajustement de courbe

Mais il y a une interaction entre les ions Cl^- et les hydrates



Impact de paramètres du béton

Le plupart du transport se passe par
le pâte de ciment

**Donc, pour diminuer la perméabilité,
vous devez modifier la pâte.**

Réduction de la quantité de pâte:

- Diminuer le rapport eau / ciment
- Améliorer la composition granulométrique

Améliorer la qualité de la pâte:

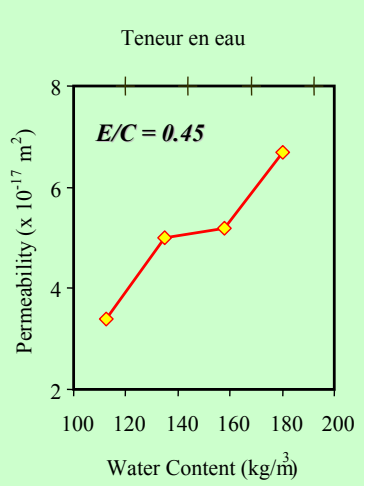
- Diminuer le rapport eau / ciment
- Utiliser SCM's

A dosage en ciment constant,

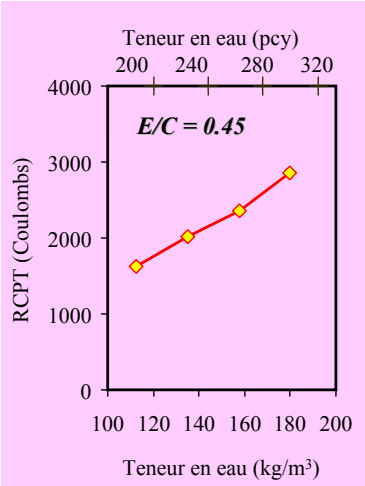
la réduction du rapport
eau / ciment

diminue la quantité de pâte,
donc la porosité totale

Effet de la teneur en eau

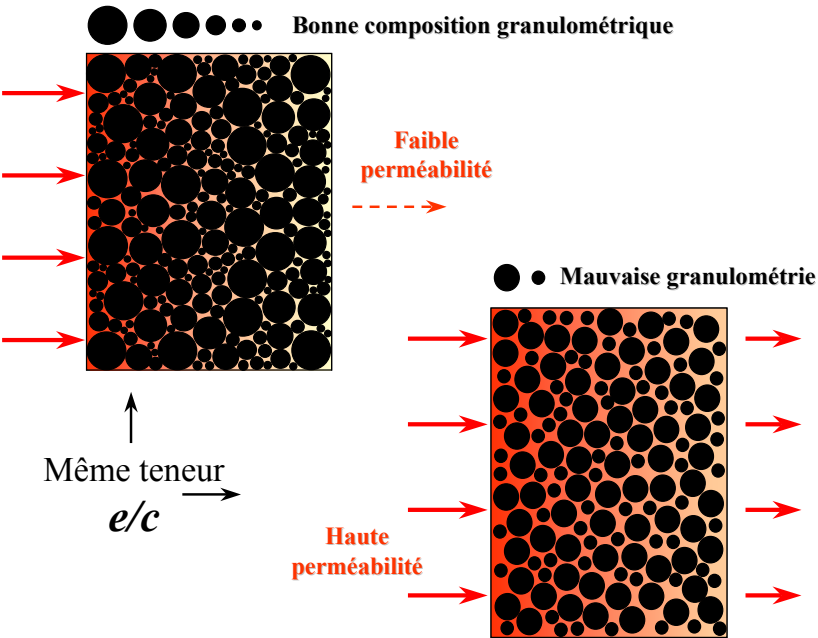


Perméabilité aux gaz



Perméabilité aux “Chlorures”

Améliorer la composition granulométrique réduit le volume de la pâte, et donc la porosité totale.



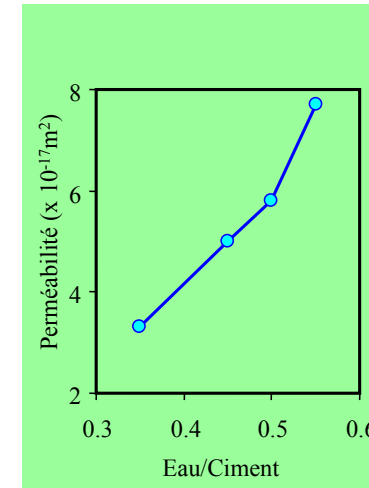
E/C vs. Teneur en eau

Cement content (kg/m³)	Water Content (kg/m³)			
	W/C =			
	0.35	0.45	0.50	0.55
250	-	113	-	138
300	-	135	150	-
350	-	158	-	-
400	140	180	-	-

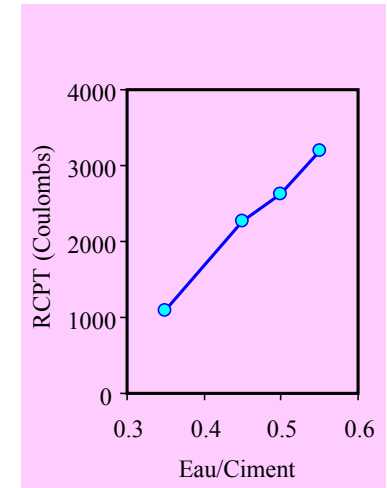
Augmentation du volume de pâte

Une diminution du rapport E/C améliore la qualité de la pâte, réduit la porosité totale, réduit la connectivité, et augmente le resserrement et la tortuosité.

Effet de E/C

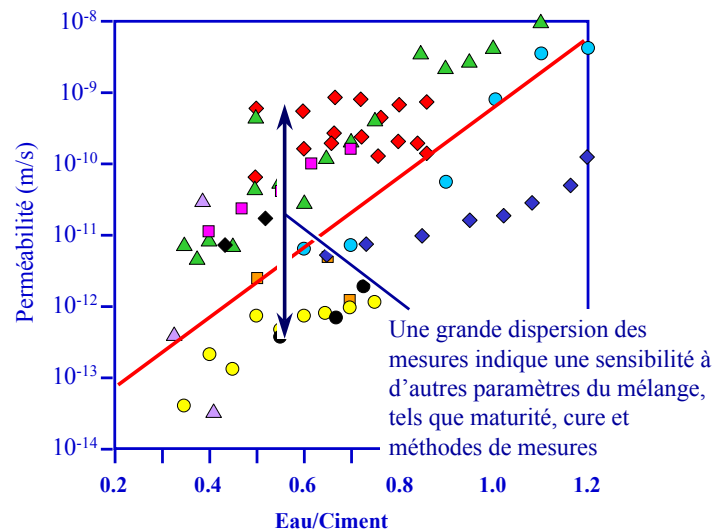


Perméabilité aux Gaz



Perméabilité aux "Chlorures"

Effet de E/C sur la perméabilité

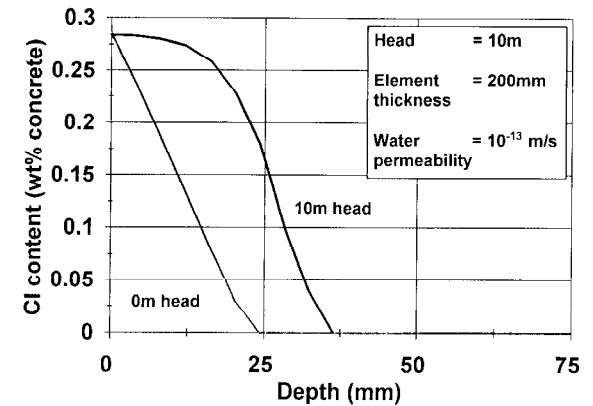
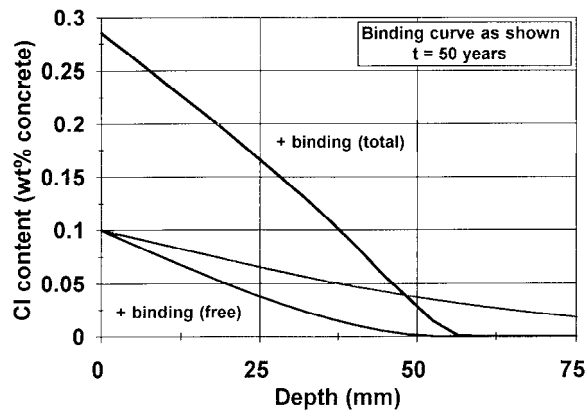
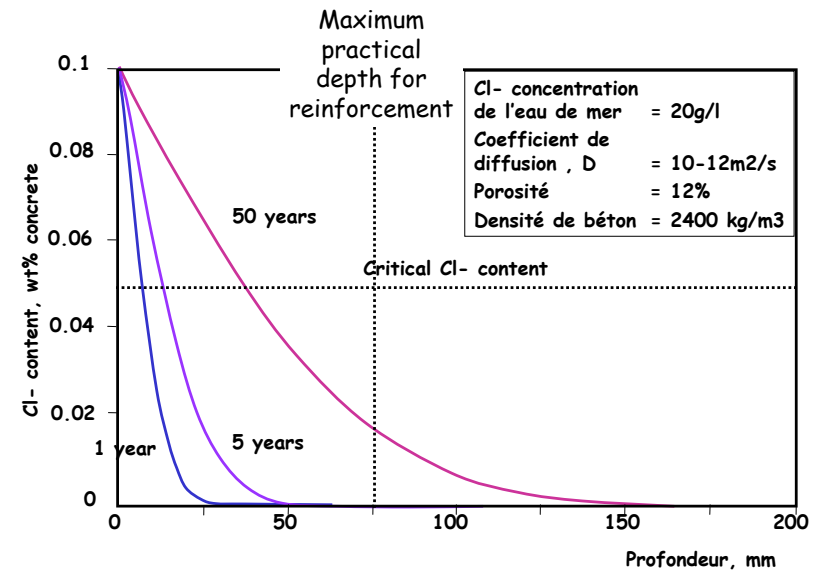


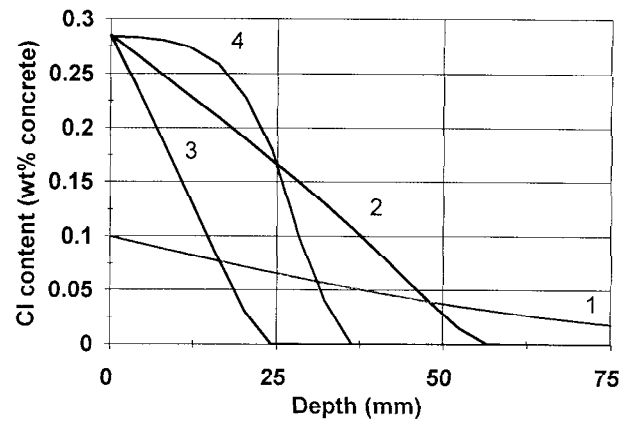
(Adapté de Hearn et al, 1996)

Aproches au modelisation
du durée du vie

Les grandes structures / ouvrages d'art

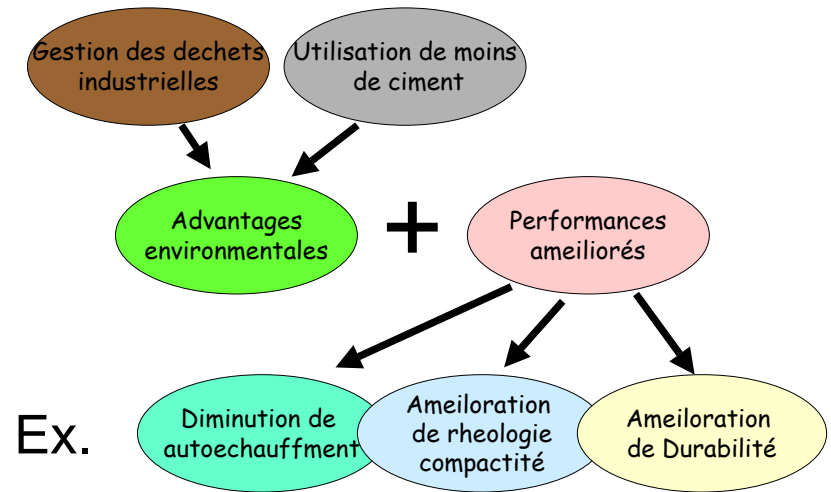
- Ex. Le tunnel sous la manche
- On veut une durée de vie de 100 ans (par exemple)
- Comment calculer la qualité du béton et épaissir de béton autour des aciers pour atteindre cette durée de vie.





SCMs Supplementary Cementing Materials

Rationale



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

Pozzolanique

- Réagir avec le CH, hydroxide de calcium pour former plus de C-S-H

soit

Hydraulique

- Former plus des hydrates

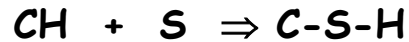
Les pozzolans:



Les volcans produisent les cendres riches en verre de silice et alumine:

Les pozzolans:

Les Romains utilisaient les cendres volcanique, de le voisinage de **Pozzoli, les pozzolanas** melangé avec la chaux:

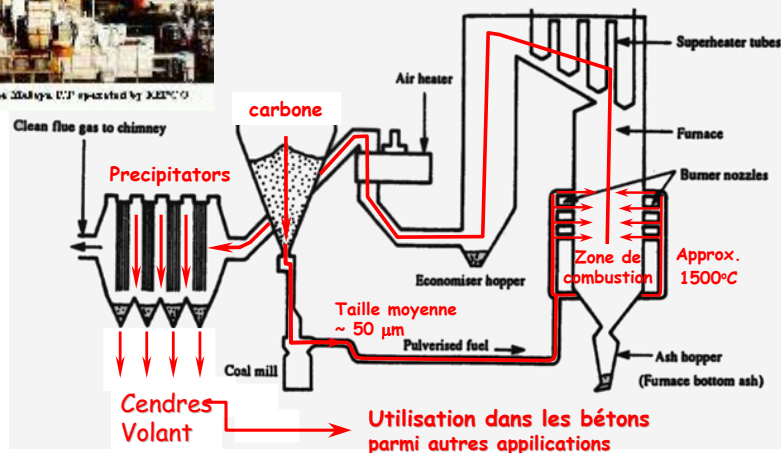


Ces ciment ont eu les proprietes superior et étaient utilisé dans les bâtiments montrants de bonne durabilité comme le Pantheon

Les pozzolans synthetique:

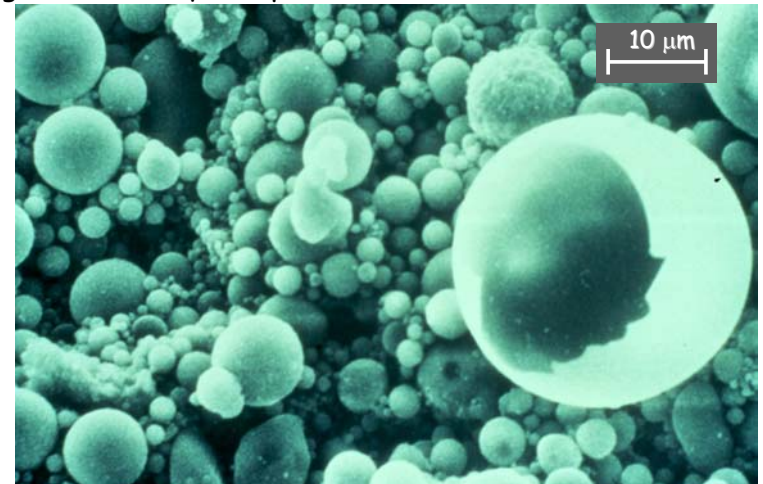


Centrale d'électricité thermique



Cendres volants

Tous le matériel incombustible du carbonne, form les goutlets de liquide, puis condense



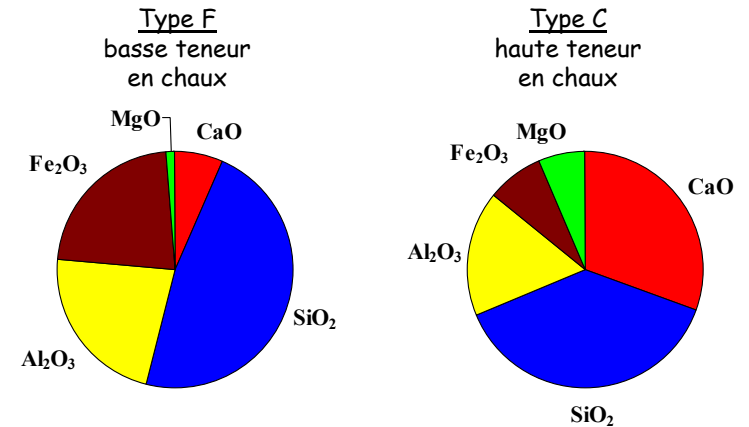
Cendres Volants

FLY ASH

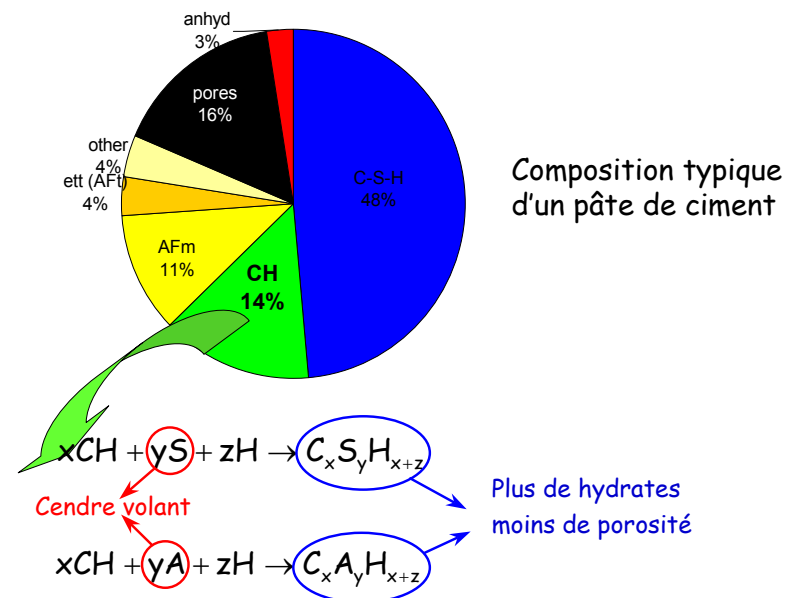
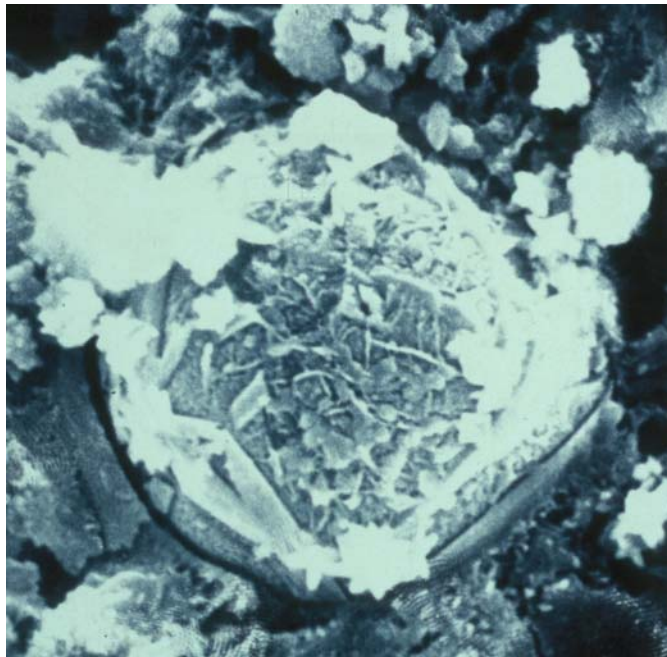


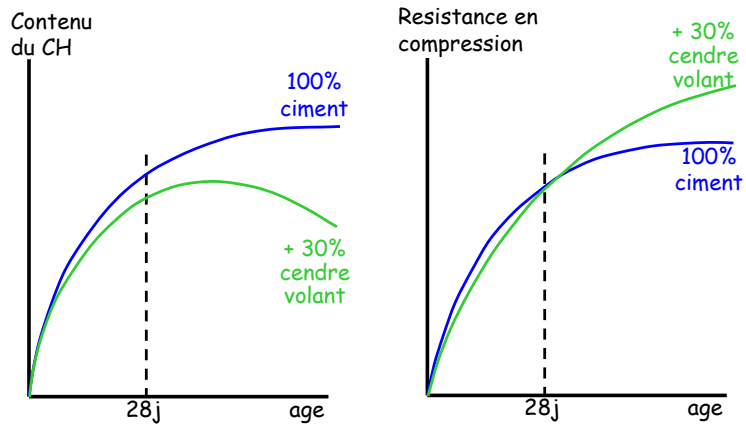
Particules avec la même finesse de ciment

Composition: 60 – 95% amorphe



Seulement
le parti
amorphe
est réactif





La réaction est assez lente. Elle commence après 3-7 jour
 Elle a besoin d'humidité
 Le résistance d'un bétons avec ~30% cendres volants
 Depasse celle d'un 100% ciment après ~28 jours

SI IL Y A UN BON « CURE »

Utilisation

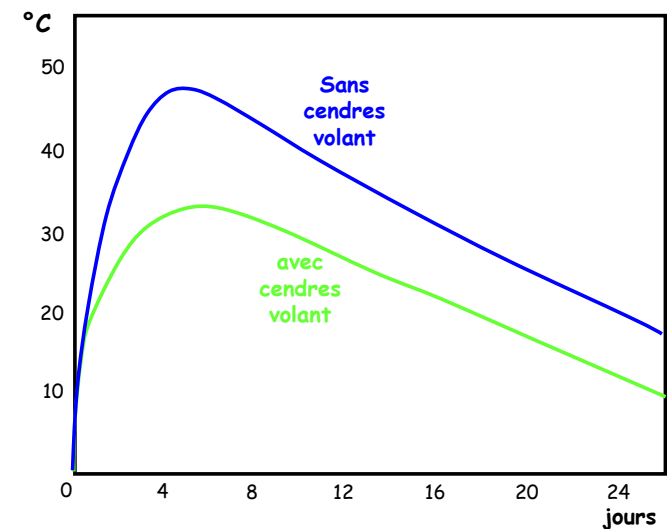
Substitution dans un béton pour
 10 - 30 % du ciment

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

Avantages

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

Diminution d'autoechauffment

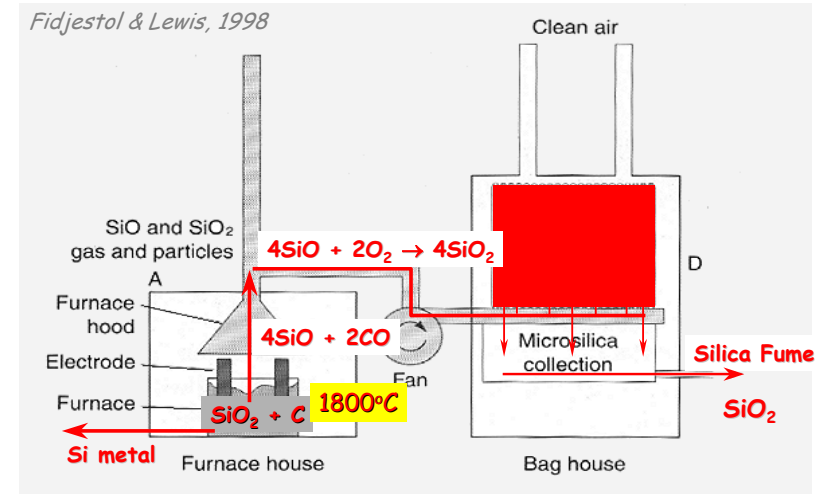


Desavantages

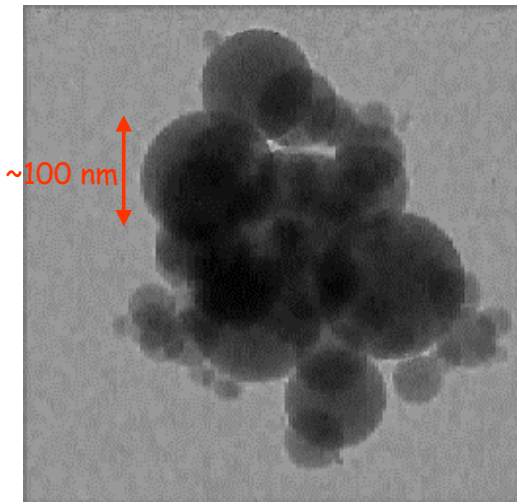
- Efficacité des adjuvants, ex entraînent d'air
 - Fonction de charbonne résiduelle
- Importance de bon « cure » augmente

Fumée de silice:

sous produit de production des alliages de silicium

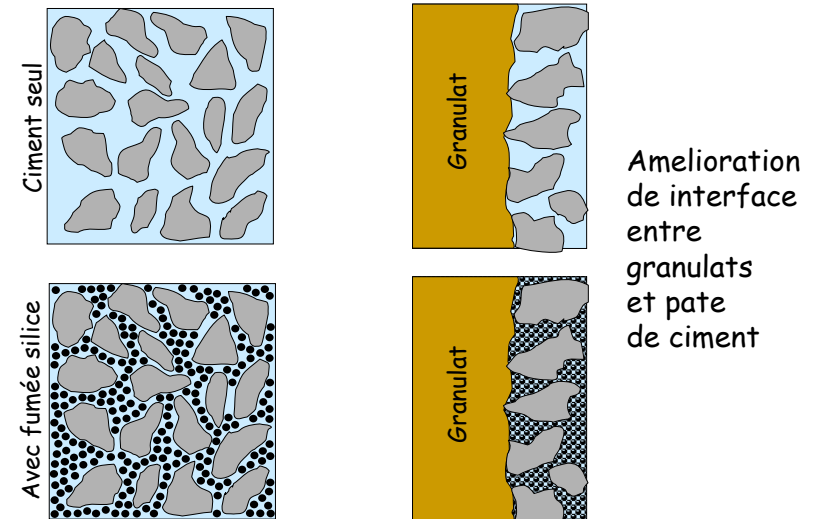


Verre de silice (90 – 99.9% SiO₂)



- Agglomerates de particules très fin
- Surface spécifique: ~15000m²/kg (cf. 350 m²/kg ciment)
- Réactif (similaire au ciment)
- Réduction de CH par réaction pozzolanique

Microfilarisation



Utilisation

Substitution dans un béton pour
5 - 15 % du ciment

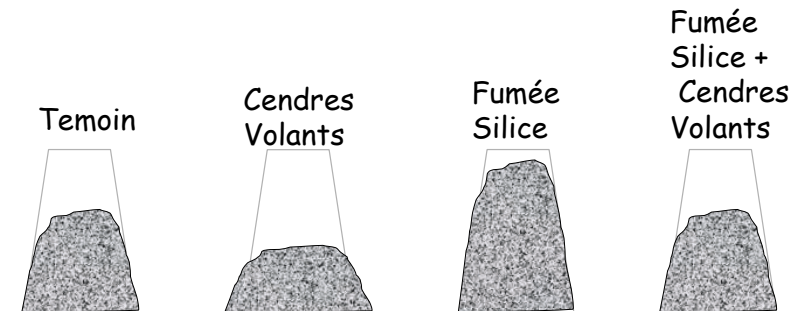
Avantages

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

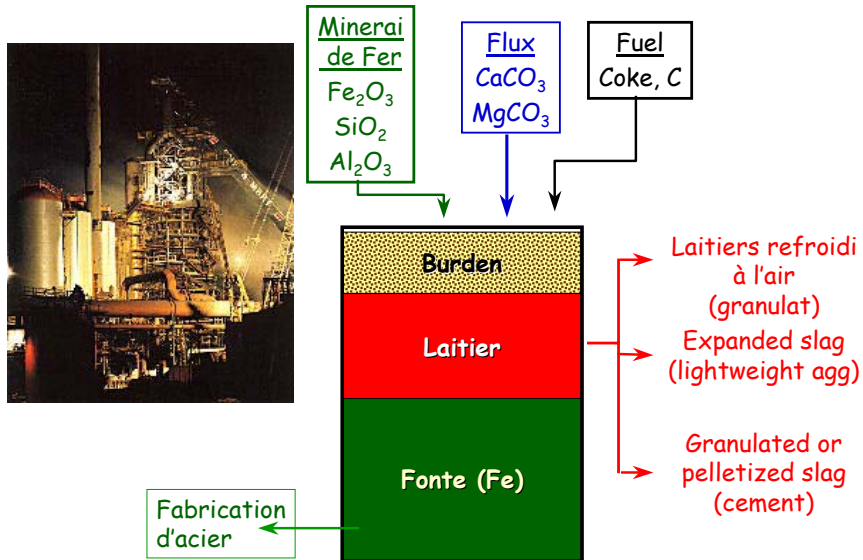
Désavantages

- Ouvrabilité, il faut utiliser les superplastifiants
- Il faut bien malaxer pour casser les agglomérats
- Augmentation de retrait possible
- Assez chère

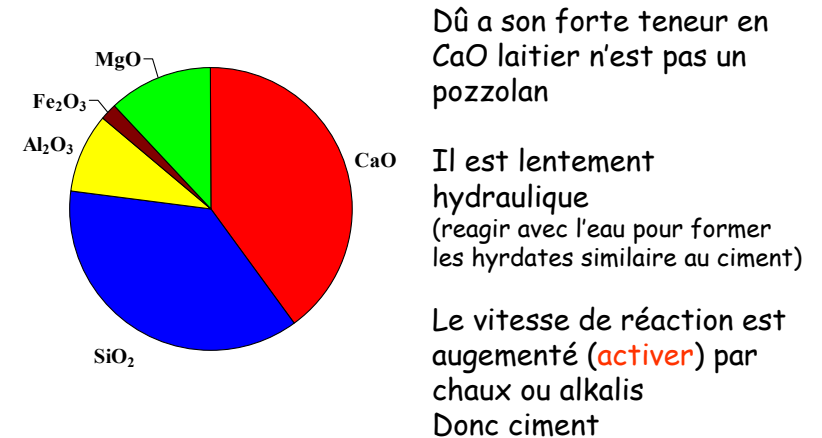
Ouvrabilité



Laitier de haut fourneaux



Composition 80-100% amorphe



Utilisation

Substitution dans un béton pour
30 - 70 % du ciment

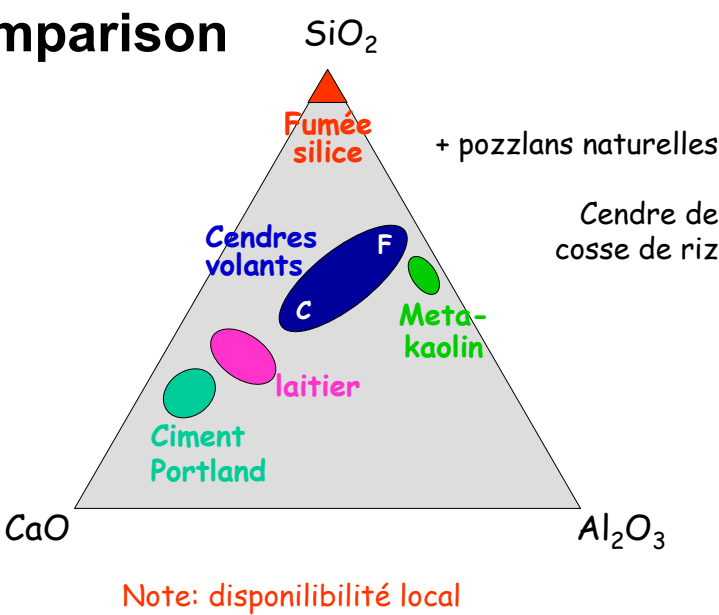
Avantages

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

Desavantages

- Sensibilité au bon « cure »
- Augmentation de retrait possible

Comparison



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

Type	Désignation Ciment	Notation	Composition en % massique		
			Principaux		Secondaire
			Clinker	Ajout	
I	Portland	I	95-100	0	0-5
II	Portland	II / A-S	80-94	6-20	0-5
	au laitier	II / B-S	65-79	21-35	0-5
	Portland à la F.S.	II / A-D	90-94	6-10	0-5
	Portland au calcaire	II / A-L	80-94	6-20	0-5
		II / B-L	65-79	21-35	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 de UTILISATION



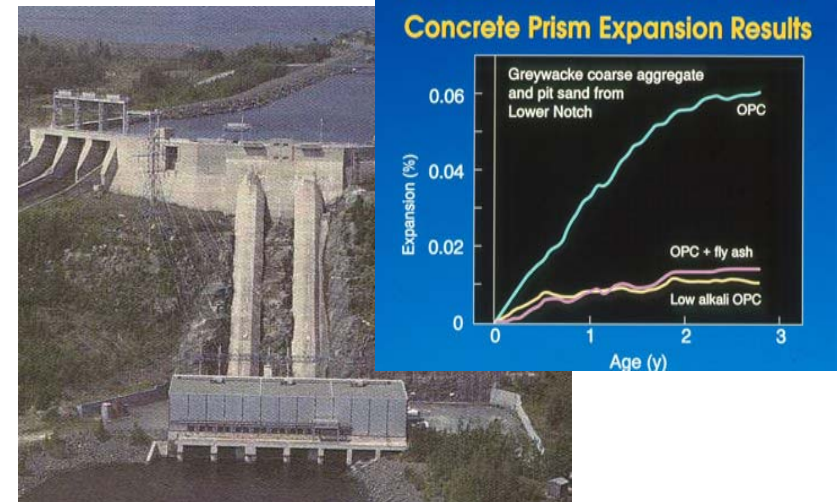
Viaduct en Cameroon utilisation de ciment avec fumée de silice importé du Canada - pour amélioration d'étanchéité



Confederation bridge, Canada: ciment+FS pré-mélangé +cendres volante ajouter à stage de fabrication du béton - pour augement durabilité, améliorer pompabilité, reduire chaleur, meilleur resistance



Causeway en Floride - Cendres volante utilisé pour augemente resistance à la penetration des ions chlore



Barrage au Canada - Cendres Volants (Type F) pour minimiser risque d'expansion par reaction alkali granulats (ASR)



Voutre pour tunnel -ciment avec FS pré-melangé plus latier, pour
reduire penetration des ions chlore

Rationale

Adjuvants:
ajouts liquide ~ quelque %

- Performances améliorées
- Compensation des déficiences
- NOTE: en générale 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 de retrait

Superplastifiants



Fluidification

OU

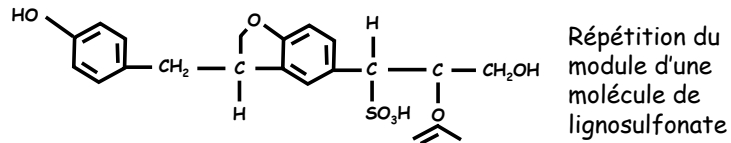
Réduction de e/c
(augmentation de
résistance)

OU

réduction du contenu
du ciment

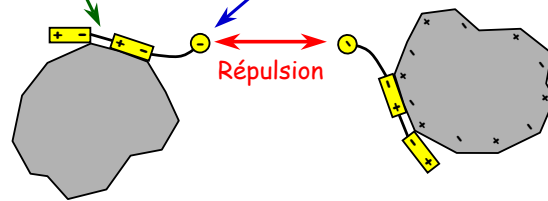


Ex: lignosulfonates

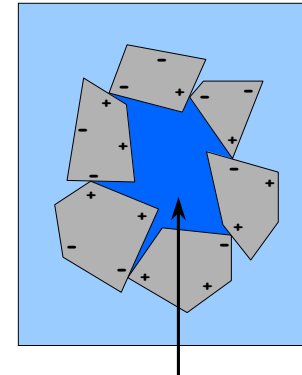


Chaîne polaire absorbée, à l'interface de l'eau solidifiée

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

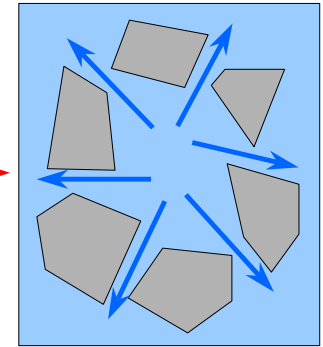


Ciment flocculé



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

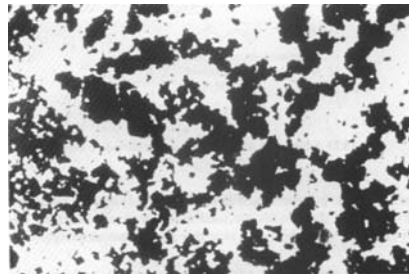
Dispersant
(plasticizer)



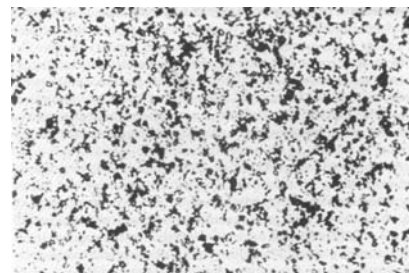
L'eau libéré par la lubrification amène à réduire la viscosité

Micro graphe des grains de ciment en suspension dans l'eau

Pas d'adjuvant →

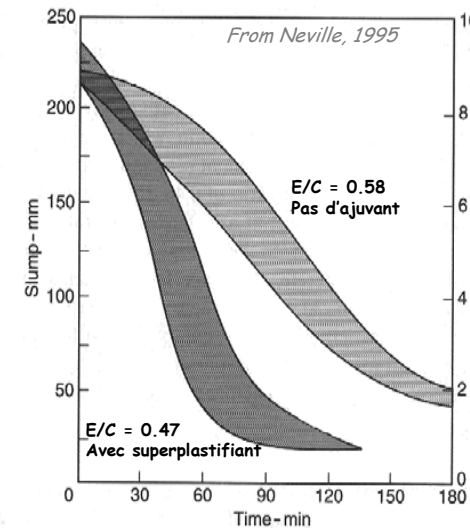


Avec HRWA →



From Lea, 1998

Perte de slump



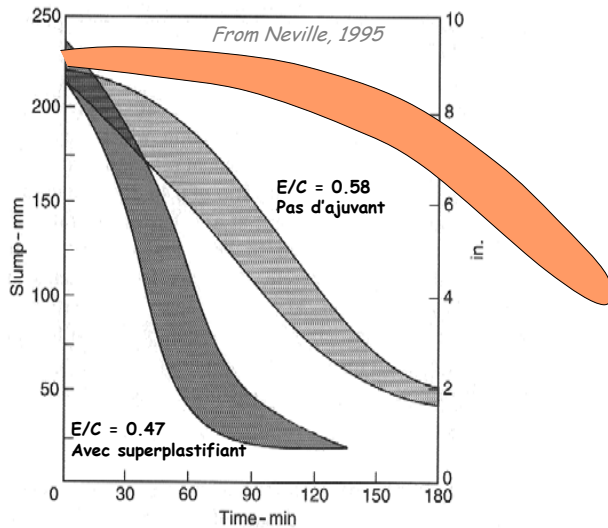
L'effet des SPs est limité dans le temps. Ils sont absorbés dans les produits d'hydratation des aluminates.

La vitesse de perte d'efficacité dépend de:

- C_3A , SO_3 , alkali
- la température
- la finesse

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

Utilisation de SP + retardateur



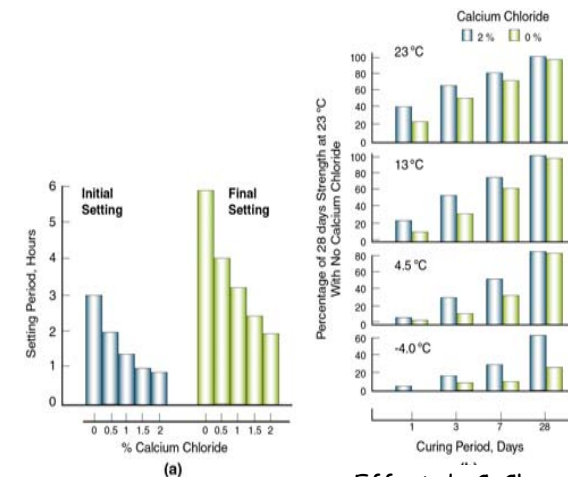
Utilisation des accélérateurs

Modification des propriétés du béton, particulièrement en temps froid

- Pour avancer les opérations de finition et si nécessaire l'application d'insulation
- Réduire le temps pendant lequel il faut « 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



Effect de CaCl_2 sur le temp de prise du ciment

Effect de CaCl_2 sur le developement de resistance pour different temperatures

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 de retardatrice prolongée et difficile à contrôler

Retardateurs pratique

- poly acides organique ou ses sels:
 - Acide gluconate
 - gluconate de soude
 - Acide tartrique
 - Tartrate de soude
- Formation de produits bloquants sur la surfaces 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 résistances

Definition

Resistances:

- > 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 age)
 - Réduction des coût - moins d'acier, construction plus rapide
- **Ponts, etc**
 - résistance (à court et long terme)
 - durabilité
 - étanchéité

Les Gratte-ciel

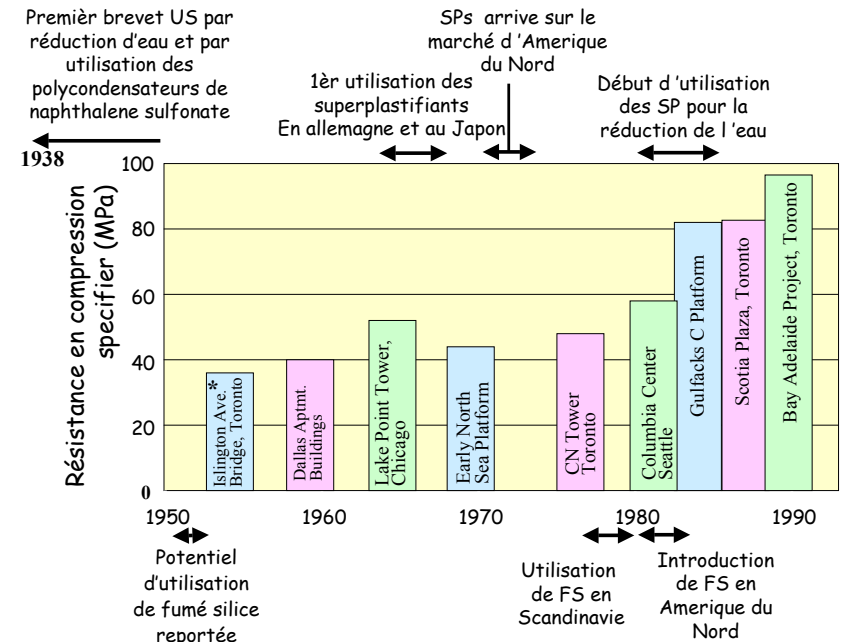
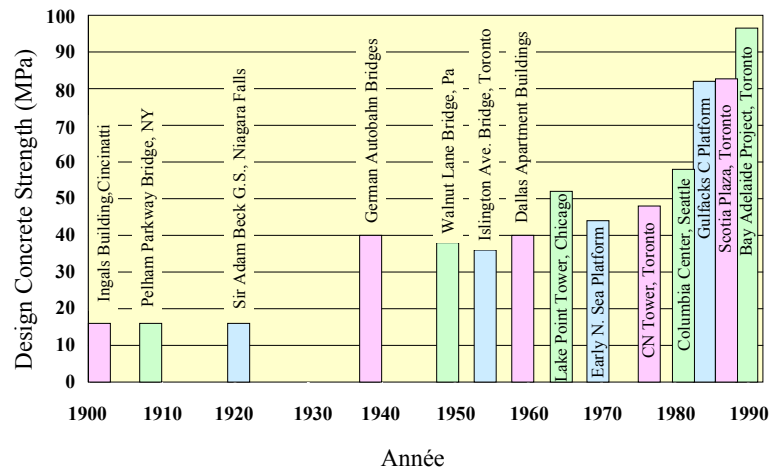
1966-67, Lake Point Tower, Chicago
52 MPa (7500 psi), 70 étages, un tous les 3 jours

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



Comment

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

Limitations

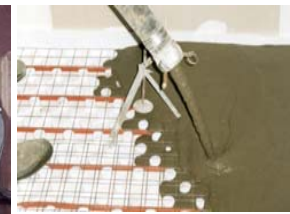
- Besoin pour les codes plus sophistiqués
- Fragile - rupture catastrophique
- Dans le feu, dégradation explosive
- Formulation souvent pointue
 - Sensible aux fluctuations de la température
 - Interactions du ciment - SP
- Sensible au retrait et fissuration endogène (autodessication)

Béton autoplacant

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



- Très bon remplissage des voiles
- Parements soignés



Sols chauffants

Sols industriels



Self-Compacting Concrete

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



Comment

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

Essais pour le béton de compactage

V-Flow
(V-coulé)



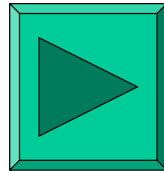
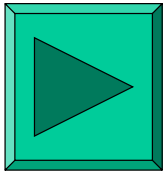
U-Flow Filling
(U-coulé en remplissant)



Coulé (et tassement) dans les éléments en masse renforcés



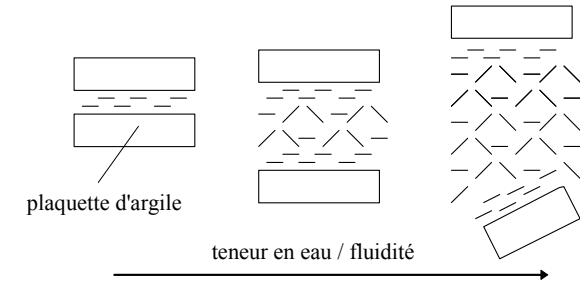
Béton de ciment alumineux autoplacant



La technologie des terres cuites dépend de la présence d'argile

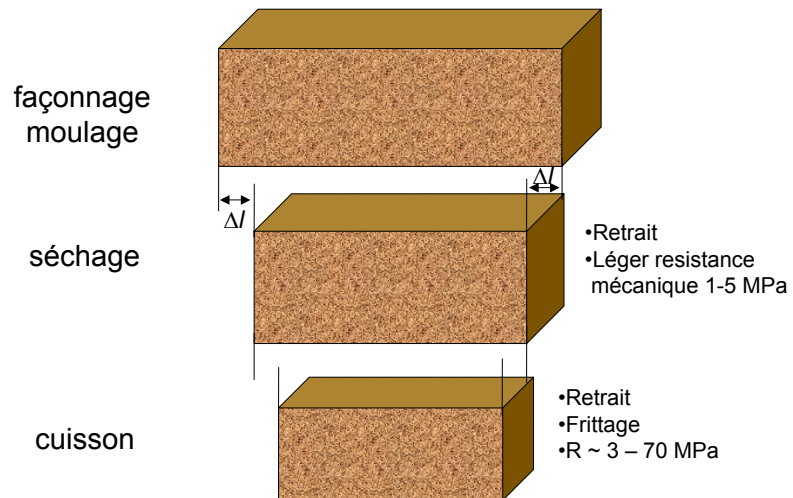
L'état naturel de l'argile consiste en:

- Plaquettes de silico aluminates séparées par les molécules d'eau

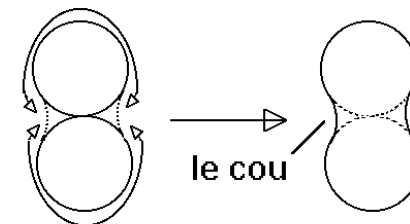
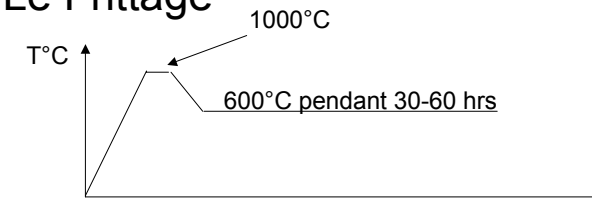


Terres cuites

Étapes de fabrication:



Le Frittage



Au point de contact des grains, les atomes se diffusent pour former un cou.
Forte liaisons covalentes → bonne résistance mécanique

Les pores

- **Variation entre 5 et 50 %**
- **~ 10X taille dans béton, 1-10 μm**
les espaces entre les grains sont relativement uniforme
- **Contrôle des propriétés mécaniques**
- **Absorption d'eau, transfert d'humidité**
- **Resistance aux gel**

Les produits



briques



carrelage



tuiles

AVANTAGES

DESAVANTAGES

Plaster

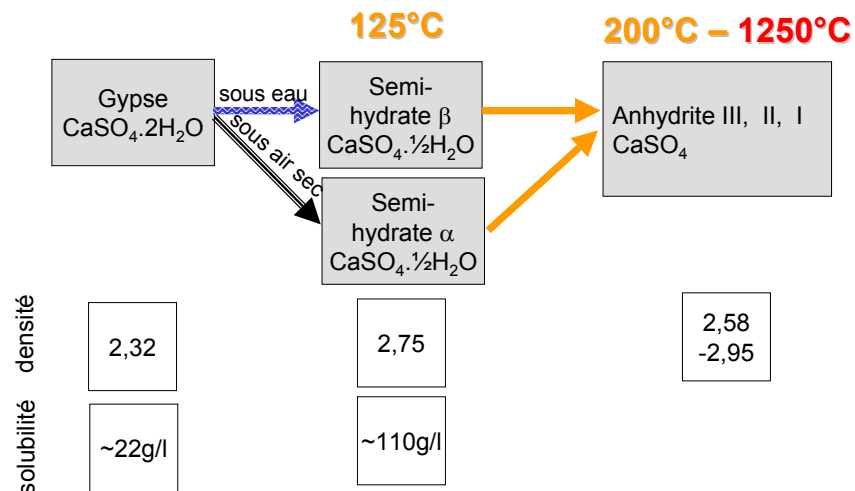
- Cover surface with adhering material
- « couverture d'une surface avec matériau adhérent »

Traditionnellement:

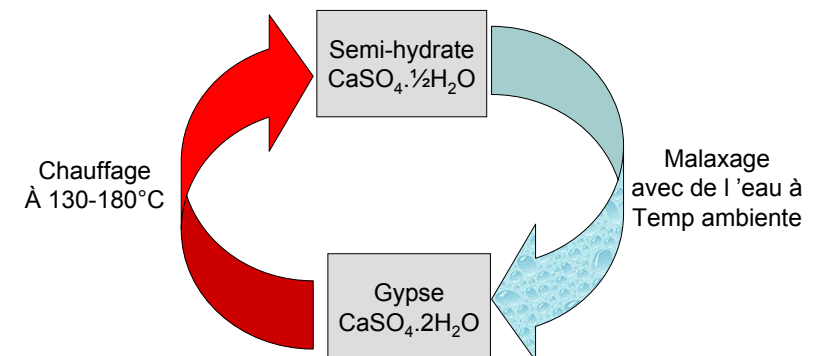
- Chaux
- Argile
- Gypse

Plâtres

Les sulfates de calcium



Cycle



Réaction



$$0,67V_{\text{semi}} + 0,33V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,93V_{\text{gypse}}$$

Volume total ↓ 7% *mais* Volume solide ↑ x1.4

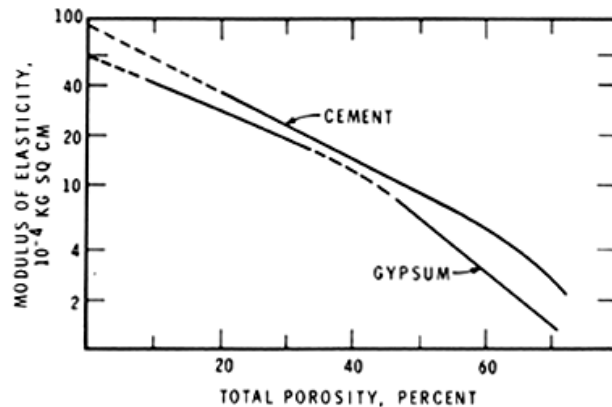
Comparé au ciment

Volume total ↓ 7% Volume solide ↑ x2.2

Gâchage

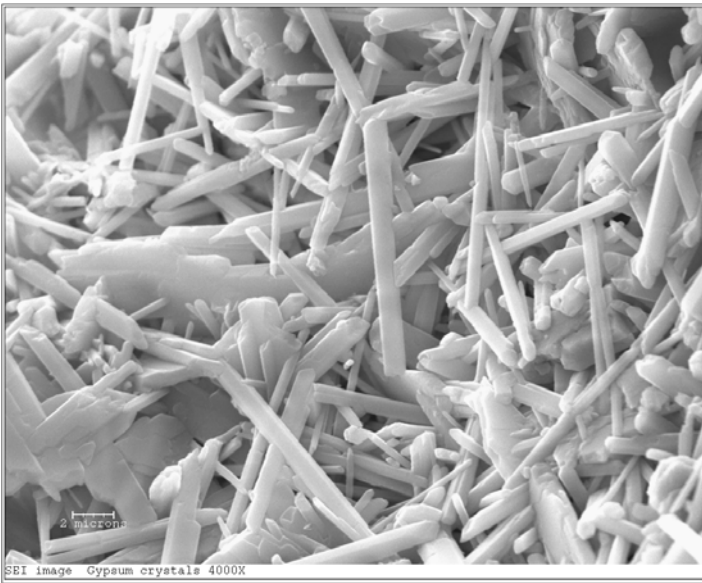
- On gâche le plâtre avec le rapport e/p = 0.3 – 0.5 (le même que pour les ciments)
- *Pourquoi*
- Est-ce que la porosité d'un plâtre durci est plus haute ou plus basse que celle d'un ciment gâché avec le même e/s

Propriétés Mécanique



Prise et durcissement

- $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ dissout
- Puis précipitation de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, gypse et croissance en forme d'aiguilles
- Contrôle de vitesse avec accélérateur et retardateurs
- Prise, de quelques minutes à quelques heures



- La croissance des aiguilles les une contre les autres donne une légère expansion 0.1-0.3%
- Conséquences de cette expansion ?

Propriétés

AVANTAGES

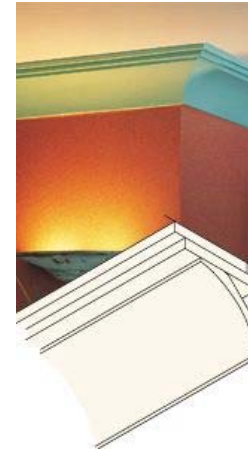
- Disponible, pas chère
- Surface sans fissures
- Léger
- Résistant au feu

DESADVANTAGES

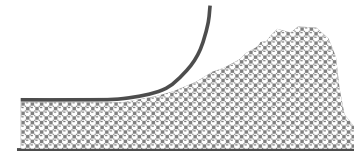
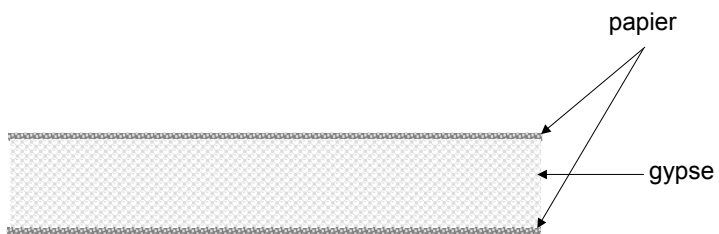
- Soluble
- Fragile
- Résistance mécanique modeste

The Wall Board Revolution

- Cloisons prêtes à l'emploi
- 75% production actuelle de CaSO_4



Un matériaux composite



Production quelque
mètres par minute!



Questions sur le matériau

- **Légèreté contre propriétés mécaniques**
- **Comment l'alléger?**

Solutions composites

- **Isolation thermique**
- **Isolation acoustique**
- **Résistance au feu (jusqu'à 240 minutes)**

Références

- www.nrc.ca/ira/cbd/cbd127e.html
- www.brooks.af.mil/dis/DMNOTES/gypsum.pdf

Matériaux polymérique

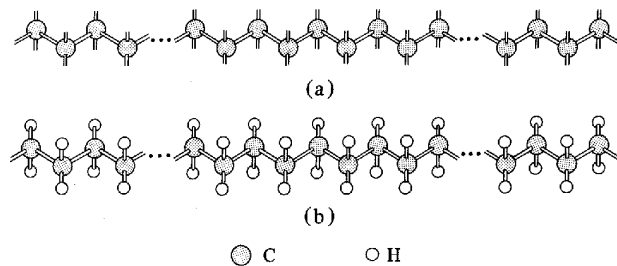
Pourquoi les utiliser en construction?

Avantages

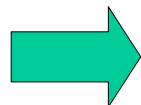
Désavantages

Polymères et composites

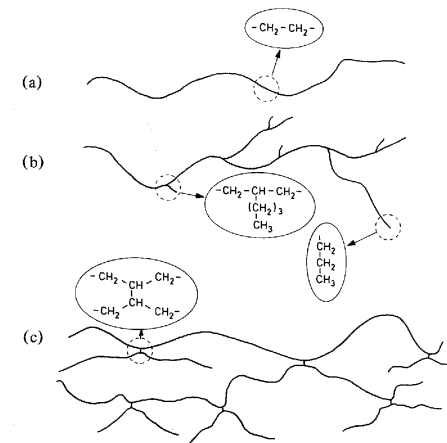
L'origine de la souplesse est la structure en chaînes



Longueur des chaînes
Branchement des chaînes
Liaisons entre les chaînes
.....

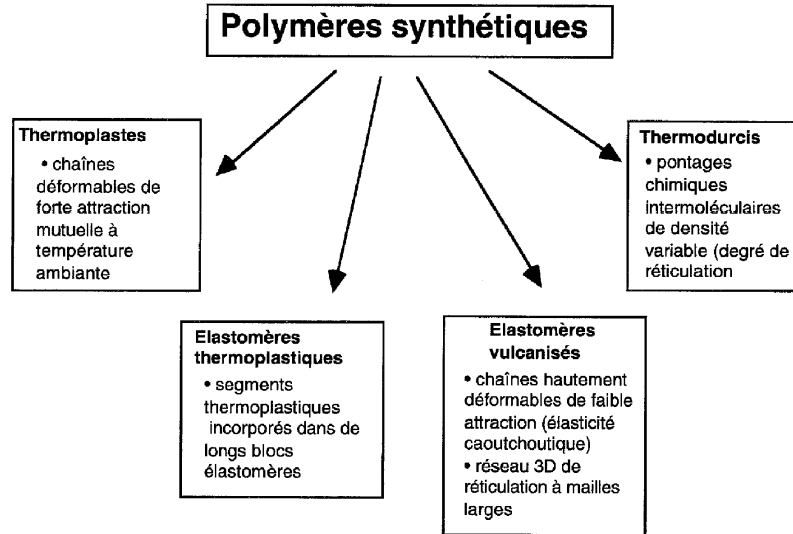


Propriétés mécaniques

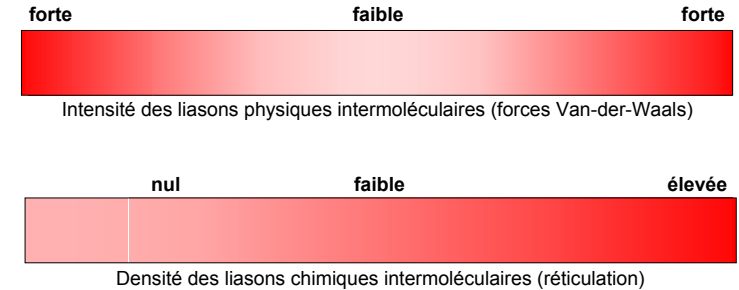


Représentation schématique des polyéthylènes:
a) linéaires ; b) ramifiés ; c) réticulés.

Classification selon propriétés mécanique



THERMOPLASTES ELASTOMÈRES THERMODURCIS
semicrystallins amorphes thermoplastiques vulcanisés



THERMOPLASTES

- Facilité de moulage avec des perles déjà polymérisées
- Faibles propriétés mécanique

POLYETHELENE (PE) $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n$

(reste en basse tension, susceptible à la dégradation des UV)

- Membranes résistantes aux pénétrations d'eau (tenacité)

POLYPROPYLENE (PP) $(-\text{CH}_2-\text{CH}.\text{CH}_3)_n$

(plus rigide, plus résistant)

- Fibres dans le béton, limitation de fissuration

POLYSTYRENE

(rigide même en forme expansée)

(toxicité sous feu)

- Isolation thermique

THERMOPLASTES

POLYVINYL CHLORIDE (PVC) $(-\text{CH}_2-\text{CH}.\text{Cl})_n$

Charge sur Cl, plus forte interaction entre les chaînes

Plus rigide, moins inflammable, coût raisonnable

Polymère le plus utilisé en construction

Durée de vie ~20 ans

- Tuyaux assainissement
- Cadres de fenêtres

THERMOPLASTES

POLYTETRAFLUOROETHELENE (PTFE)

- Joints des tuyaux

NYLON

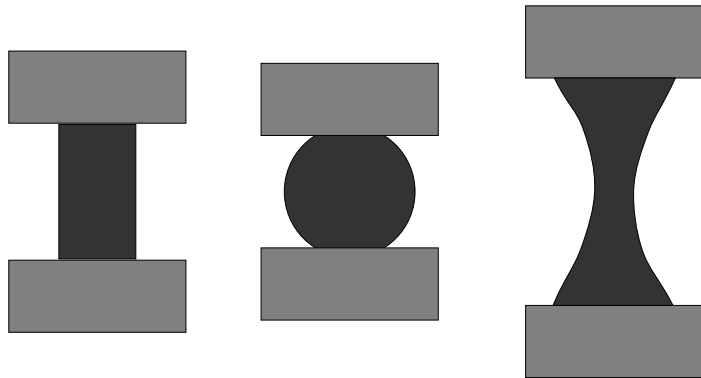
- Cher, n'est pas beaucoup utilisé
- Tuyaux

PMMA (polymethyl methacrylate)

- résine réparation des bétons

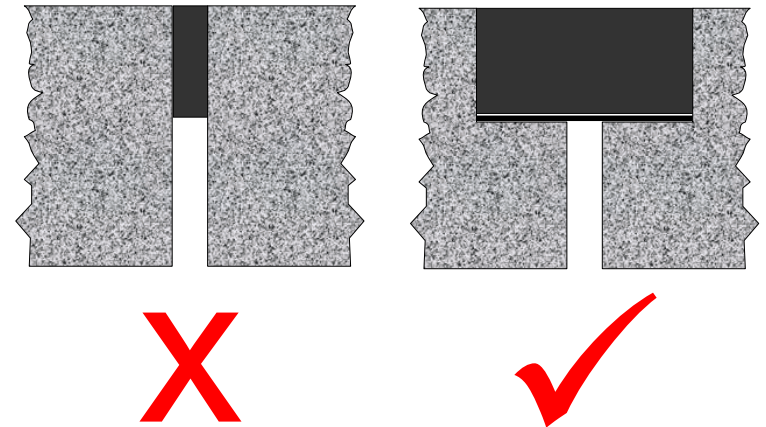
ABS (acrylonitrile butadiene styrene)

- Tuyaux, plus résistants à la chaleur que PVC



ELASTOMERS

- Très haute capacité à la déformation (>100%)
- scellement des joints
- Doit permettre le changement de forme sous déformation, ex:



ELASTOMERS

CAOUTCHOUC NATUREL

- appui pour ponts,
- Appui anti vibrations bâtiments entier

SILICONES

- Scellement (ex. Salles de bain)

NEOPRENE

- Bande de scellement de vitrages

THERMODURCIS

- Rigide mais fragile
- Polymérisation in situ, pas de changement de forme après l'opération

UREA FORMALDEHYDE

- Expansé pour l'isolation thermique dans les murs

RESINS POYESTER avec fibres

- Citernes pré moulée
- Panneau de façade
- piscines

COMPOSITES

- Combinaison des propriétés de plusieurs matériaux
 - Béton renforcé
 - Plaque en plâtre
- À matrice polymérique + fibres
 - De verre
 - De carbone
 - De Kevlar

Composite rebar pour béton



L'intérêt?

Freins de développement

> > > plus cher que l'acier

Besoin de nouveaux codes de design

Références

Attention au biais commercial des sites Web

- **Materials in Construction**, G.D. Taylor, 3rd ed. 2001
- **Polymeric Building Materials**, D. Feldman, Elsevier 1989
- <http://www.socplas.org/industry/2114.htm>
- <http://www.gwyneddplastics.co.uk/>

Composite rebar

- <http://www.ecn.purdue.edu/ECT/Civil/frprebar.htm>
- <http://www.osp.cornell.edu/VPR/CWCV13N3-99/techtran.html>

Généralités

Considérations environnementales

**Les matériaux de construction en général
(exception de quelques métaux) ne sont pas:**

- ni toxique
- ni particulièrement polluants

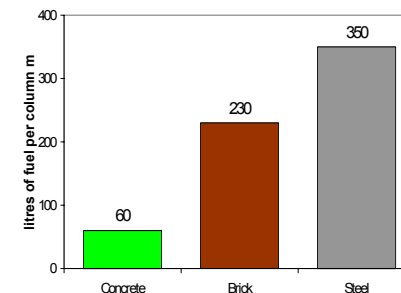
MAIS

**Donnant d énormes volumes utilisés, il faut
considérer leur impact sur l'environnement et
dans un contexte de développement durable**

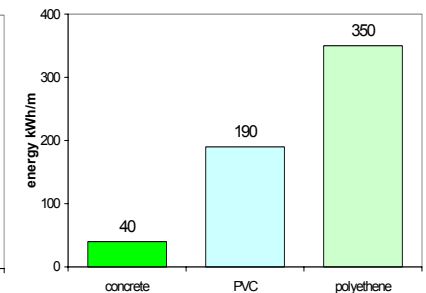
Considérations

- Disponibilité des matières 1er
- Extraction des matières 1er
- Energie utilisée pour la fabrication
- Considérations de la santé et de la sécurité
- Recyclabilité

Concrete – a low energy material



Energy of producing 1m of
column to support 1000 tonnes



Energy of producing 1m of
pipe

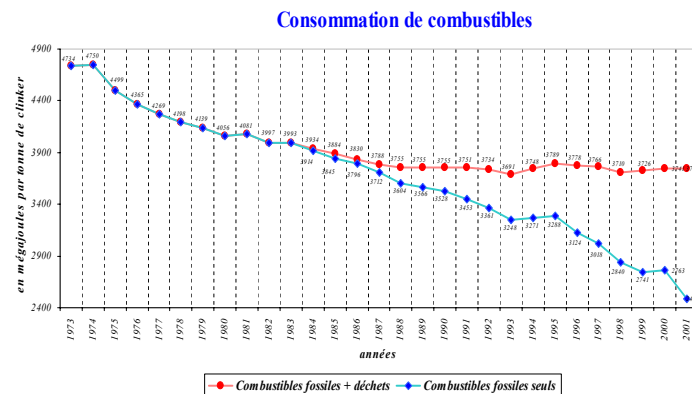
Le four du ciment

- La semaine prochaine, lecture invité:
- Hans Petersen, conseiller scientifique au gouvernement Neherlandais sur l'utilisation des sous produit (cendres, laitier, etc) dans la construction et recyclage des déchets de construction
- Cette semaine
- Le four du ciment comme déchetterie

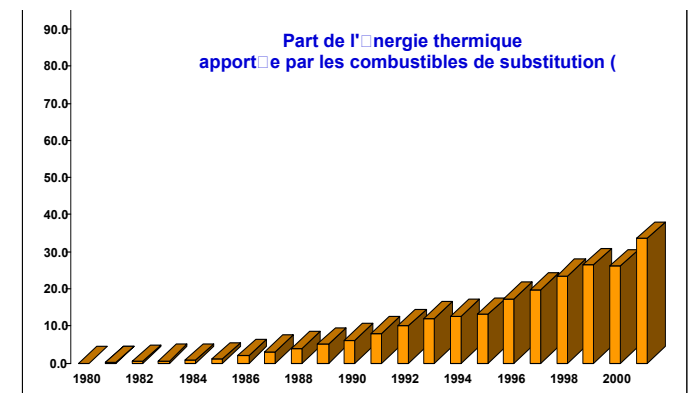
Le four du ciment est une structure très efficace pour la destruction des déchets

- Temperature très élevée 1450°C (flamme 2000°C)
cf. incinerator ~ 800°C
- Temps de résidence assez long
- Réduction de combustion des autres fuels (charbone, produits pétroliers, etc)

Combustibles de substitution (en France)



Combustibles de substitution



Combustibles de substitution données 2000

Combustibles fossiles

- coke de pétrole	45,0 %
- CHV / brais	15,6 %
- charbon	9,1 %
- fuel lourd	3,4 %
- gaz	0,7 %

Total 73,8 %
(1,1 M t.e.p.)

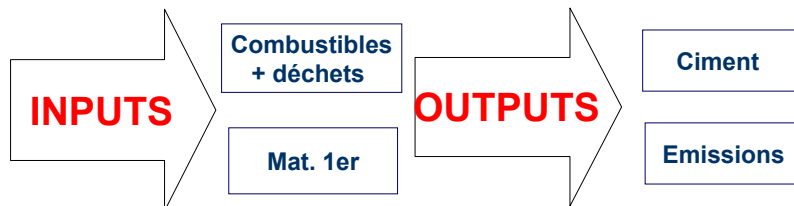
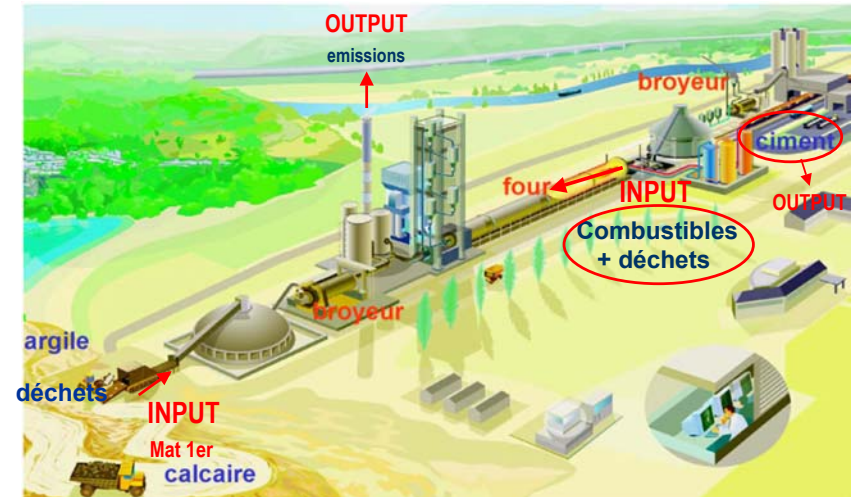
Combustibles de substitution

- DIS :	
huiles usagées	8,1 %
autres	10,4 %
- DIB :	
farines animales	5,8 %
pneus usés	1,0 %
autres	0,9

Total 26,2 %
(0,4 M t.e.p.)

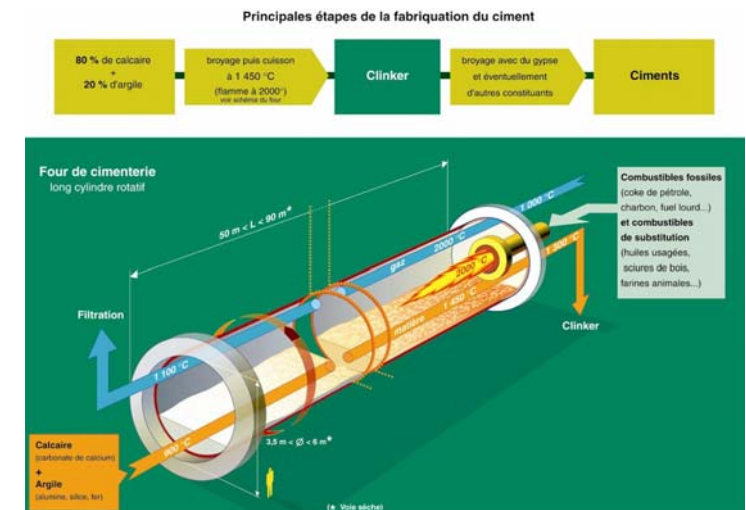
Source ATILH

Gestion des déchets en cimenterie



????s bilan vis à vis:
Métaux lourds
Organiques

Fabrication du ciment



Combustibles de substitution et environnement

- Les atouts du procédé cimentier
 - températures élevées (2000°C / 1450°C)
 - conditions oxydantes dans le four
 - temps de séjour des gaz important
 - stabilité des paramètres de combustion
 - => *bonne destruction des déchets*
 - Contre-courant de matière pulvérulente
 - Matière basique
 - => *neutralisation des traces acides*
 - fixation des éléments métalliques
 - absence de résidus de combustion

Combustibles de substitution et environnement

- **Destruction des molécules organiques**

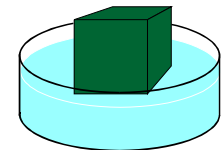
– Résultats sur deux usines françaises

Cimenteries	Composés	% destruction
Four à tour	Xylène	> 99,997
	Dichlorobenzène	> 99,999
	Hexafluorure de soufre	> 99,997
Four à grille	Toluène	> 99,997
	Xylène	> 99,999
	O-Dichlorobenzène	> 99,998

Devenir des métaux lourds dans le ciment

Tests de relargage

Méthodologie :



- Éprouvette de béton, de mortier dans de l'eau
- Mesure des métaux lourds dans l'eau après une période de stabilisation
- Test normalisé « Compatibilité eau potable »

Contenus comparés en métaux lourds

Teneurs en métaux lourds des bétons, des sols non pollués et des terres non contaminées (a) et décontaminées (b) (en ppm ou mg/kg)							
Elément	Bétons de CEM I		Bétons de CEM III/A		Sols	Terres	
	Mini	Maxi	Mini	Maxi		a	b
Ni	17	26	9.3	12	10 à 80	40	180
Cr	55	64	24	31	60 à 300	65	230
Sb	1.6	2.1	0.64	1.6	1	-	-
Se	<0.01	4.5	<0.01	<0.01	-	-	-
Mn	382	465	341	383	500 à 2000	-	-
Hg	4.6	7.3	8.7	9.9	0.20	1.6	15
As	1.8	12	1.4	1.8	10 à 30	22	100
Pb	11	27	8.6	12	50	70	1150
Cd	0.14	0.28	0.08	0.17	1	1	8
Cu	18	30	9.3	12	15 à 30	50	210

Tests de relargage de bétons

Fractions lixiviées par le béton en fonction de la teneur en métaux lourds dans le ciment									
Elément	Teneur totale apportée par le ciment dans un cube (en mg)			Quantité relarguée par un cube après 64 jours (mg)			Fraction lixiviée (en % de la teneur sur ciment)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Ni	16.1	14.4	17.9	0.037	0.106	0.107	0.228	0.734	0.597
Cr	28.2	18.1	23.6	0.111	0.052	0.082	0.392	0.286	0.346
Sb	2.1	5.2	0.6	0.014	0.026	0.004	0.680	0.498	0.613
Se	1.0	1.8	2.0	0.000	0.004	0.010	0.000	0.199	0.495
Mn	446	316	298	0.002	0.001	0.003	0.001	0.000	0.001
Hg	0.2	0.00	0.01	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.132
As	1.5	1.2	2.3	0.000	0.001	0.003	0.006	0.122	0.110
Pb	22.3	12.5	6.1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cd	0.3	0.4	0.2	0.000	0.000	0.000	0.052	0.008	0.166
Cu	8.4	11.4	5.9	0.001	0.000	0.000	0.017	0.000	0.002

Un cube fait 100 mm de côté

Eaux et relargage des bétons

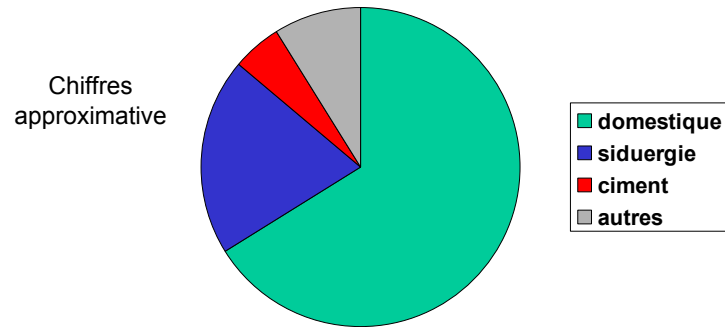
Taux maximum de relargage par le béton comparés aux teneurs d'eaux minérales commerciales et aux limites pour l'eau potable (selon NEN 7345,en µg/l).					
Elément	Béton de CEM I	Béton de CEM III/A	Eau de source	Eau minérale naturelle	Limite réglementaire pour l'eau potable 98/83/CE
Ba	143	76	50	202	-
Ni	3.4	2.7	4.0	24	20
Cr	6.2	2.0	43	44	50
Sb	0.15	0.30	0.60	1.8	5
Se	<0.57	<0.57	<0.57	<0.57	10
Mn	<0.06	0.15	3.0	44	50
Hg	0.29	<0.019	0.070	0.21	1
As	0.02	0.036	0.20	19	10
Ag	0.011	0.007	<0.005	<0.005	-
Zn	0.17	0.078	17	18	-
Pb	0.15	<0.002	<0.011	0.90	10
Cd	0.025	<0.011	0.064	0.22	5
Cu	0.19	0.16	1.9	3.8	2000

Emissions

- **Domaine dans laquelle il y a un grand progres durant les 15 à 20 dernières années.**
- **Une usine typique, quelques tonnes de poussières par année reduites à quelque kilos**

CO₂

- L'émission du CO₂ est une partie intégrale de la production
- Calcaire, CaCO₃ → CaO, puis combinaison en silicates et aluminates



Possibilités de réduction du CO₂

- Economie de combustibles
- Réduction du contenu en CaO du clinker
- Diminution du contenu clinker du ciment (SCMs)
- Augmentation de la durabilité du béton

Références

- Materials in Construction, G.D. Taylor, 3rd ed. 2001

Introduction au Technologie du Béton (Concrete Technology)

Production Annual millions of tonnes

	<i>Béton</i>	<i>Acier</i>	<i>Bois</i>	<i>Plastiques</i>	<i>Papier</i>
France :	170	20	22	7	6
USA :	800	94	250	76	69
Monde :	> 10 000	700			

1 tonne per personne per année!

Pourquoi?

- Disponibilité** - Mat. 1ere partout dans la monde
faible coût énergétique
- Transportable** - poudre grises en sac ou en vrac
- Constructible** - adjoindre l'eau et malaxer
- Flexible** - remplir toutes les formes
avec une différence de volume très faible
- Durable** - pour les siècles
surtout résistant à l'eau,
barrages, tuyaux, etc

et à bas prix!

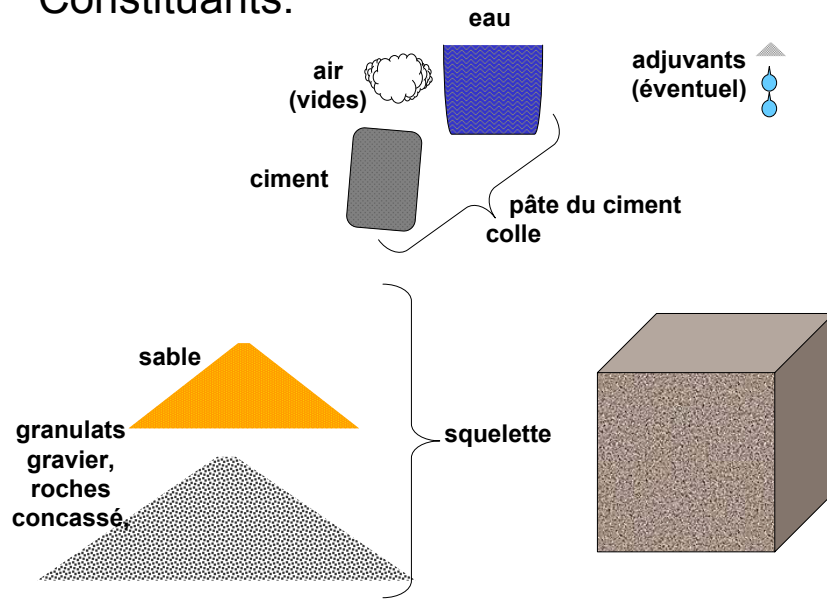
Quelques définitions

Un béton

Granulats + colle = béton si $\phi > 8 \text{ mm}$
mortier si $\phi < 8 \text{ mm}$

Pâte de ciment = eau + ciment
Mortier = eau + ciment + sable
Béton = eau + ciment + sable + granulats

Constituants:



Un béton est composé de:

- un squelette, les granulats
- une colle, les pâte du ciment
- la liaison (l'interface) entre les deux

sa qualité dépend de la qualité de tout les trois

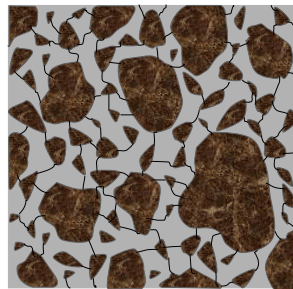
Les granulats:

Les granulats sont nettement moins cher que le ciment ~5x

Mais on ne peut pas faire une pâte du ciment dans une large section sans qu'il se fissure



Les granulats limitent la longueur des fissures: plus de fissures, mais plus fin et plus court



Squelette granulaire

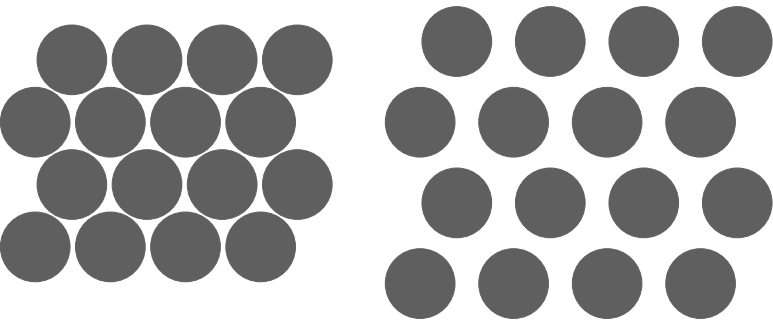
On veut minimiser la quantité de pâte du ciment:

- plus économique
- moins de phase dans laquelle l'eau peut pénétrer

mais

la pâte du ciment doit remplir les espaces entre les granulats: et fluidifier le béton pendant le malaxage et la mise en place

Empilement des grains mono-taille:



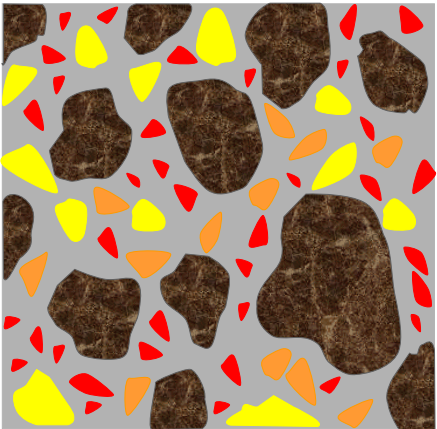
Densité maximal ~74%

Mais difficile à déformer:
frottement entre les grains

Il faut espacer les grains
densité max. pratique ~60%

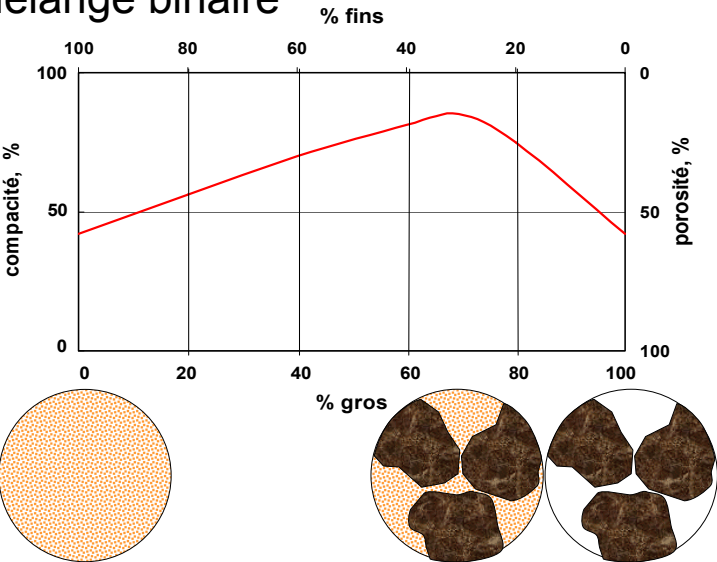
Empilement plus efficace avec une distribution des tailles:

Les petits peuvent remplir
les espaces entre les grand

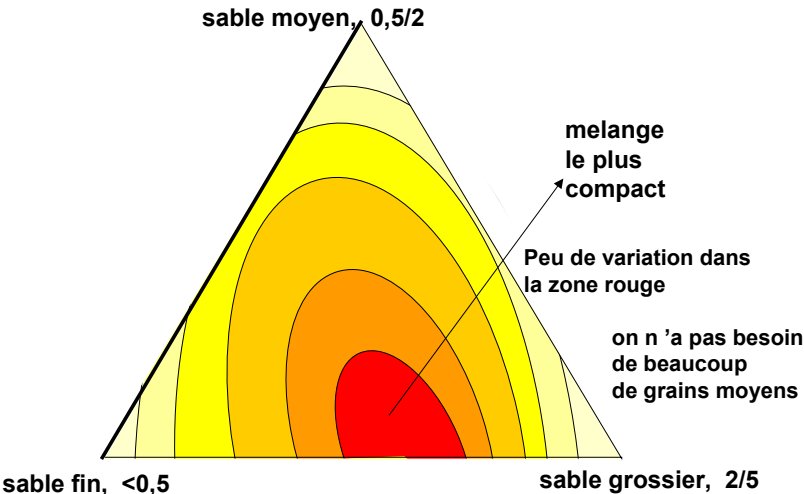


(connu par les romans)

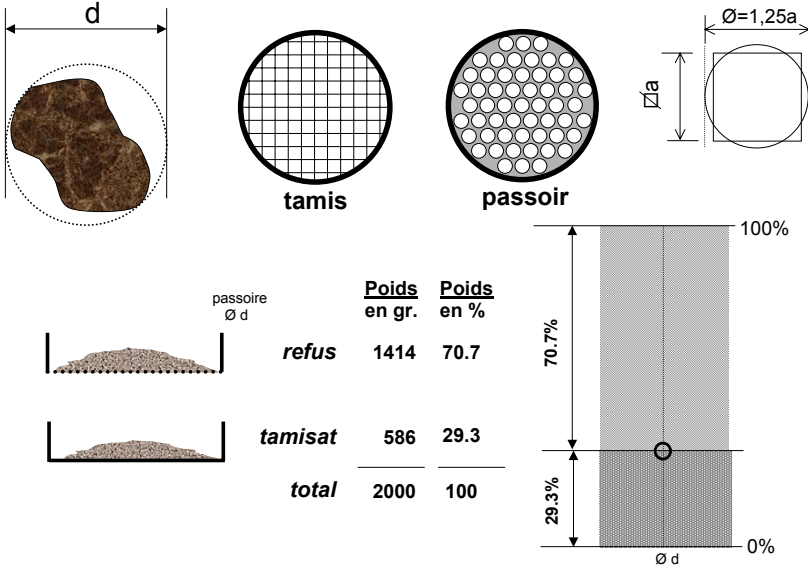
Mélange binaire



Mélanges ternaire (Ferret 1890s)



Melanges continus

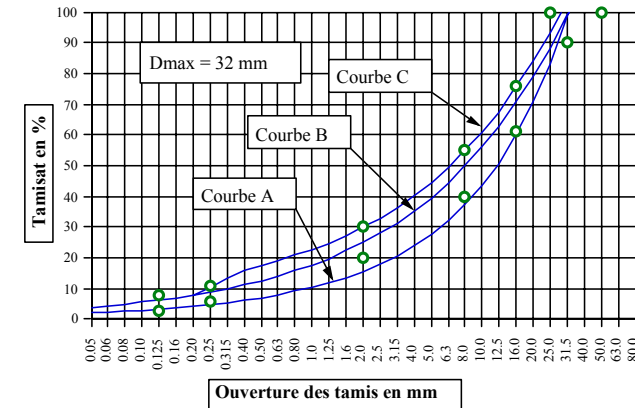


Mélanges continus

A. $p = 50 \left(\frac{d}{D_{\max}} + \sqrt{\frac{d}{D_{\max}}} \right)$ B. $p = 100 \sqrt{\frac{d}{D_{\max}}}$

C. 5% au-dessus de B. au-delà de $d=0.4$ mm

p : % des tamisat cumulés
d : diamètre granulat considéré
 $D_{\max}$: diamètre maximum des granulats



Granulats - exigences (1)

Les granulats doivent:

1) être stables et durables:

- résistants à des cycles gel-dégel
- résistants à des cycles mouillage-séchage
- résistants à des cycles de température
- résistants à l'abrasion
- résistants aux actions chimiques

Ils doivent donc être compacts et non réactifs

⇒ *stabilité du béton*

2) posséder résistance et dureté:

⇒ *résistance du béton*

Granulats - exigences (2)

Les granulats doivent:

3) être propres:

- pas d'argiles (instable cycles mouillage-séchage)
- pas d'impuretés

⇒ *adhérence granulats / pâte*

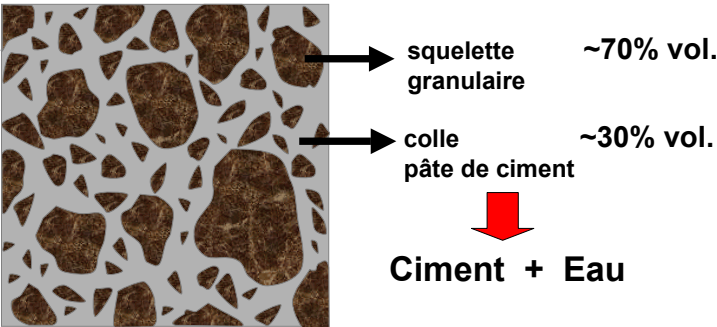
4) donner un mélange compact:

- forme correcte
- bonne granulométrie
- teneur en éléments fins limitée

⇒ *réduction du volume de ciment*

Matèires nuisibles à eviter dans les granulats

Matèires nuisibles	Effets
les éléments gélifs	granulats poreux et tendres
le gypse l'anhydride la pyrite	attaque par sulfate
le charbon les scories	peu résistants ; contiennent parfois du soufre
les impuretés organiques le bois les végétaux	putréfaction, instabilité de volume selon l'humidité
les matières humiques les sucres ou limonades	retardent ou empêchent la prise



$$\frac{\text{poids}_{\text{eau}}}{\text{poids}_{\text{ciment}}} = e/c$$

Espacement des grains de ciment

et l'interface pâte granulats!!!

La pâte de ciment doit remplir les espaces entre les granulats

Granulats
~70%
(60-80)

Pâte du ciment
~ 30%

eau

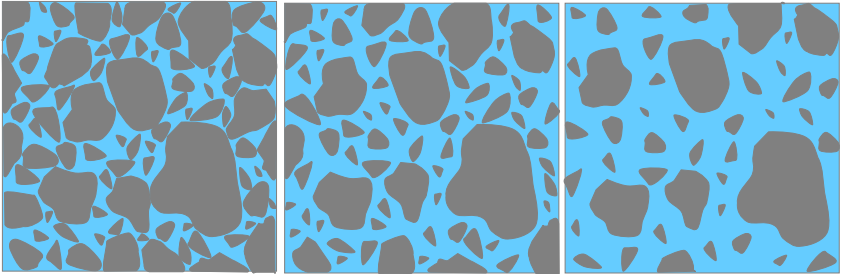
ciment

Quand le $e/c \downarrow$, il faut augmenter « le dosage en ciment » pour garder le même volume de pâte qui donne la fluidité du béton

Normalement les formulations de béton sont exprimés en poids pour faire **1m³**

Rapport e/c

La quantité d'eau ajoutée contrôle l'espacement des grains de ciment

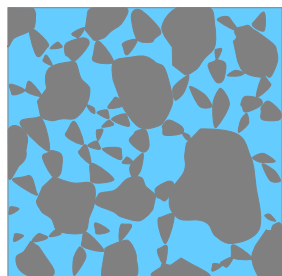


e/c bas
ex. 0.3
vol ciment ~ 50%

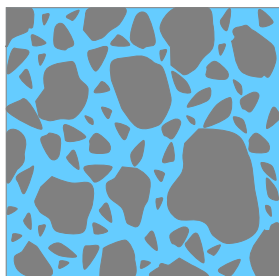
e/c moyen
ex. 0.45
vol ciment ~ 40%

e/c élevée
ex. 0.6
vol ciment ~ 35%



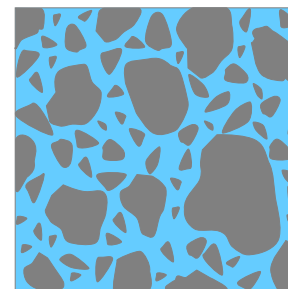


l'état floculé

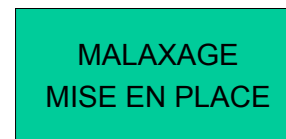


l'état defloculé
dispersée

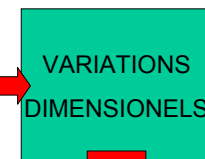
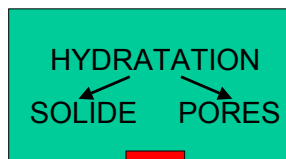
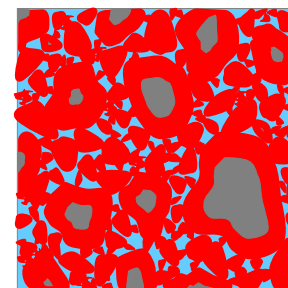
L'état de floculation influence beaucoup la « rhéologie »



frais



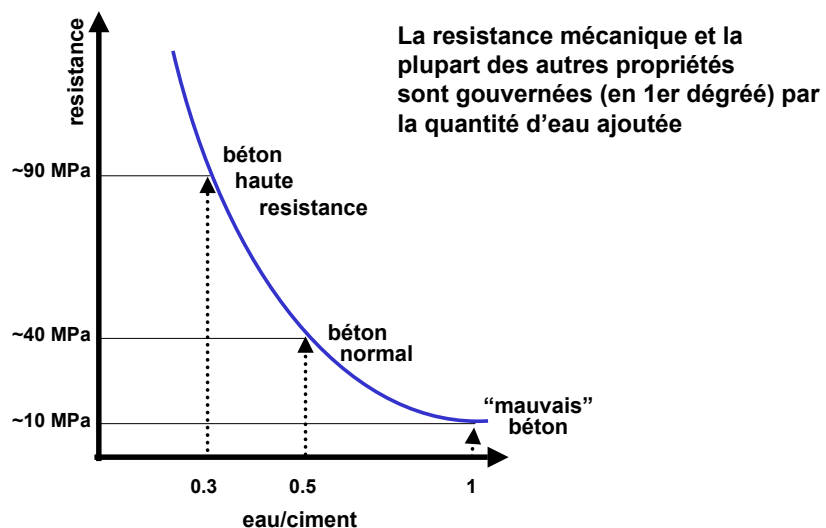
l'eau ajoutée,
e/c
rhéologie,
adjuvants



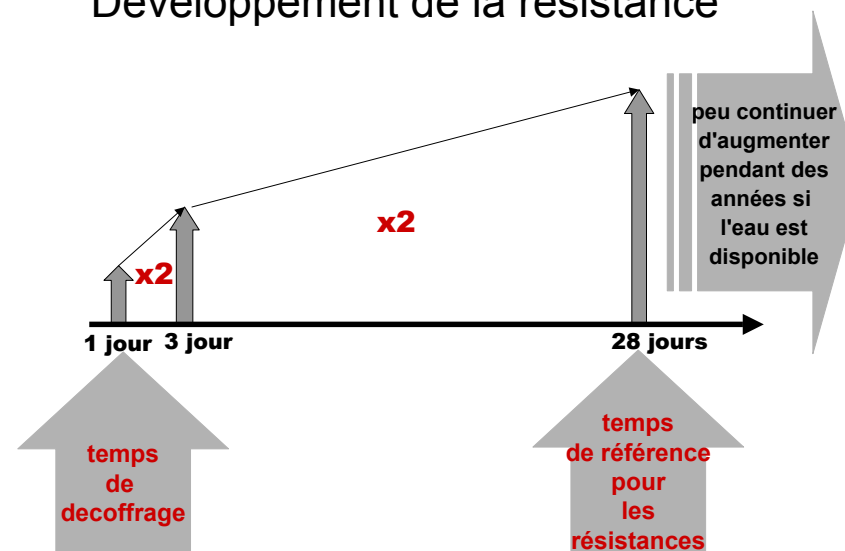
résistance mécanique
durabilité

fissuration

durcie



Développement de la résistance



Fabrication du ciment

1824, Joseph Aspdin en Angleterre, fabrique et brevète une chaux hydraulique à laquelle il donne le nom de ciment Portland, car sa couleur, après prise, ressemble à la pierre de Portland.

1835, Issac-Charles Johnson qui travaille dans une usine de ciment, observe que les morceaux trop cuits donnent, après mouture, un meilleur ciment. Il augmente la température de cuisson et donne naissance au véritable ciment Portland.

1838, William Aspin produit le ciment Portland à côté de la Tamise et convainc Brunel de l'utiliser pour réparer son tunnel sous la Tamise – la 1ère utilisation du ciment Portland dans le génie civil.



Note historique, 1

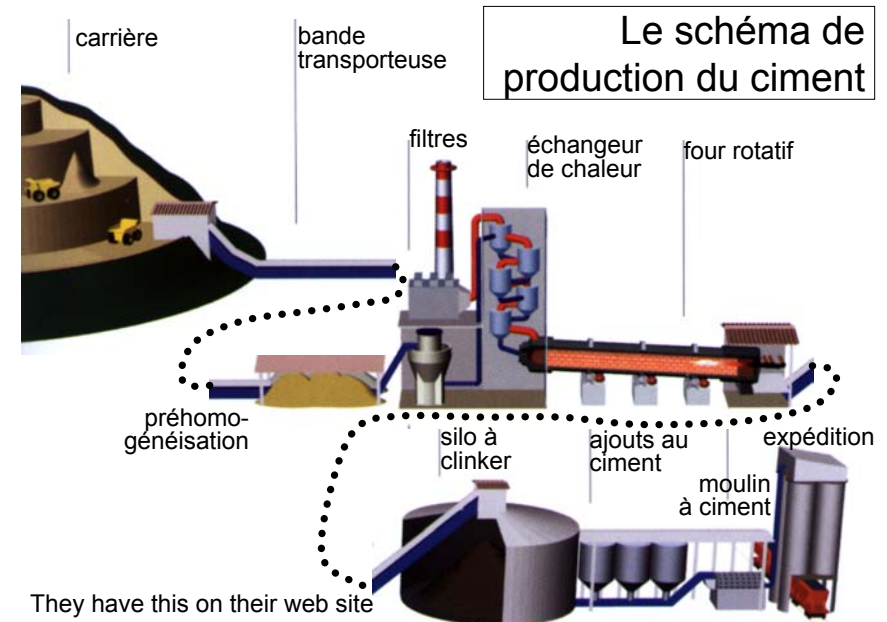
La chaux, connue depuis l'antiquité:
 $\text{CaCO}_3 \Rightarrow \text{CaO} \Rightarrow \text{Ca(OH)}_2 \Rightarrow \text{CaCO}_3$
 Elle ne prend pas sous eau



1756, Smeaton en Angleterre, découvre que les chaux qui présentent les meilleures propriétés « hydrauliques » sont celles contenant des matières argileuses

1796, Parker en Angleterre, développe le ciment « Roman » en calcinant certains gisements naturels de calcaire argileux

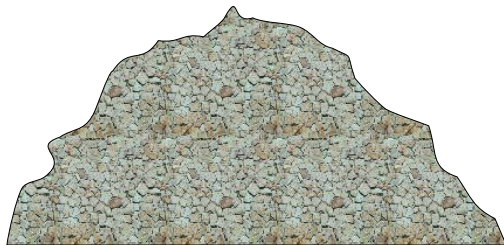
1813-28, Vicat en France, met en évidence le rôle de l'argile et fabrique un ciment à partir d'un mélange intime de calcaire et d'argile.





Pay back on investment
Choice of quarry
Presence of minor elements

Cru



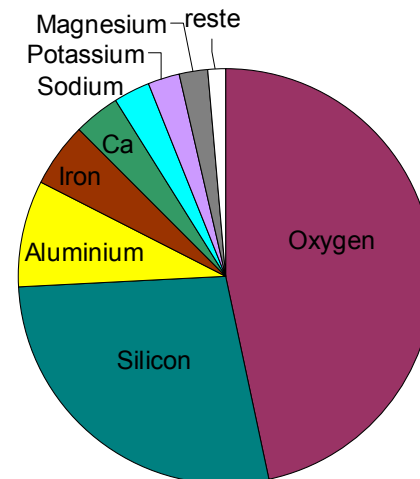
~80% roches calcaires
Jusqu'à 95% CaCO_3
~55% CaO
impuretés majeures MgO
bonne source de calcaire
détermine emplacements
des usines de ciment



20% source de SiO_2 qui
amène aussi Al_2O_3 et Fe_2O_3
argiles, etc.

dans certains cas, il faut
mélanger les sources pour
obtenir la chimie correcte

Composition de croûte terrestre



- Grande abondance des éléments nécessaires
- Malgré la quantité plus faible de calcium, cet élément est fortement concentré dans les roches calcaire, bien réparti

Composition

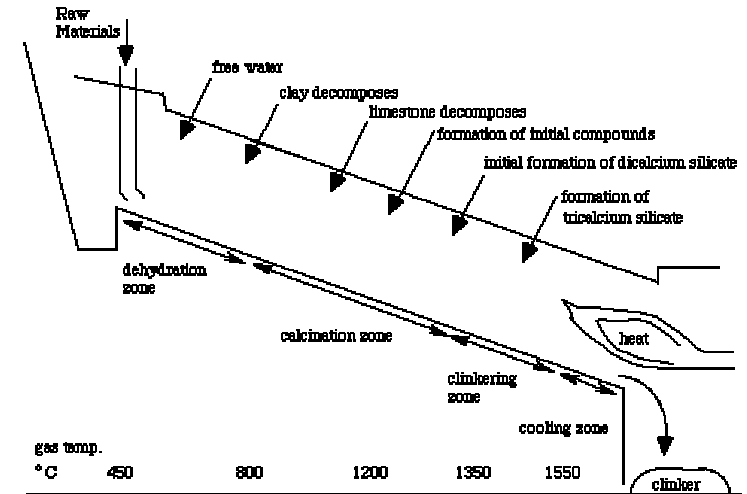
Les **éléments** constitutants : O, Si, Ca, Al, Fe



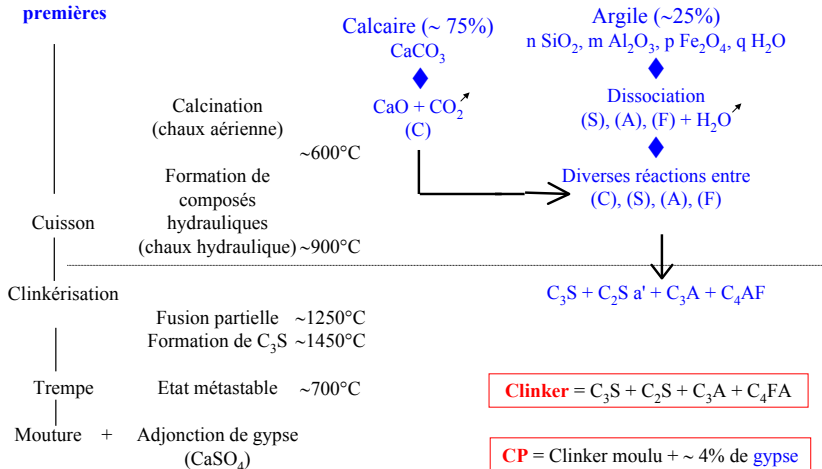
Les **oxydes** constitutants : CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3
Abréviations **C** **S** **A** **F**



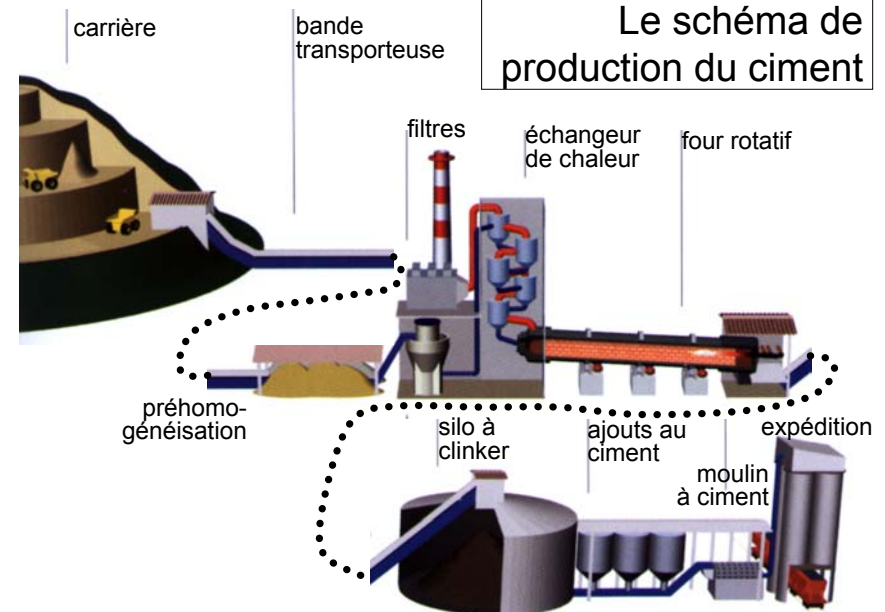
Les **phases** constitutantes : **C_3S** , **C_2S** , **C_3A** , **C_4AF** (ferrite ss)
 Ca_3SiO_5 , Ca_2SiO_4 , $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$, $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})\text{O}_5$



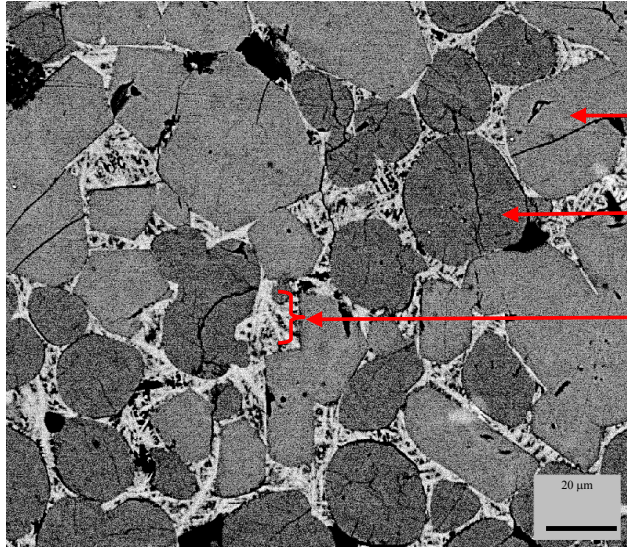
Matières premières



Le schéma de production du ciment



Microstructure de clinker « idéale »

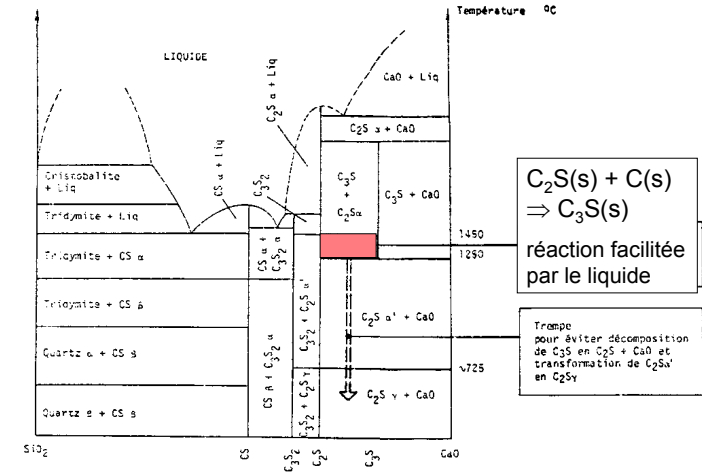


« alite »
 C_3S , impure

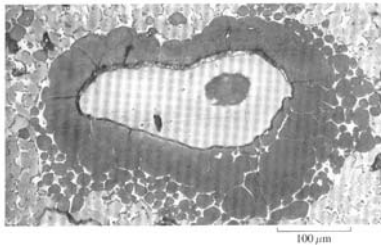
« belite »
 C_2S , impure

phases
« interstitielles »
« celite »
 C_3A , impure
+ solution
solide de ferrite
« C_4AF »,
liquide pendant
la cuisson

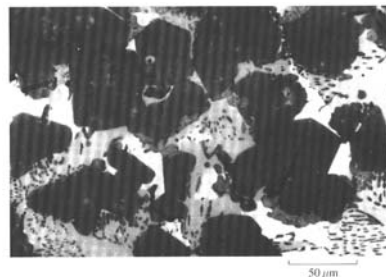
diagramme d'équilibre SiO_2 - CaO



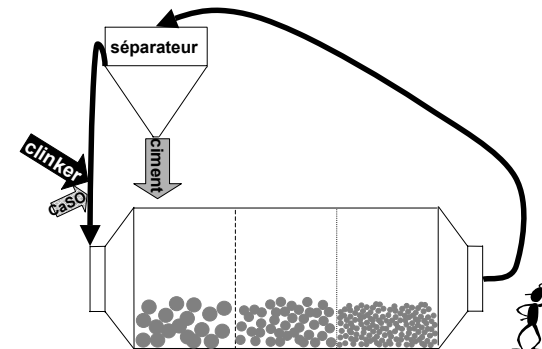
Problèmes possibles d'homogénéité et refroidissement trop lent



Put some labels



Broyage



2 ou 3 compartiments

Toujours
Ajout de $CaSO_4 \cdot H_2O$:
(4 – 8%)
• gypse ($x=2$)
• anhydrite ($x=0$)
déshydratation
à plâtre ($x=0,5$)
possible

Souvent
Ajout de $CaCO_3$ fin:
(10-20%)
Filler fin

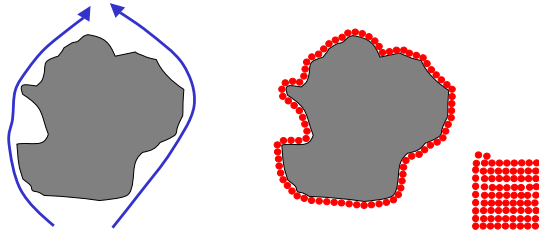
Aussi possible
Laitier (slag)
Cendres volantes (fly ash)
Fumée de silice (silica fume)

Broyage

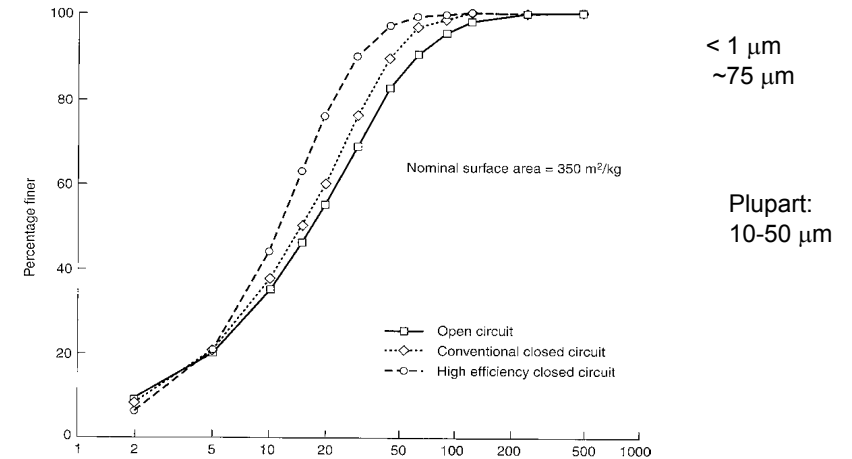
Controlé par surface spécifique « Blaine »
Perméabilité à l'air

Gamme normale	320-370 m ² /kg
Ciment résistance rapide	400 – 500
Ciment pétrolier	220 - 300

320m²/kg Blaine ~ 800-1000 m²/kg absorption azote

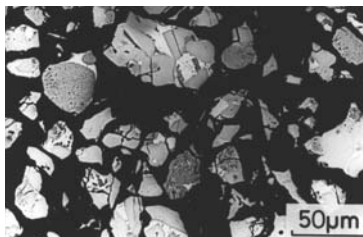
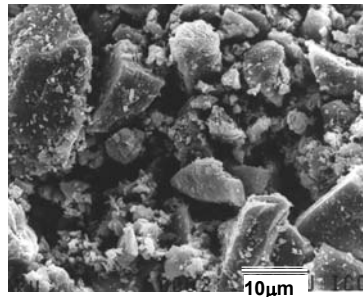


Granulométrie – psd (particle size distribution)



Source: Bye « Portland Cement », Thomas Telford 1999

Grains du ciment



Packaging

sac



Big bag



vrac



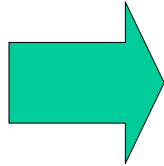
Caractérisation du ciment

Analyse oxyde (XRF)

SiO ₂	20,5	(19 – 21)
Al ₂ O ₃	6	(4-7)
Fe ₂ O ₃	2,5	(2-3)
CaO	64	(62-65)
* MgO	1,2	(1-4)
SO ₃	2,8	(2,5-3,2)
K ₂ O	0,5	(0,3-1)
Na ₂ O	0,2	(0,2-0,5)
PaF(LOI)	1	(1-2)
* CaO libre	1	(0,5-1,5)
resid insol	0,3	(0,2-0,4)

+Mn₂O₃, TiO₂, P₂O₅, CO₂

* Contrôle strict pour éviter le gonflement



C3S	?
C2S	?
C3A	?
Fss	?

Calcul « Bogue » composition des phases «potentielles»

Tous Fe₂O₃ comme C₄AF:
CaO et Al₂O₃ qui va avec



Al₂O₃ qui reste comme C₃A:
CaO qui va avec



CaO qui reste – CaO libre



Solution de deux
équations simultanées
pour C₃S et C₂S

C₄AF = 3,04Fe₂O₃

C₃A = 2,65Al₂O₃ – Fe₂O₃

C₃S = 8,60SiO₂ + 1,08Fe₂O₃ + 5,07Al₂O₃ – 3,07CaO

C₂S = 4,07CaO + 7,60SiO₂ – 1,43Fe₂O₃ – 6,72Al₂O₃

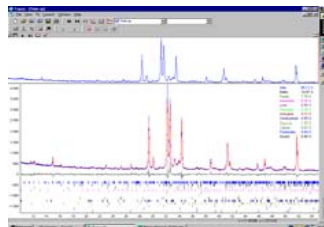
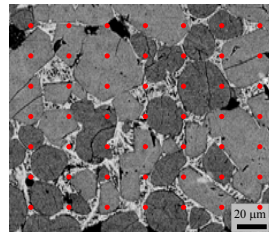
Mais: – Bogue = Bogus?

Solution solide
Réactions incomplètes

Quelles autres méthodes:

Microscopie, « point counting »
Très longue

Diffraction des rayons X,
-problème de solution solide
-Recouvrement des peaks



Solution solides

substitution atomique typique

C3S	ions Ca	2% Mg, 1% Fe, 0,5%Na
	ions Si	4% Al, 1% P
C2S	ions Ca	1% Mg, 1,5% K, 0,5% Na
	ions Si	7% Al, 2% Fe, 1% P
C3A	ions Ca	8% K, 3% Mg, 2% Na, 1%Ti
	ions Al	10% Fe, 10% Si
Ferrite	ions Ca	<1%(K,Na)
	ions (Al,Fe)	30-45% Fe, 35-50% Al,
		10% Mg, 7% Si, 3% Ti, 1% Mn

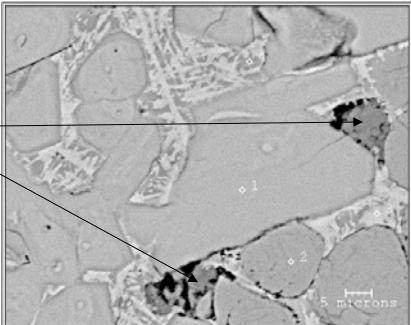
Écarts typiques

BOGUE QXDA		
C ₃ S	59	67
C ₂ S	13	15
C ₃ A	9	5
« C ₄ AF »	9	6

Phases mineur

MgO, entre en solution solid, jusqu'à ~3-4%
>3-4% formation du periclase, MgO, peut donner du gonflement

Les alcalis (K et Na),
combine de préférence
avec le sulfate (clinker)
Dans les pores du
clinker



Types de ciment

Résistance précoce High early strength	SA↑ , C ₃ S↑, C ₃ A↑, (alk↑)	R1j ~2x
Basse chaleur Low heat	SA↓ , C ₃ S↓, C ₂ S↑, C ₃ A,alk↓)	R1j ~0.5x
Résistance au sulfate (eau de mer) Sulfate resisting	C ₃ A < 4% (bogue)	R1j ~0.7x
Ciment blanc White cement	Fe ₂ O ₃ ~ 0	

ajustement du cru, choix de carrière

Classification des principaux types de ciments
selon ENV 197-1

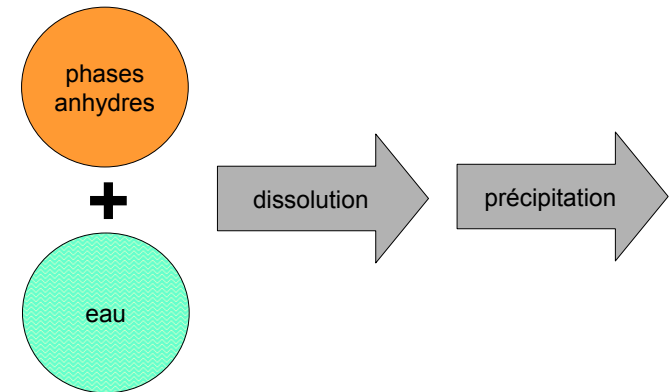
Type	Désignation Ciment	Notation	Composition en % massique		
			Principaux		Secondaire
			Clinker	Ajout	
I	Portland	I	95-100	0	0-5
II	Portland au laitier	II / A-S II / B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	0-5 0-5
	Portland à la F.S.	II / A-D	90-94	6-10	0-5
	Portland au calcaire	II / A-L II / B-L	80-94 65-79	6-20 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

Gamme des ciments en Suisse romande

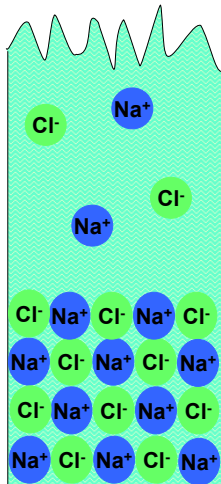
Désignation	
Commerciale	Selon ENV 197-1
NORMO 3	CEM I 32.5
NORMO 4	CEM I 42.5
NORMO 5 R	CEM I 52.5 R
FLUVIO 3 R	CEM II / A-L 32.5 R
FLUVIO 4 R	CEM II / A-L 42.5 R
ALBARO 5	Ciment blanc CEM I 52.5
PROTEGO 3 L HS	CEM II / A-L 32.5 HS
PROTEGO 4 HS	CEM I 42.5 HS
FORTICO 5 R	CEM II / A-D 52.5 R
FORTICO 5 HS	CEM II / A-D 52.5 HS
MODERO 3	CEM III / C 32.5

Chimie d 'hydratation

Hydratation

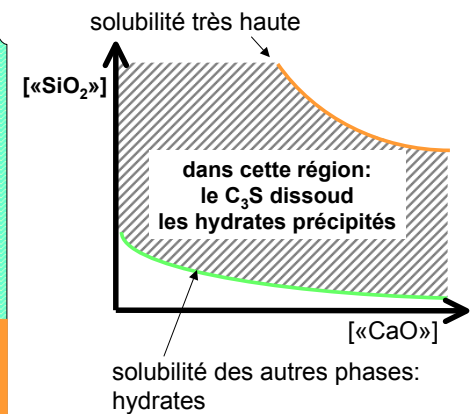
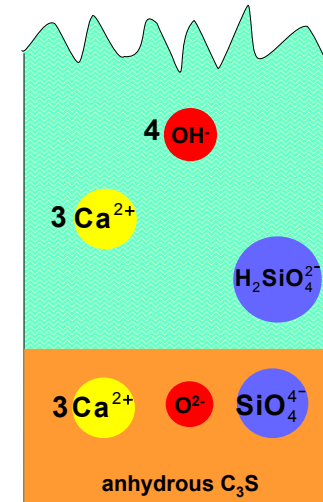
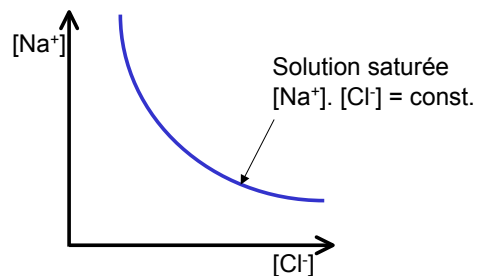


Dissolution -

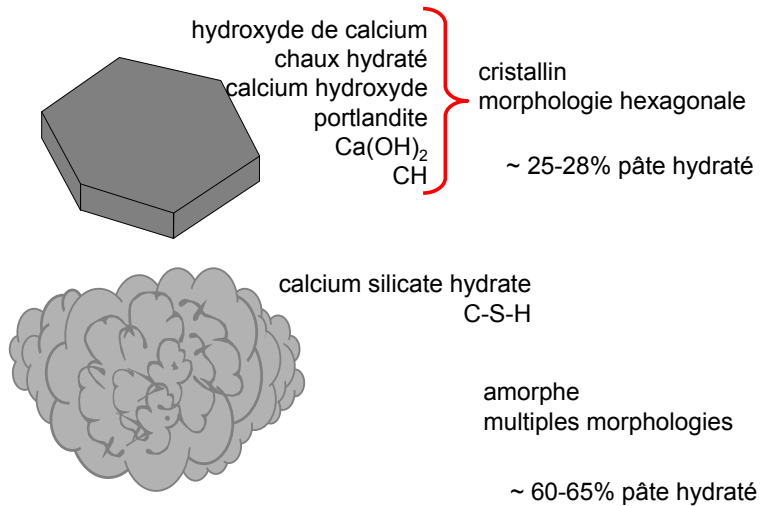


Ex. sel de table:
les ions dans un solide entré en solution.

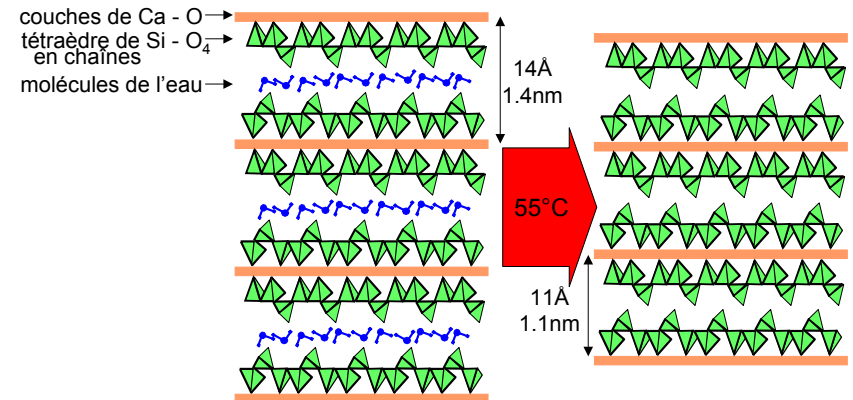
Il y a une « **limite de solubilité** »
au delà de laquelle la solution est
« **saturée** »



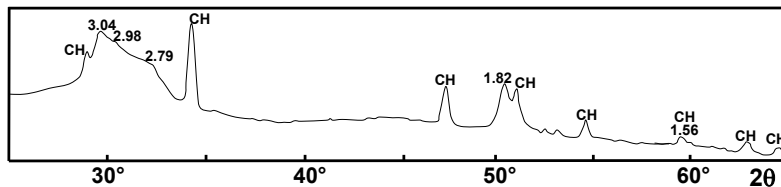
Hydrates de C_3S



C-S-H, similarité à minéral Tobermorite



C-S-H preuve expérimentale



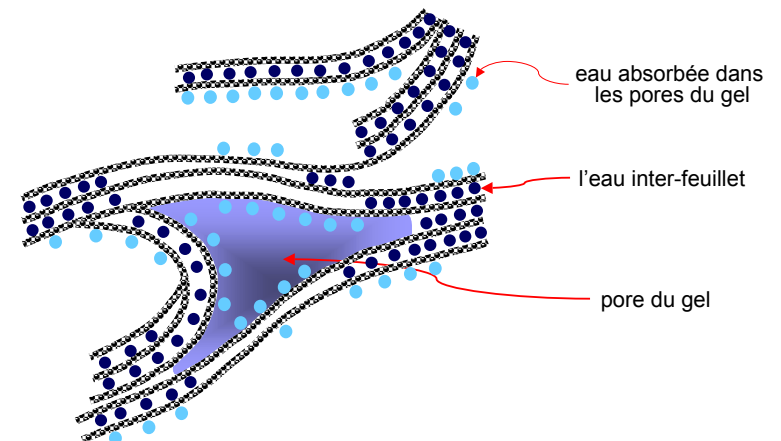
Diffraction des rayons X (DX ou XRD):
bosse + plus piques épaisse, indique l'ordre dans les couches Ca-O

Trimethyl silation + NMR:
Chaînes de silice, 2, 5, 8 – formation de dimers, puis tétraèdre pontant

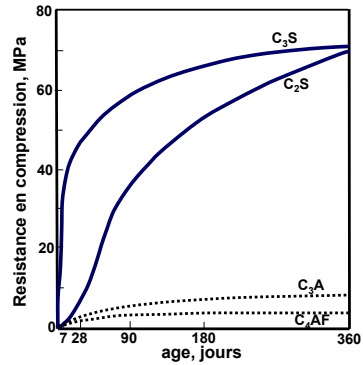
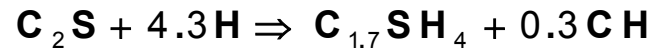


Études d'absorption, etc:
À l'état de saturation il y a 4 H par S, à 11% 2, qui correspond à l'eau inter-feuillet

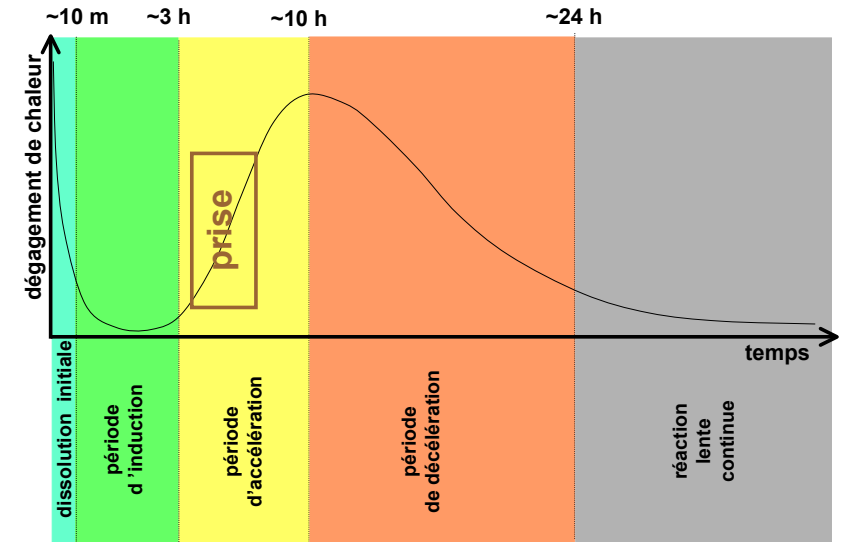
Modèle – « gel C-S-H »



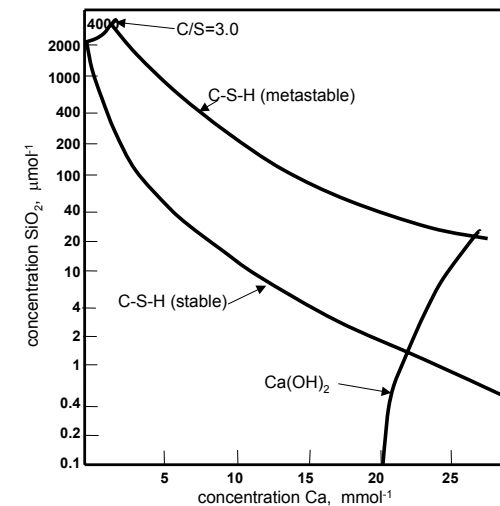
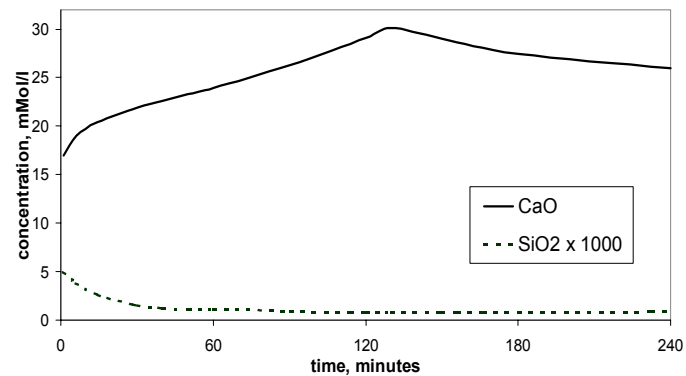
Réactions globales

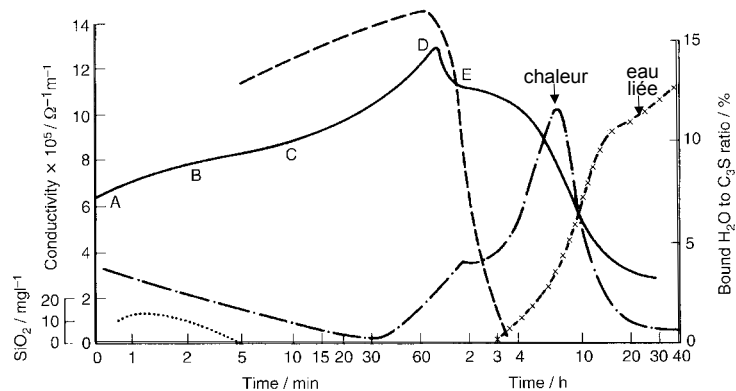


Cinétique



Variation des concentrations en solution





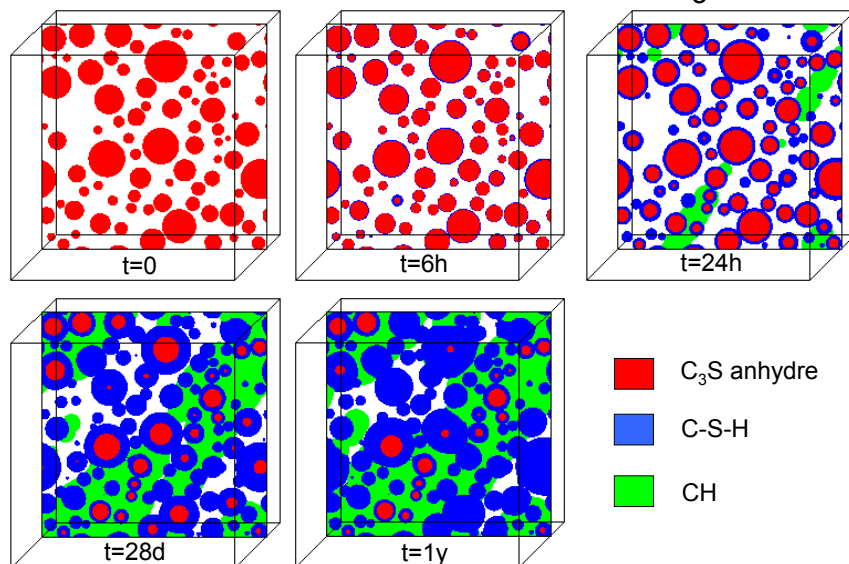
3 hrs



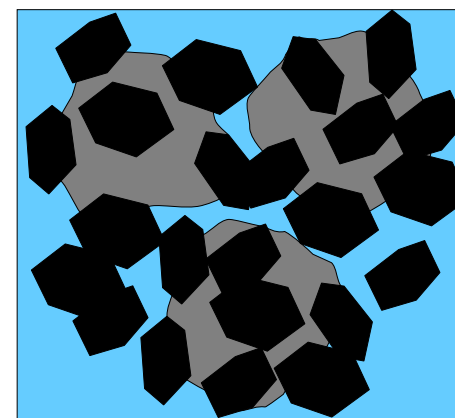
10 hrs

Source: Bye « Portland Cement », Thomas Telford 1999

Simulation de microstructure de C₃S



C₃A



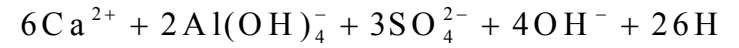
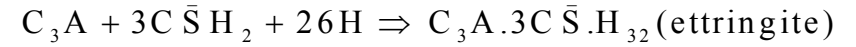
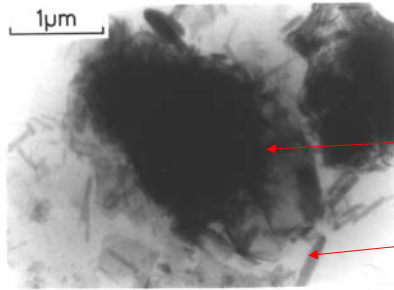
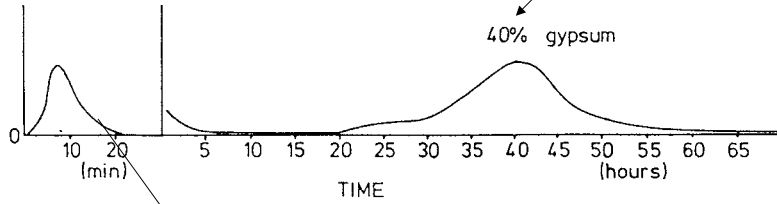
C₃A
+
eau

réaction rapide
grandes plaques
d'hydrates

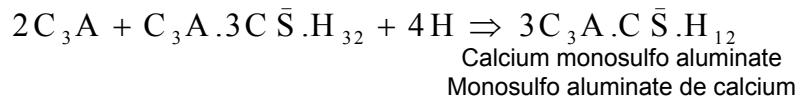
rigidification
« prise flash »
« flash set »



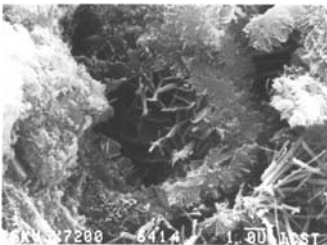
formation de « monosulfo »



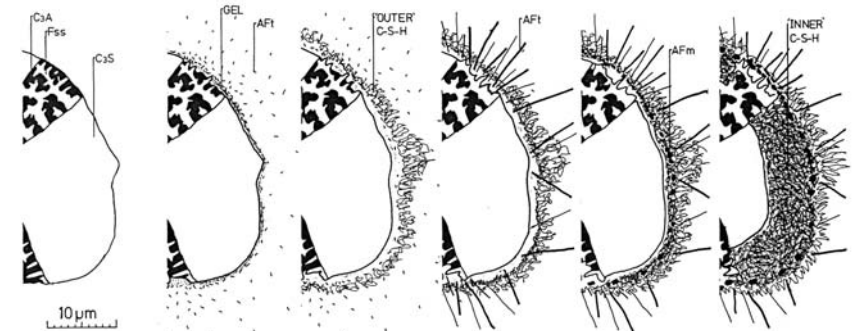
Épuisement du sulfate



À température ambiante « monosulfo » et seulement métastable
Il peut se former seulement en présence de C_3A anhydre



Pâte à 7 jours
Formation local de monosulfo à l'intérieur des couches de C-S-H ou il y a du C_3A disponible.
L'ettringite reste à l'extérieur du grain.



a) Grain du ciment anhydre – multiphase

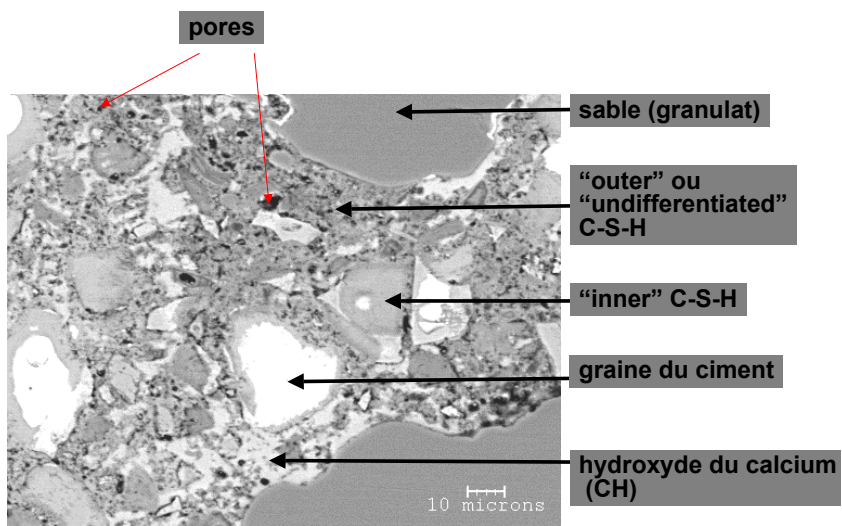
b) ~10 min
Reaction rapide du C_3A avec le sulfate et le calcium de la solution, formation de « couche bloquante » et ettringite en solution

c) ~10 h
Reaction du C_3S donne « outer product » C-S-H qui forme une « coquille » séparée du grain

d) ~18 h
Reaction secondaire du C_3A donnant des longues aiguilles d'ettringite

e) ~1-3 j
formation du « monosulfo » à l'intérieur d'une coquille de C-S-H à partir du C_3A et de l'ettringite

f) ~14 j
formation du « inner product » C-S-H

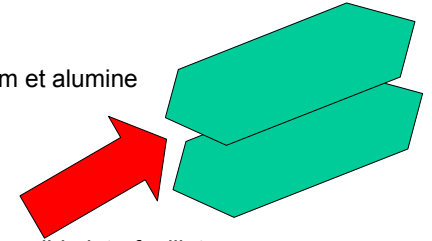


Complexe, Hétérogène

Phases AFm

AFm=aluminoferrite mono⁺⁺⁺

Cristaux avec feuilles de calcium et alumine

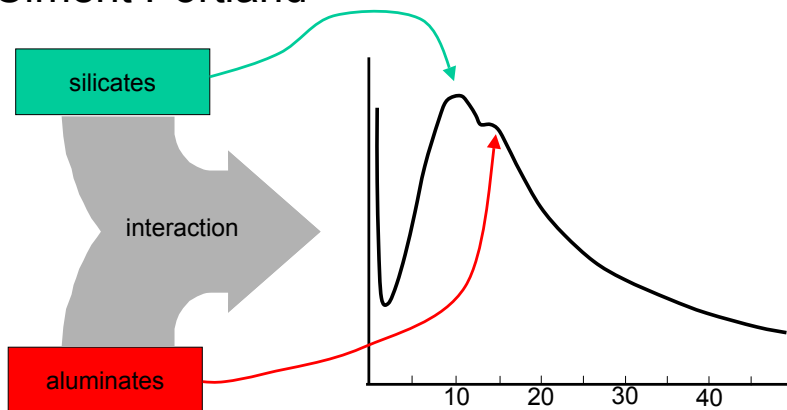


Beaucoup de ions differents possible interfeuille:

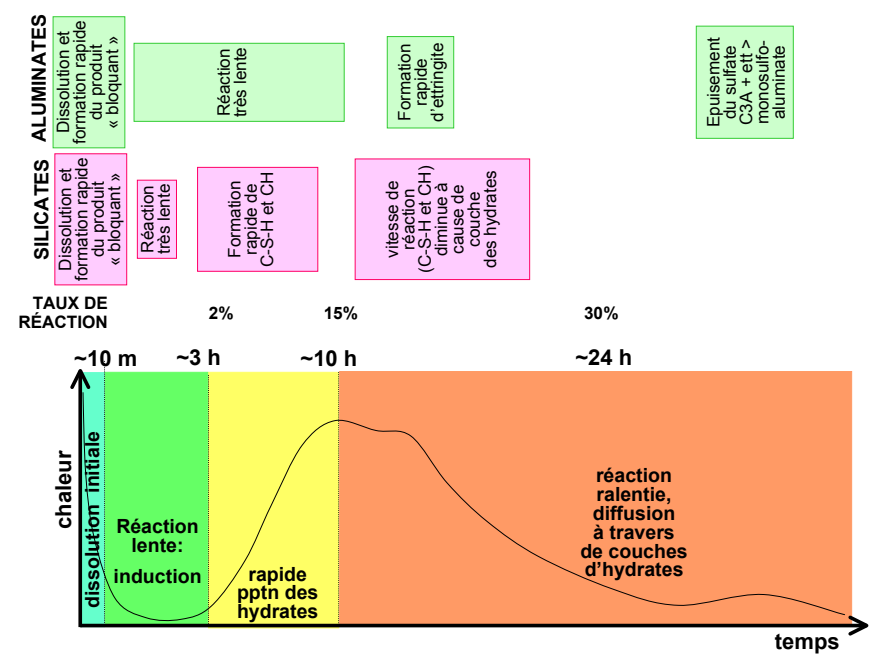
- Sulfate $\times$ monosulfo
- Carbonate $\times$ hemicarbonate, monocarbonate
- Hydroxide $\times$ C_4AH_{13}
- Silicate + Aluminate $\times$ stätlingite, C_2ASH_8
- Etc

- Beaucoup de possibilités de solution solides possible

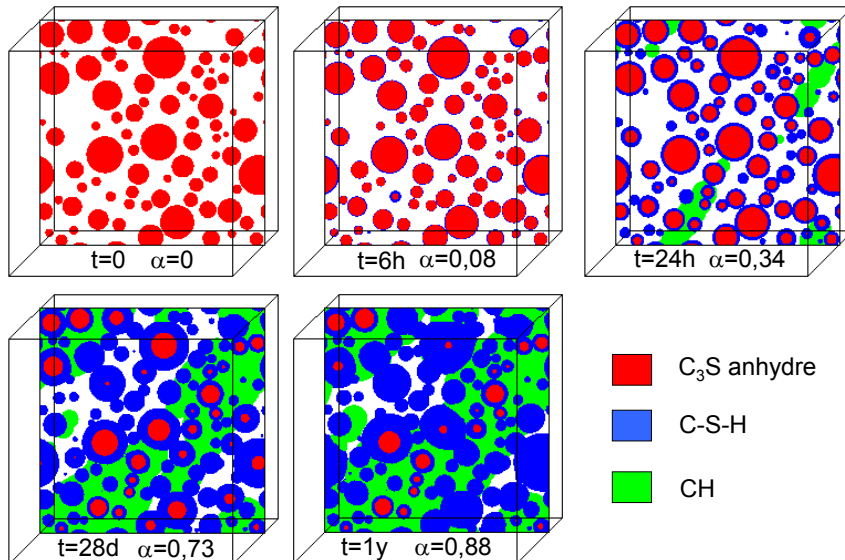
Ciment Portland



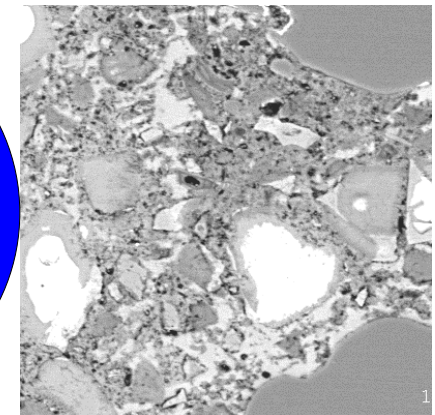
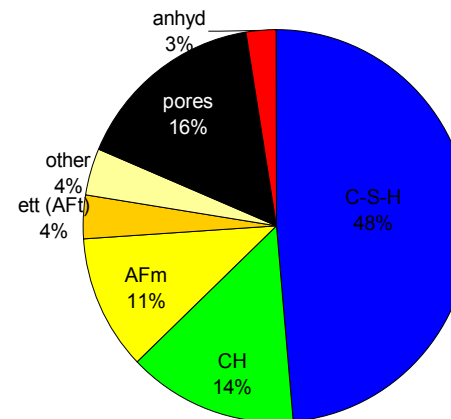
Résumé de l'hydratation



Simulation de microstructure de C_3S



Bilan Volumétrique



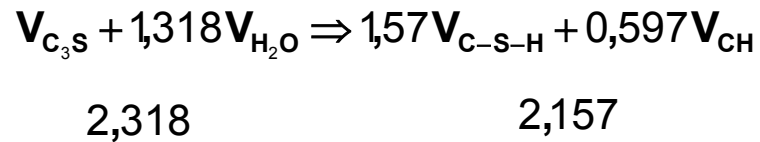
Pâte de ciment Portland, e/c = 0,5, 14mois

Structure Physique d'une pâte de ciment

Importance de la structure physique:

- Résistance mécanique
- Comportement vis-à-vis de l'eau;
- Durabilité

Changements volumétrique

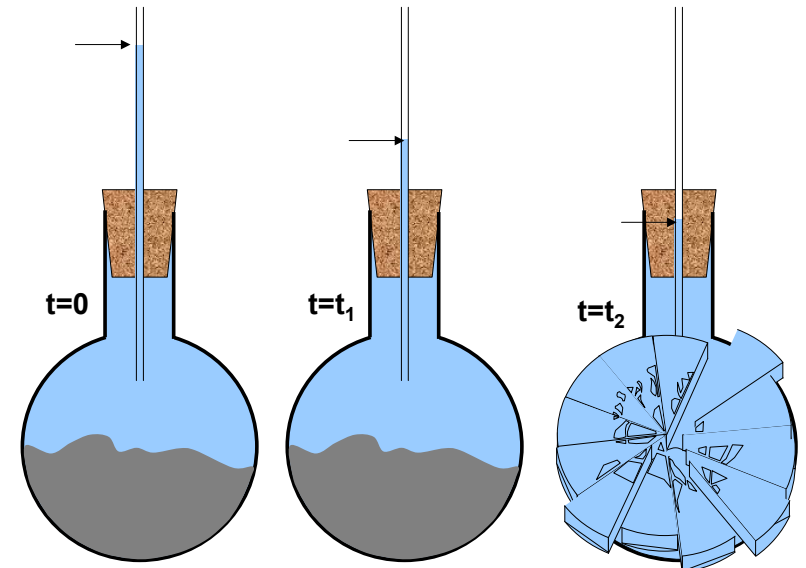


Volume du solide augmente, mais le volume total diminue:

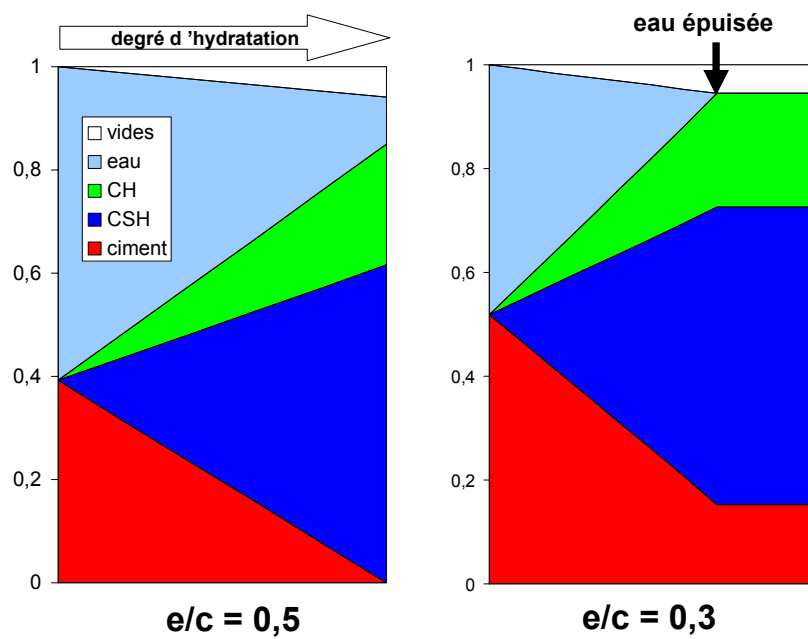
Contraction Le Chatelier:

$$\Delta V = \frac{0,161}{2,318} \approx 7\%$$

Valeurs entre
5 et 10%
en fonction des
assumptions



À terme un léger gonflement



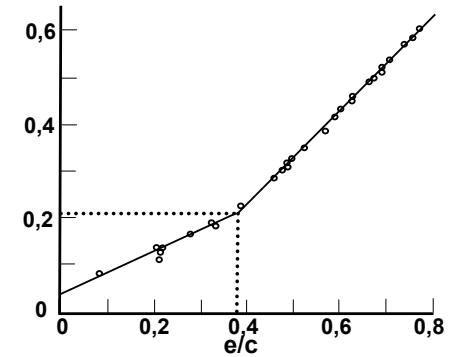
Eau minimum pour hydratation complète

Donnée empirique - travail de Powers *et al.* 1950s & 60s

$$e/c \text{ min} = 0,38$$

$$e_{\text{resat}}/c = 0,44$$

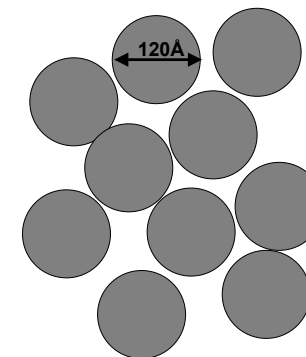
$$\text{kg eau liée par kg ciment} = 0,227$$



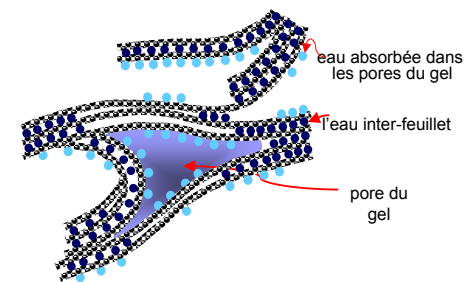
Particularité de la porosité d'une pâte de ciment:

- Gel du C-S-H
- Surface spécifique 100 - 700 m²/kg
- porosité « intrinsèque » ~28%

Modèle – « gel C-S-H »



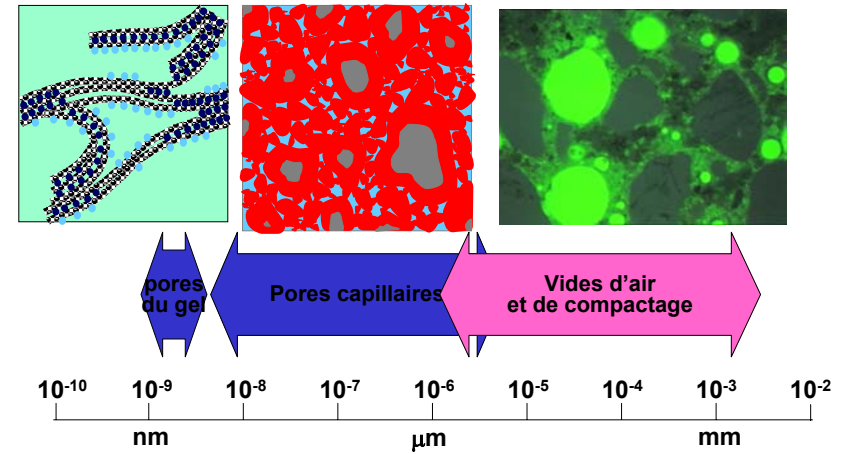
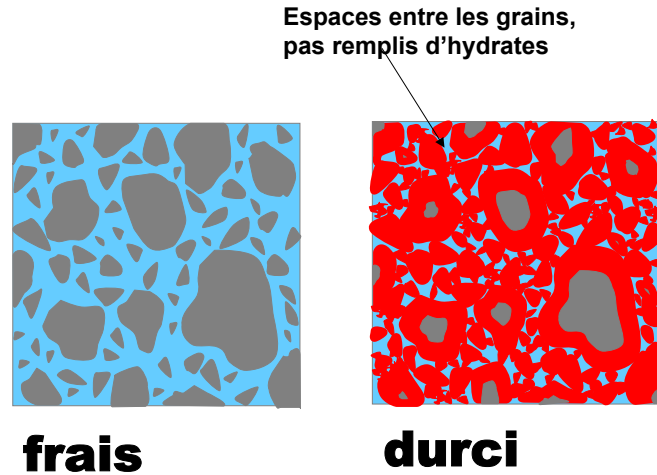
POWERS - BROWNYARD, 1964



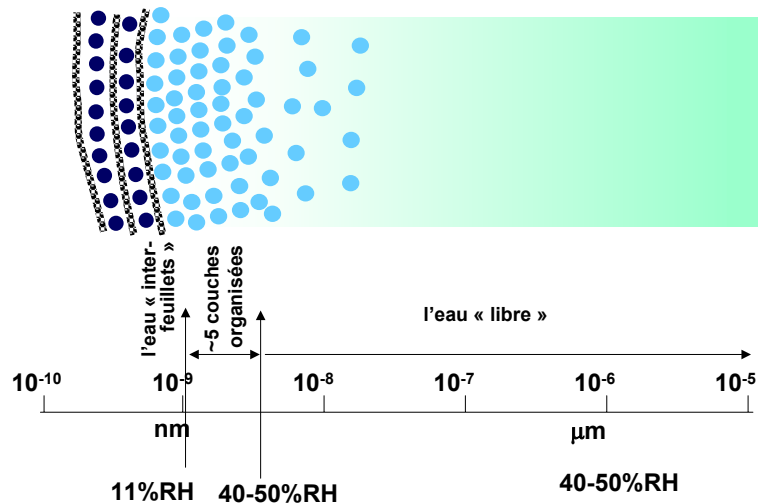
FELDMAN and SERREDA, 1964

Dimension « caractéristique » des pores ~20Å, 2nm

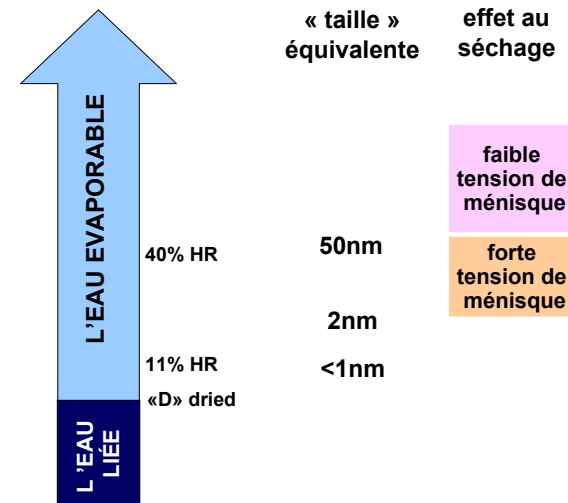
Changement d'échelle:



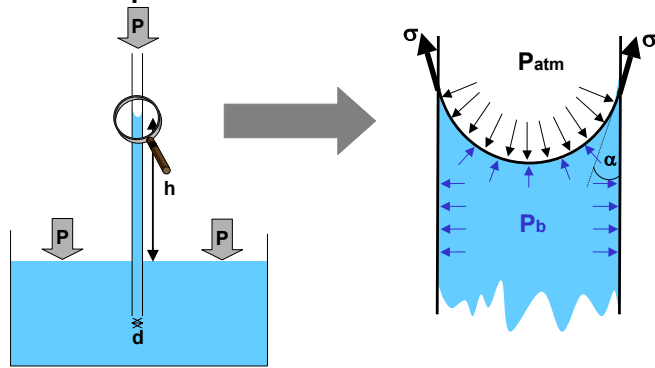
État de l'eau



L'état de l'eau



Forces capillaires



$$\sigma \cos \alpha \cdot 2\pi r = (P_{\text{atm}} - P_b) \pi r^2$$

$$\Delta P = \frac{2\sigma \cos \alpha}{r} \quad \text{eq. Laplace}$$

Pressions générées

$$\Delta P = \frac{2\sigma \cos \alpha}{r}$$

$\sigma \sim 0,072 \text{ J/m}^2$ énergie de surface

$\alpha = ?$

$\sim 0,072 \text{ N/m}$ tension superficielle

$r = 1 \text{ }\mu\text{m}$ $\Delta P \sim 0,1 \text{ MPa}$

$r = 100 \text{ nm}$ $\Delta P \sim 1 \text{ MPa}$

$r = 50 \text{ nm}$ $\Delta P \sim 2 \text{ MPa}$

$r = 10 \text{ nm}$ $\Delta P = 10 \text{ MPa}$

Propriétés à jeune âge

Ouvrabilité

Pris

Ouvrabilité

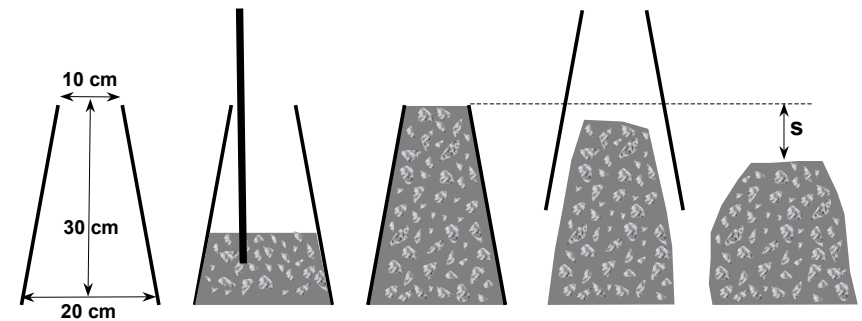
Capacité à remplir les formes

fluidité

à se compacté

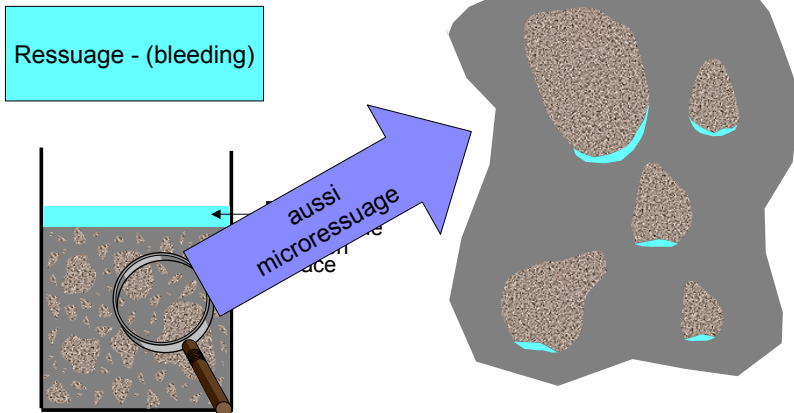
- La présence des granulats empêche l'utilisation de la plupart des équipements conçus pour caractériser la rhéologie des autres fluides
- Besoin des tests robuste qui peuvent être utilisés sur les chantiers

Slump test

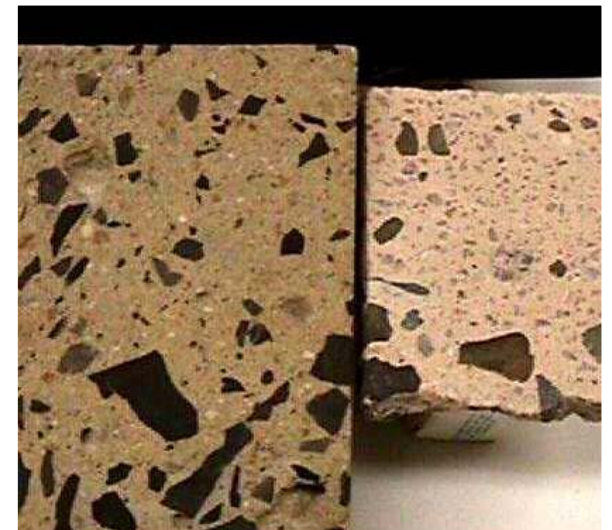




À éviter pour un bon béton:

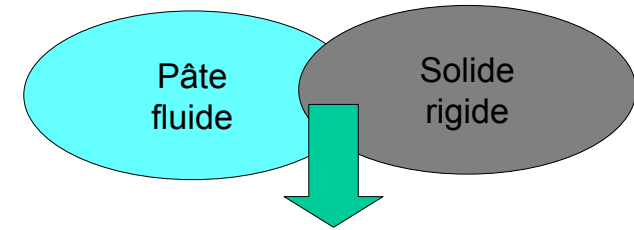


ségrégation



La prise

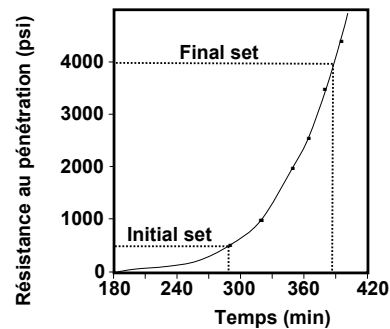
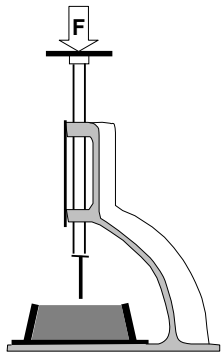
- Le ressuage et la ségrégation peut être évité avec une bonne formulation du béton:
- bon granulométrie du squelette granulats
- bonne dosage en ciment
- bon e/c



Le transition n'est pas franche
le définition du pris et un peu
arbitraire

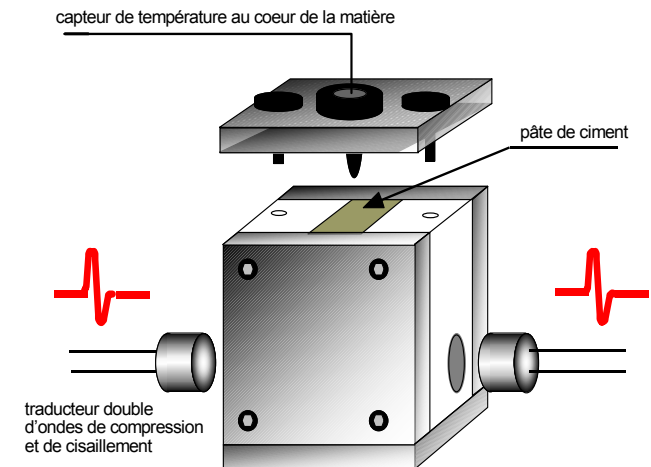
Le test classique:

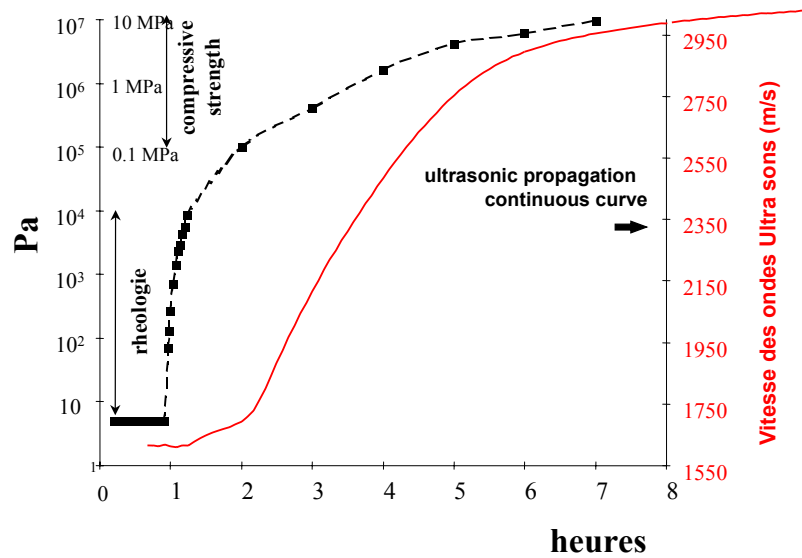
Aiguille « Vicat »



Caractérisation plus scientifique

CELLULE ULTRASONORE





Résistances mécaniques

Rôle critique des fissures

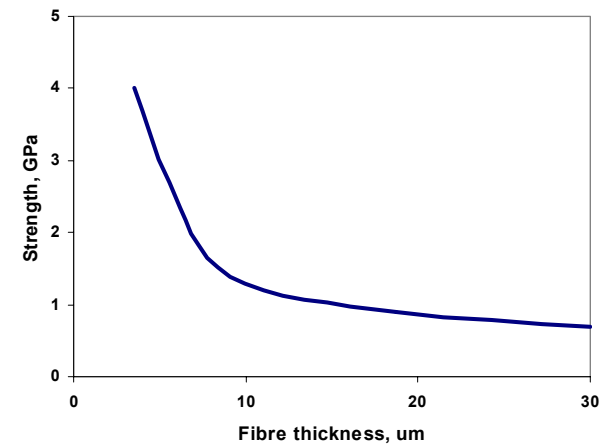
La résistance théorique est de l'ordre de

$$\sigma_{\theta} \sim \frac{E}{10}$$

en réalité, les résistances réelles sont $< \sim 10^{-3} E$ pour les matériaux fragiles

Mais,
pour les fibres très minces
on s'approche de la résistance théorique

Travail de Griffith sur les fibres de verre



La résistance des fibres augmente quand son épaisseur diminue

La propagation des fissures contrôle les résistances

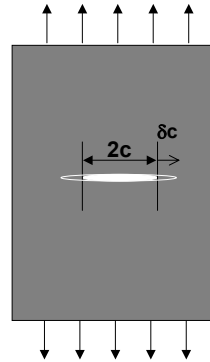
Balance énergétique:

Quand la longueur d'une fissure augmente
elle crée une nouvelle surface qui consomme
de l'énergie:

$$4S.\delta c$$

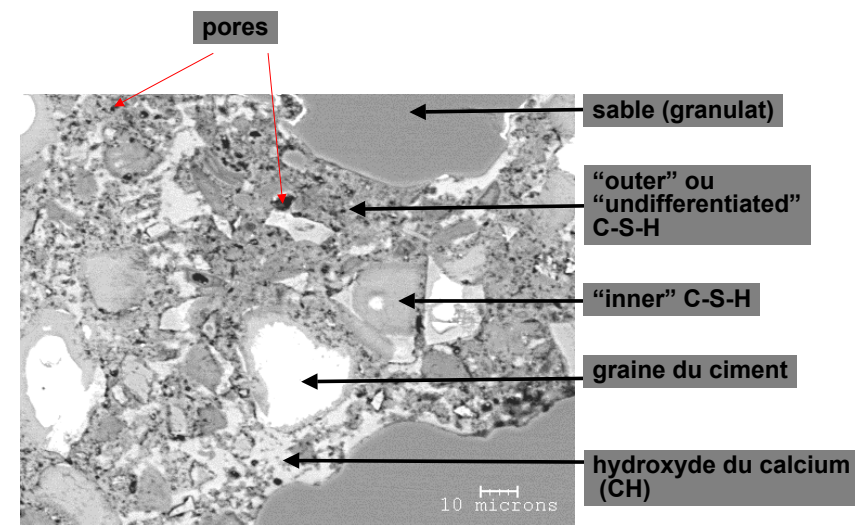
Mais il y a une restitution d'énergie
causée par l'état de la contrainte:

$$\frac{\pi \sigma^2 2c \delta c}{E}$$

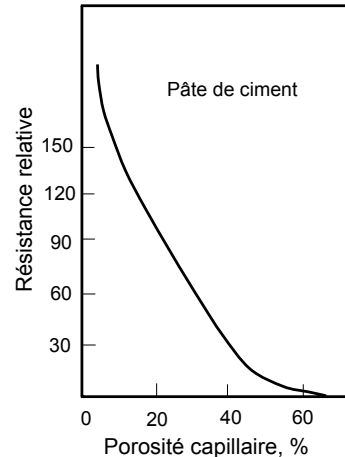
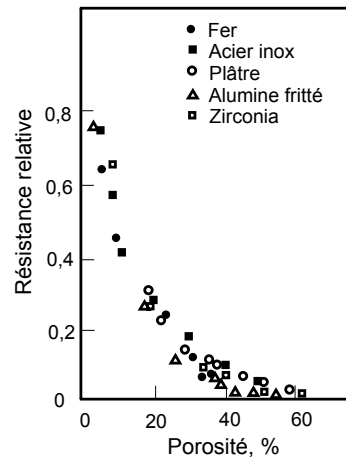


la contrainte critique pour propager la fissure, ces deux sont égales:

$$\sigma_c = \left(\frac{2ES}{\pi C} \right)^{1/2} \text{ géométrie spécifique}$$



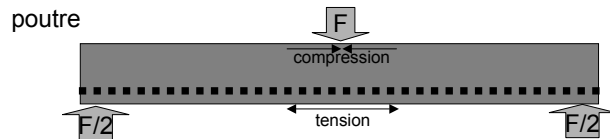
Dans tous les matériaux, les pores sont aussi un
paramètre qui influence fortement la résistance



Compression vs Flexion

- A cause des fissures, la résistance à la flexion des bétons est très basse: quelque MPa (cf xx acier)
- $R_c \sim 10 \times R_t$
- en conséquence les bétons sont toujours utilisés en compression.

Le béton armé est renforcé par des armatures en acier:

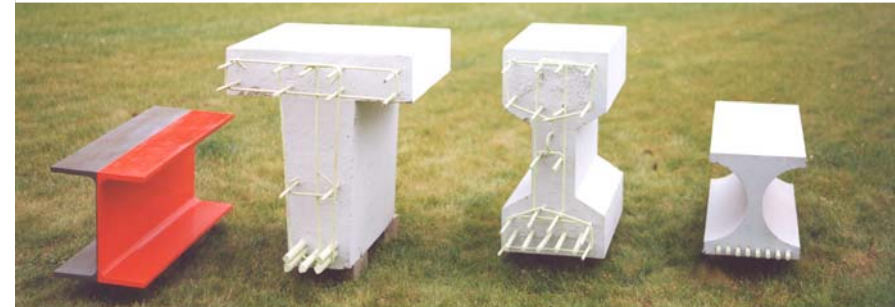


La résistance à la traction du béton est admise nulle:

$$R_t = 0$$

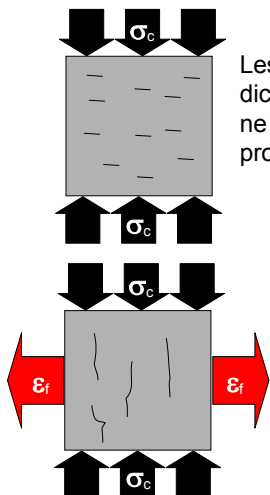
Par définition, le béton armé est fissuré sous les charges de service.

Poutres avec capacité porteuse équivalente

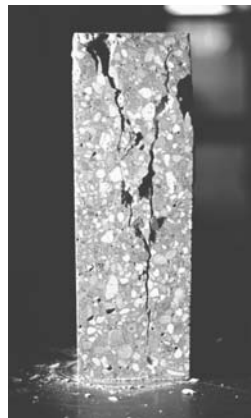


	ACIER	BÉTON ARMÉ	BÉTON PRÉCON-TRAINT	
poids	117	530	467	140

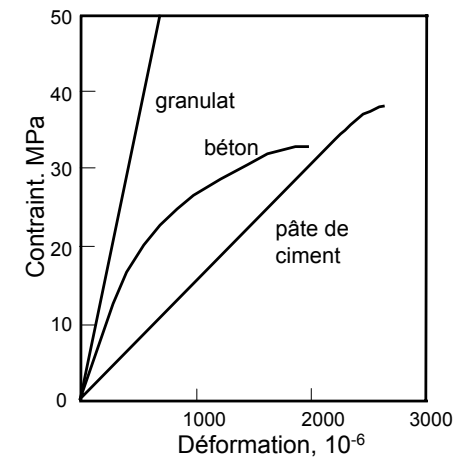
Sous l'effet d'une compression l'échantillon se raccourcit longitudinalement et gonfle latéralement



Les fissures perpendiculaires aux charges ne peuvent pas se propager

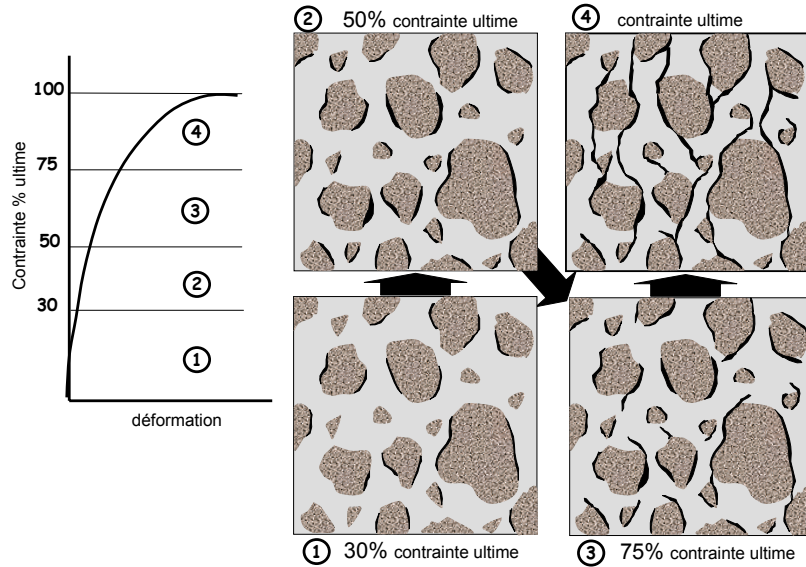


Le béton comme matériau composite



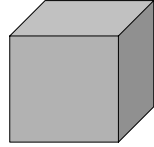
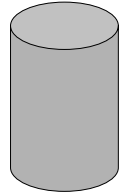
- Les granulats et la pâte de ciment sont élastiques jusqu'à la rupture
- En revanche, le béton démontre une déviation de la linéarité avant rupture

Mode de rupture



D'où la complexité du mode de rupture:

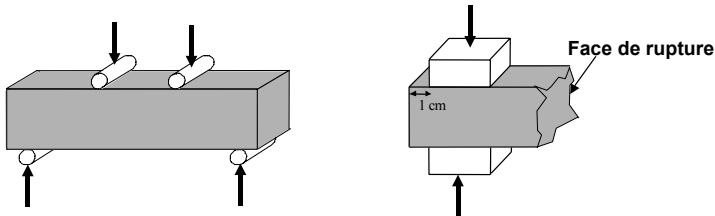
La forme de l'échantillon a un impact significatif:

	cubes	cylindres
$R_{cyl} \sim 0,8 R_{cub}$		
		$\frac{\text{hauteur}}{\text{largeur}} = 2$
Pays	UK, Suisse, etc	USA, France, etc
Dimensions typiques	200 mm x 200 mm x 200 mm	160 mm x 320 mm
Avantages	2 faces moulées Résistance élevée par frettage; État de contrainte non uniforme	Distribution des contraintes plus uniforme; frettage réduit
Désavantages		Besoin de rectifier

$D_{min} \text{ moule} > 5 \times D_{max} \text{ gran.}$

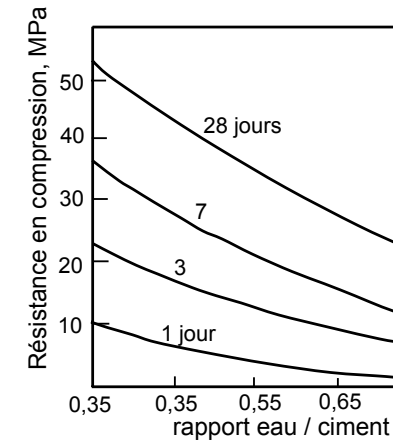
Prismes

Ex: 40 mm x 40 mm x 160 mm
100

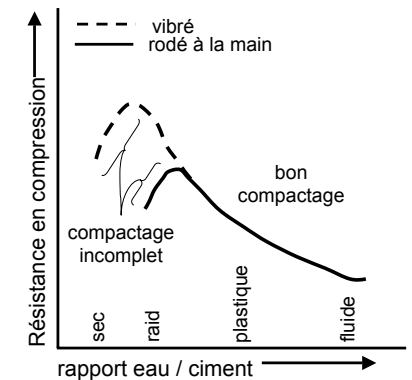


Possibilité de mesurer la résistance à la flexion et la compression
sur le même échantillon

Effet de l'âge et e/c



Mais attention à l'ouvrabilité



Loi de Feret, 1896

$$R = K \left(\frac{c}{c + e + v} \right)^2$$

Résistance à la compression

Constante, :
Fonction de l'âge,
mode de conservation
et liant

Volumes de:
c – ciment
e – eau
v – vides

$$R = K \left(\frac{c/(e + v)}{c/(e + v) + 1} \right)^2$$

Loi de Bolomey

$$R = K \left(\frac{c}{e + v} - K' \right)$$

Pour $v < \sim 2\%$

$$R = K \left(\frac{c}{e} - 0,5 \right)$$

Powers

$$R = a \left(\frac{\alpha c}{\alpha c + e + v} \right)^3$$

α = fraction du ciment hydraté

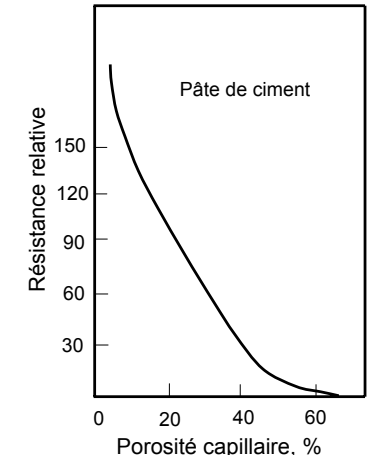
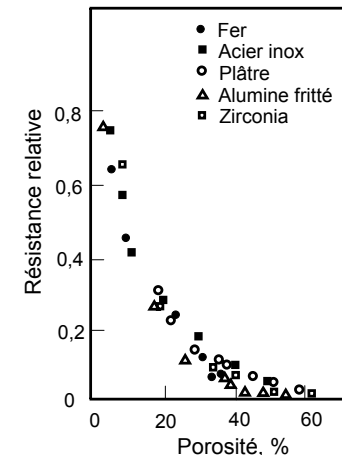
Équivalent à:

$$R = a (1 - P)^3$$

Ou P = porosité:

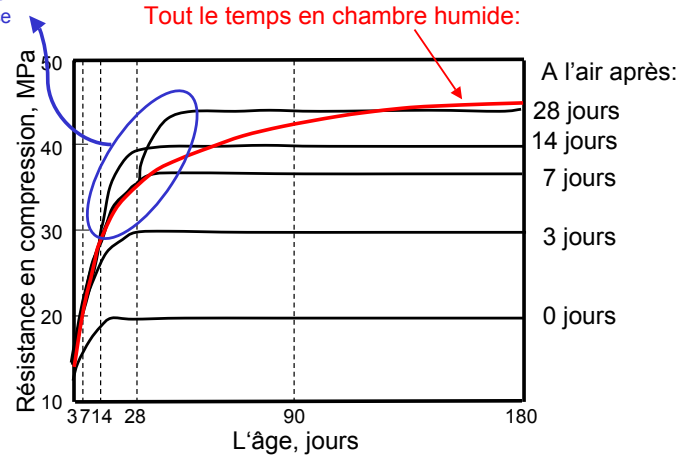
En fonction du nombre de paramètres inconnu, a , α , cette formule n'est pas pratique à utiliser

Dans tous les matériaux, les pores sont aussi un paramètre qui influence fortement la résistance



Importance de conservation

Pour le même état d'hydratation les échantillons secs ont une résistance plus élevée que les échantillons humides

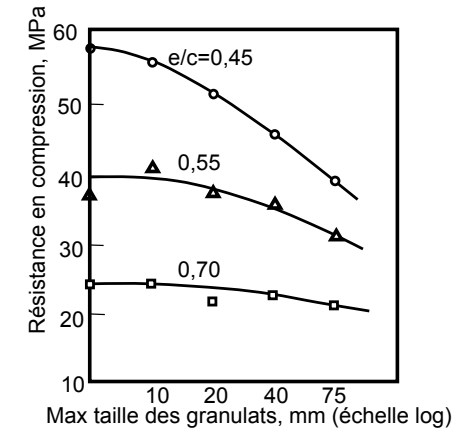


Taille des granulats

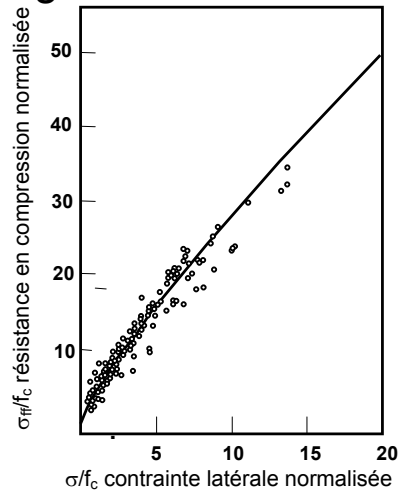
2 effets antagonistes:

Une granulométrie étendue à un meilleur compactage:
— $e/c \downarrow$, $R_c \uparrow$

Mais à e/c égal:



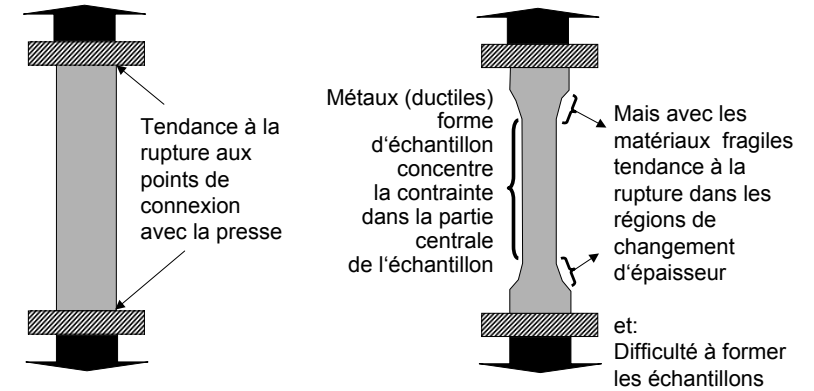
Effet de contrainte, chargement triaxial



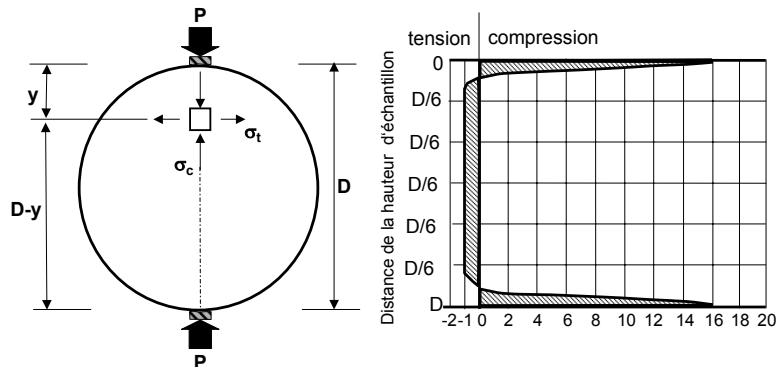
Résumé des paramètres qui influence le résistance en compression

Pourquoi mesuré le résistance en tension

Résistance en tension



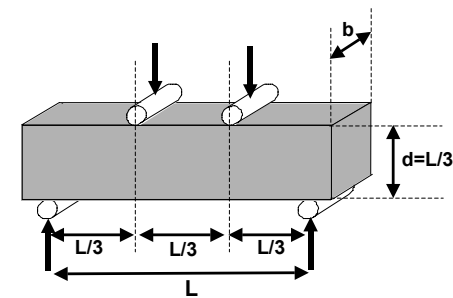
Méthodes, indirecte:



Test „fendage Brésilien“
Très pratique,
peut être fait sur cylindres et carottes

$$T = 2P/\pi t D$$

Flexion, 4pt



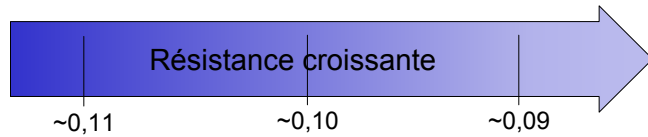
$$f_{fl} = PL/bd^2$$

Cette résistance est plus importante pour les dalles – routes, etc, qui sont chargées en flexion

$$f_{fl} > f_t$$

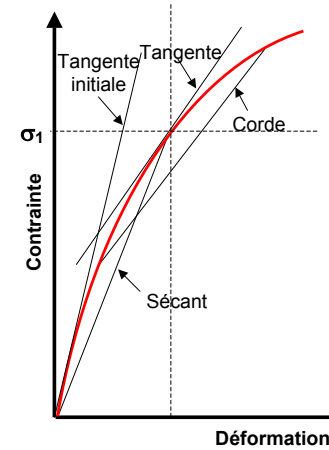
Tension vs compression

Relation non linéaire, fonction de la résistance



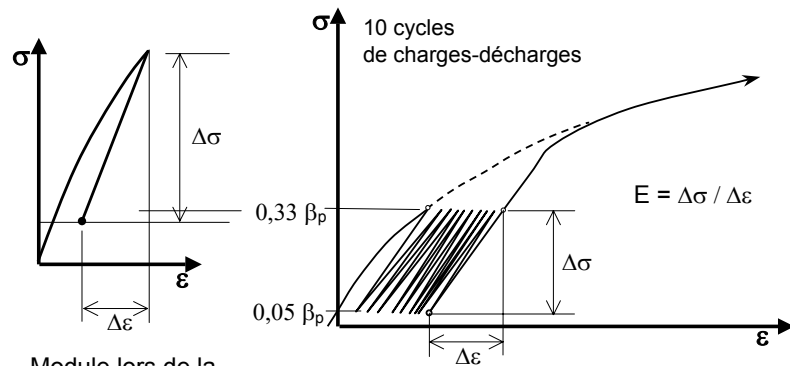
High strength concrete more brittle

Module de Young



Partie élastique ~
~ 1/3 charge maximale

En pratique, il est difficile de
déterminer l'origine avec
précision

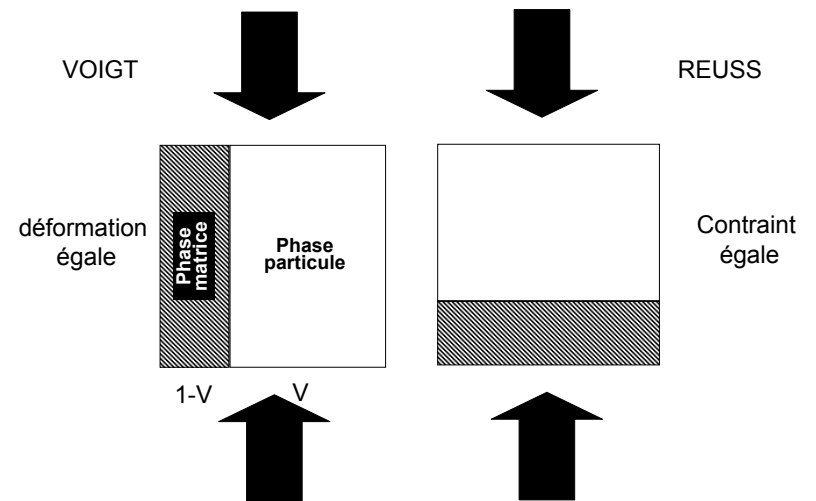


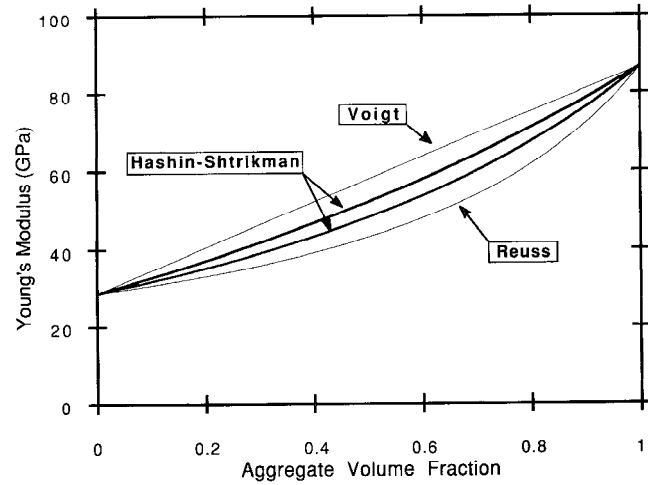
Module lors de la
décharge

$$E = \Delta \sigma / \Delta \epsilon$$

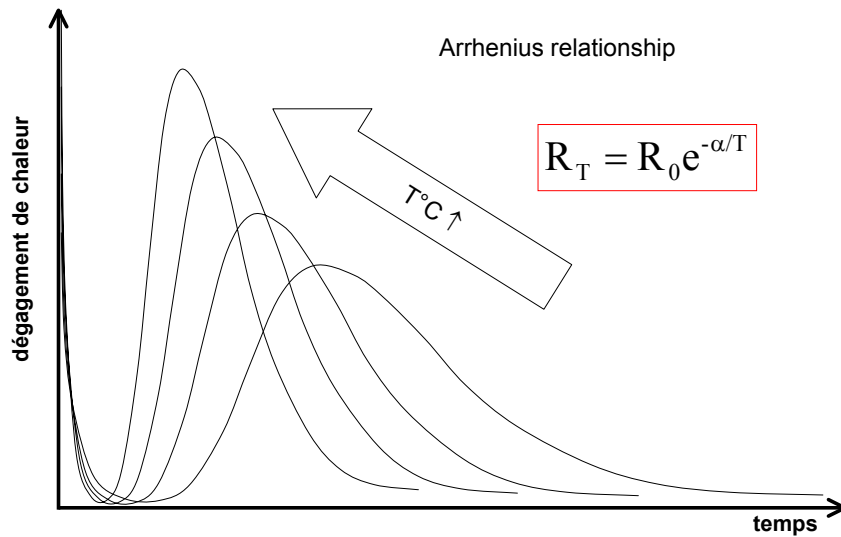
Module après cycles de charges-décharges
stabilise la courbe
3-5 (Suisse) ou 10 (Allemagne) cycles sont
suffisants pour que la différence d'allongement
entre deux cycles soit inférieure à 0,01 mm/m
 β_p = contrainte de rupture mesurée en prisme

Calculution du module pour les matériaux composite





Effect of Temperature

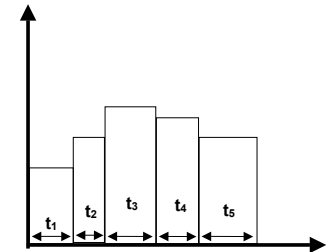


« Maturité »

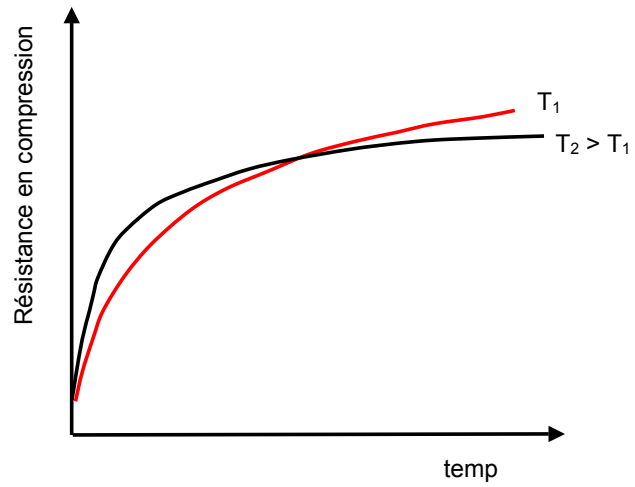
Pour les modeste changement de température

Approximation linéaire:

$$M = \sum t_i (T_i - T_0)$$



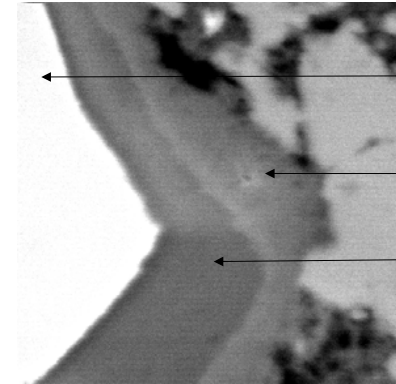
T_0 Température de référence au quelle il n'y a pas de développement de résistance
Normalement -10°C



$T \uparrow$, modification des hydrates

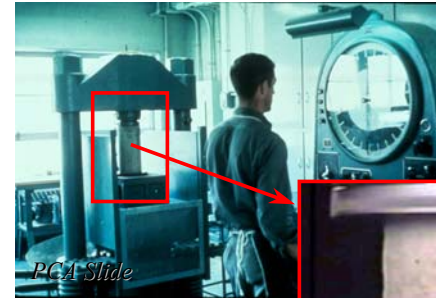
$T < 100^\circ\text{C}$

$T \uparrow$, C-S-H plus dense



$T > \sim 70^\circ\text{C}$, modification majeure au réaction des aluminates

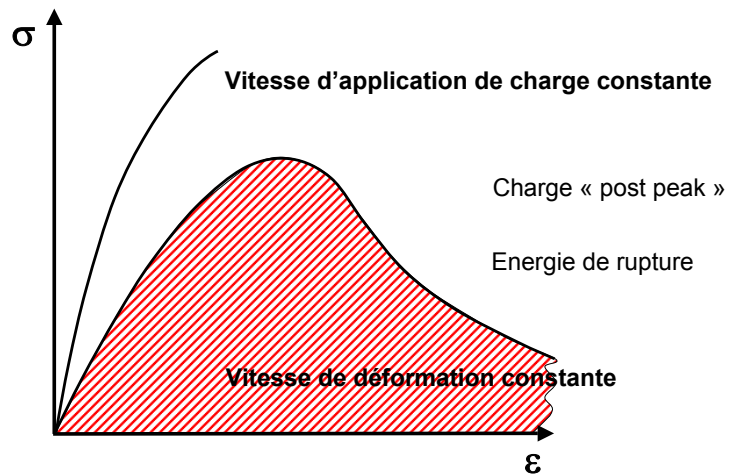
Processus de la rupture



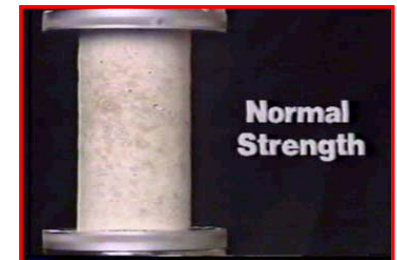
Processus du rupture



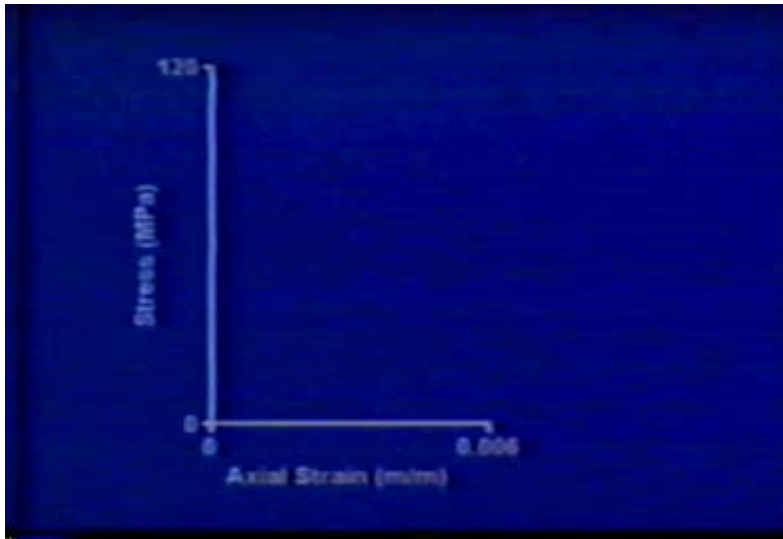
Mode d'application de charge



Fracture du béton à
résistance normale à haute
résistance



Modified from ACBM Movie



Changement de dimension

Le béton peut être soumis au changement de dimension
– les causes principales pour ces changements sont:

CHARGE MÉCANIQUE → FLUAGE

VARIATION D'HUMIDITÉ
SECHAGE

VARIATION DE TEMPERATURE

Ces changements dimensionnels sont à l'origine de la fissuration

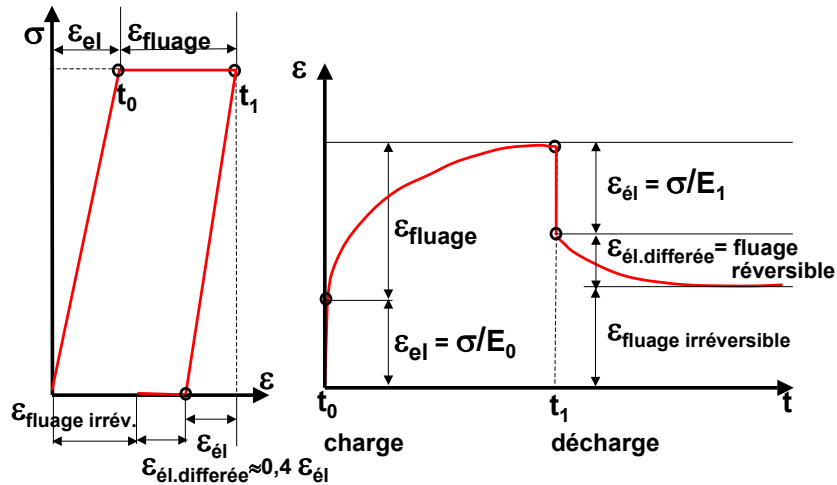
Souvent ces effets interagissent

Fluage

Comportement sous charge constante

Pourquoi tenir compte du fluage ?

- Le fluage peut provoquer des déformations considérables des ouvrages (2 à 3 fois la déformation instantanée en 3 ans).
- Il est la cause principale des pertes de précontrainte dans les éléments structuraux (relaxation).
- A l'origine de l'atténuation des contraintes maximales (relaxation) d'où l'économie de matière.



Fluage:

Déformation à contrainte constante

Relaxation:

Diminution de contrainte à déformation constante (restraint)

Fluage de base (basic creep):

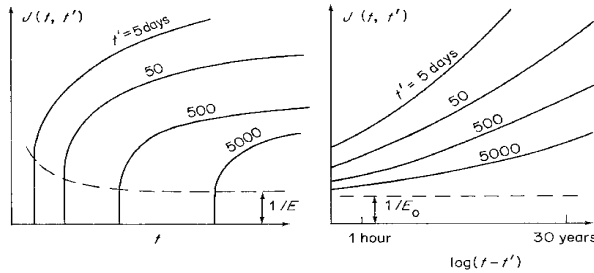
Sans échange d'eau avec environnement (sans séchage)

Mécanisme:

L'origine du fluage est dans la pâte de ciment.

Le mécanisme exact n'est pas connu, mais quelques personnes émettent l'hypothèse selon laquelle l'eau dans les pores du C-S-H, sous stress, se diffuse vers les pores capillaires
- réduction de volume du C-S-H

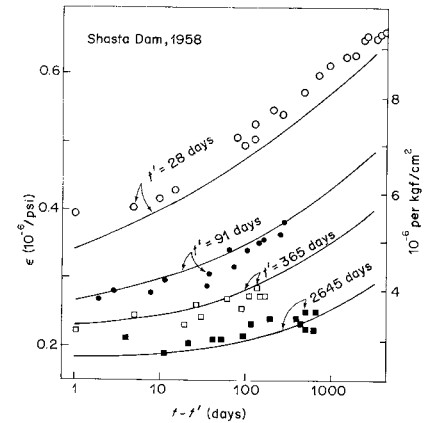
L'importance de l'âge à la mise en charge



$$J(t, t') = \frac{\varepsilon(t, t')}{\sigma_0} \quad \text{: fonction fluage = déformation par unité de charge}$$

t' : l'âge à la mise en charge
 σ_0 : charge constante

Fluage à long terme



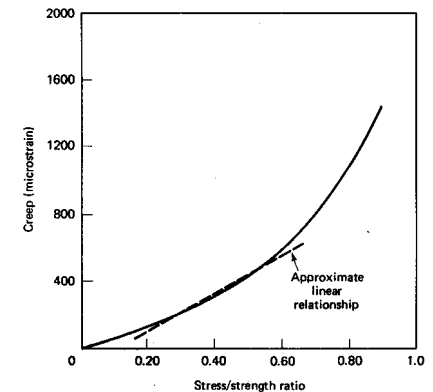
Observations importantes :

- La partie instantanée dépend de l'âge à la mise en charge: vieillissement;
- Le fluage de base n'est pas asymptotique, il est illimité;
- La vitesse de fluage diminue avec le temps;
- Dans la pratique on prend un asymptote fictif, ex après 3ans

Fluage spécifique

Pour la gamme de stress normal d'utilisation - $\sigma < 0,4R_c$
 La relation entre la déformation en fluage (ε_{fl}) et la contrainte relative (σ / f_c') est presque linéaire

Pour comparer les comportements des bétons:
 Fluage spécifique (specific creep) - c



$$c = \frac{\varepsilon_{fl}}{\sigma}$$

Valeur typique $150 \times 10^{-6} / \text{MPa}$

Coefficient de fluage

$$\varepsilon_{\text{él}} + \varepsilon_{\text{fl}} = \frac{\sigma}{E} + c \cdot \sigma = \frac{\sigma}{E} (1 + E \cdot c) = \frac{\sigma}{E} (1 + \varphi) = \varepsilon_{\text{él}} (1 + \varphi)$$

$\swarrow$ Fluage spécifique $\searrow$
 $\nwarrow$ Coefficient de fluage $\nearrow$

$$\varphi = \frac{\varepsilon_{\text{fl}}}{\varepsilon_{\text{él}}}$$

Valeurs typiques:

« φ_{∞} » coefficient de fluage final

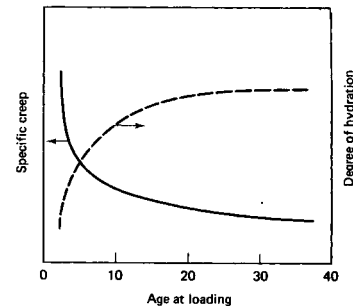
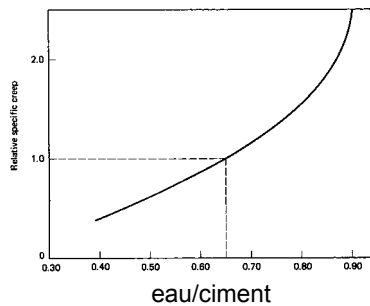
Age lors de l'application de la charge	à l'air humide	à l'air sec
7 jours	2,8	3,5
14 jours	2,4	3,0
28 jours	2,0	2,5
90 jours	1,5	2,0

$$\varphi_{28j} = 0,4 \varphi_{\infty}$$

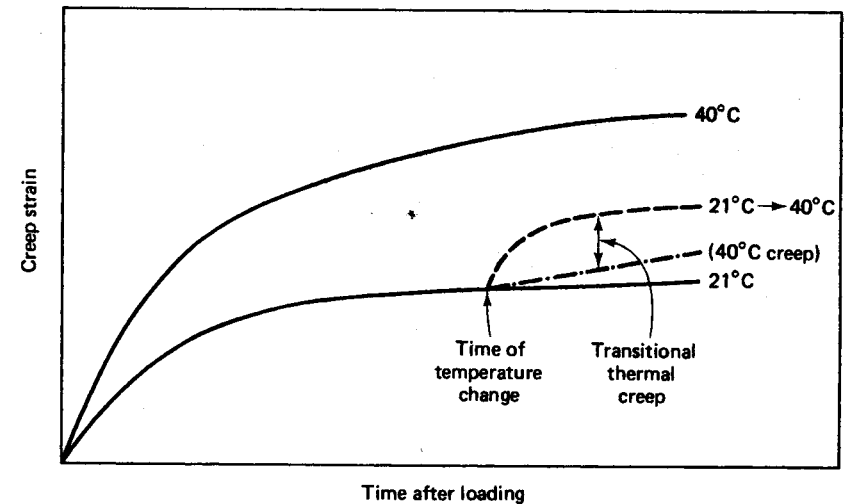
$$\varphi_{90j} = 0,6 \varphi_{\infty}$$

$$\varphi_{365j} = 0,8 \varphi_{\infty}$$

Effet des paramètres



Effet des paramètres



Modèles pratiques (empiriques)

• Acker,
$$J(t, t') = \frac{1}{E(t')} + \varepsilon_{\infty}(t') \sqrt{\frac{(t + t')^{\alpha}}{(t + t')^{\alpha} + b}}$$

ε_{∞} : déformation ultime du fluage

• ACI :
$$J(t, t') = \frac{C_u}{E(t')} \left[1 + \frac{(t - t')^{0.6}}{10 + (t - t')^{0.6}} \right]$$

C_u : dépend de l'humidité, épaisseur, qté ciment, vides,...

• CEB :
$$J(t, t') = F_i(t') + \frac{0.4\beta_d(t - t')}{E_{28}} + \frac{\phi_f[\beta_f(t) - \beta_f(t')]}{E_{28}}$$

E_{28} : module à 28 j; $F_i(t')$: exprime la déformation instantanée

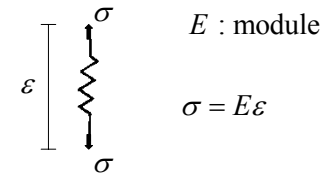
ϕ_d : dépend de H

t' : temps à laquelle la charge est appliqué

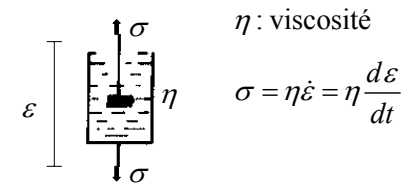
Modélisation du fluage

Comportements élémentaires

Élastique : Ressort



Visqueux : Amortisseur



A charge constante :

$$J = \frac{\varepsilon}{\sigma} = \frac{1}{E}$$

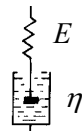
$$J = \frac{\varepsilon}{\sigma} = \frac{t}{\eta} = \frac{1}{E} \left(\frac{t}{\tau} \right)$$

avec $\tau = \eta/E$

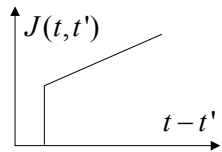
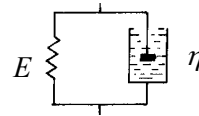
Modélisation du fluage

Modèle rhéologique de base

Maxwell
(fluage linéaire)

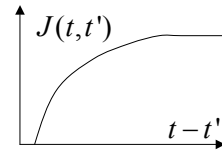


Kelvin



$$J(t, t') = \frac{1}{E(t')} \left[1 + \frac{t - t'}{\tau} \right]$$

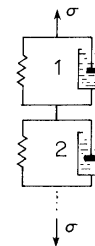
$\tau = E/\eta$; temps de retardation



$$J(t, t') = \frac{1}{E(t')} \left[1 + e^{-(t - t')/\tau} \right]$$

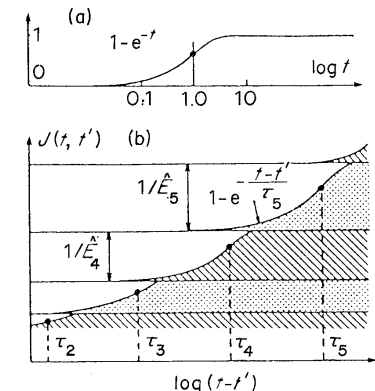
Fluage de base

Kelvin généralisé



$$J(t, t') = \frac{1}{E_0(t')} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i(t')} \left[1 + e^{-(t - t')/\tau_i} \right]$$

Inconvénient: beaucoup de paramètres
Avantage: calcul numérique des structures



Fluage de base

Modèles paraboliques (Power law Models, Bazant)

- Modèles à 4 paramètres, valables jusqu'à 30 ans

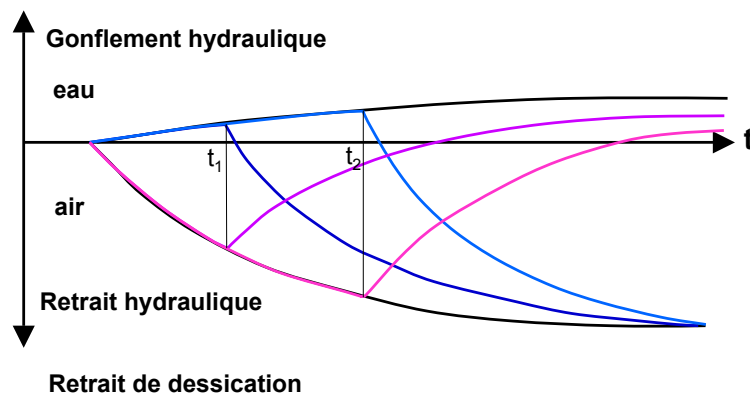
$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} \left[1 + \beta t'^{-m} (t - t')^n \right]$$

- 30 ans et plus :

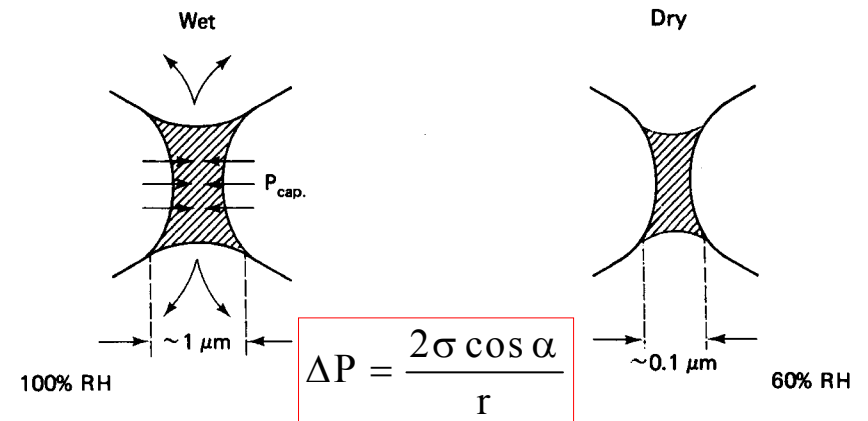
$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} \left[1 + \ln \left[\beta t'^{-m} (t - t')^n \right] \right]$$

Avantage: peu de paramètres
Inconvénient: calcul numérique des structures, stockage de toute l'histoire de chargement

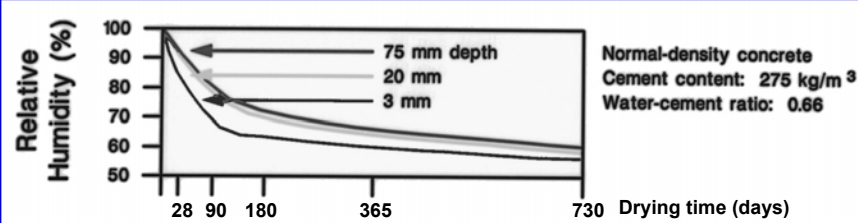
Effet de l'humidité



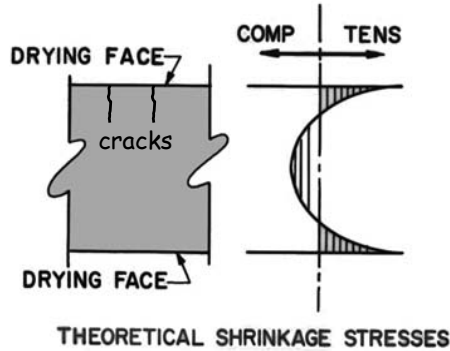
L'origine de retrait de dessiccation



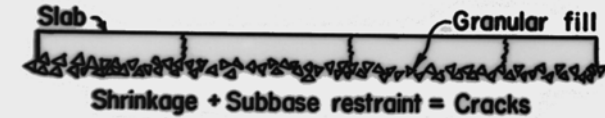
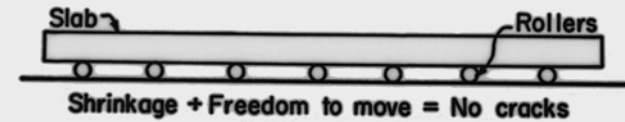
Les forces de ménisque dans les pore capillaire



Le béton ne sèche pas uniformément - l'eau s'évapore d'abord à la surface. Le retrait de la surface est empêché par le béton du cœur et cela résulte par des tractions à la surface

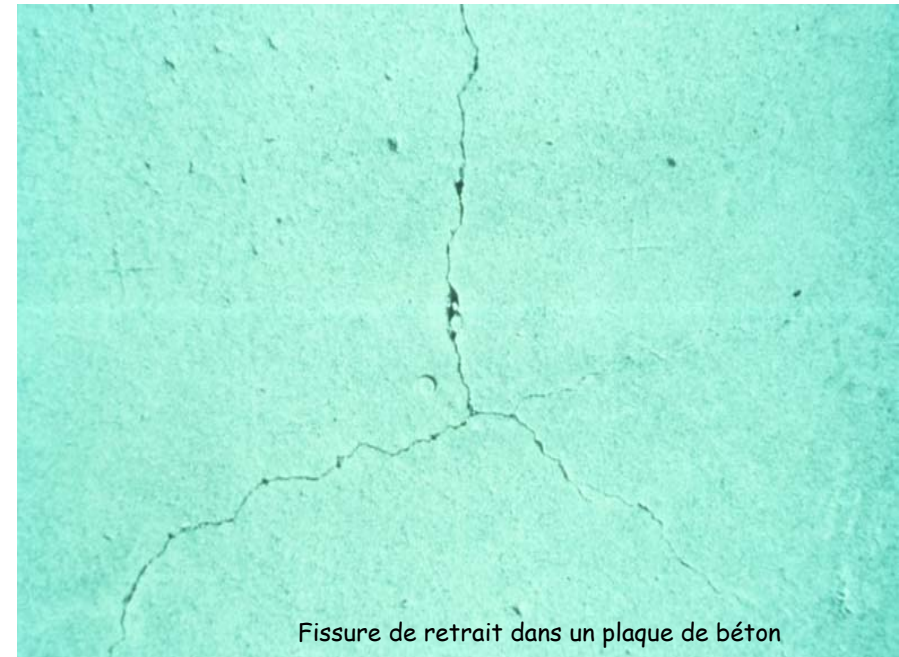
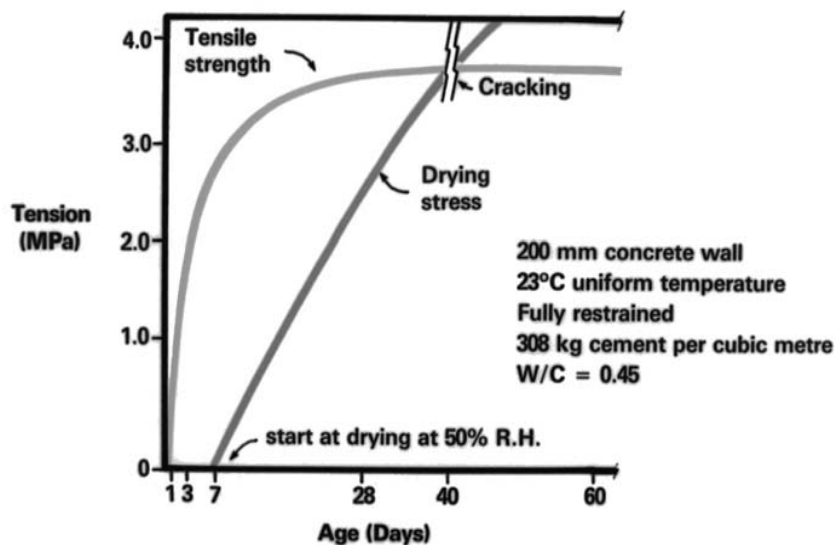


SHRINKAGE AND CRACKING



Les changes de volume sans restreint ne provoquera pas de rupture !

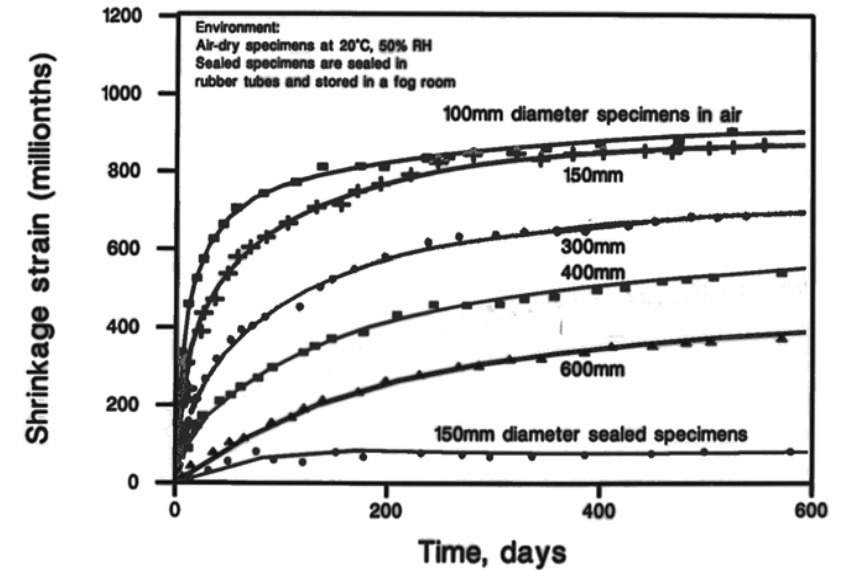
CONCRETE CRACKING



La quantité de retrait qui peut se produire dans un béton de ciment Portland normal s'étend n'importe où jusqu'à environ 0,8 ‰ (800 microstrain or 0.0008 strain) (normalement ~0,5 ‰). Cela dépend de:

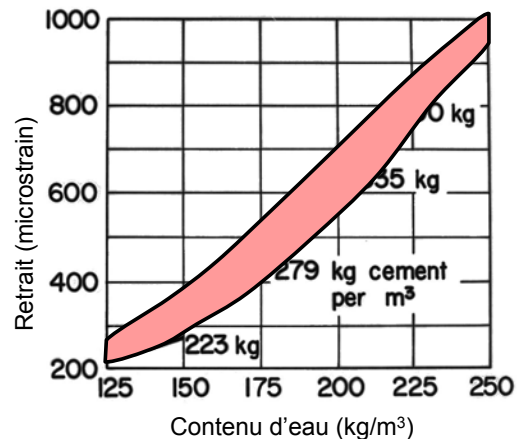
- Conditions de séchage
 - Humidité relative
 - Température
 - Vitesse du vent
- Taille du spécimen
 - Les spécimens plus grands ont un retrait plus lent
- Cure d'hydratation avant séchage
 - Béton bien hydraté a moins de retrait
- Proportions du mélange de béton
 - Eau
 - Volume des Granulats
 - e/c

SHRINKAGE AND SIZE



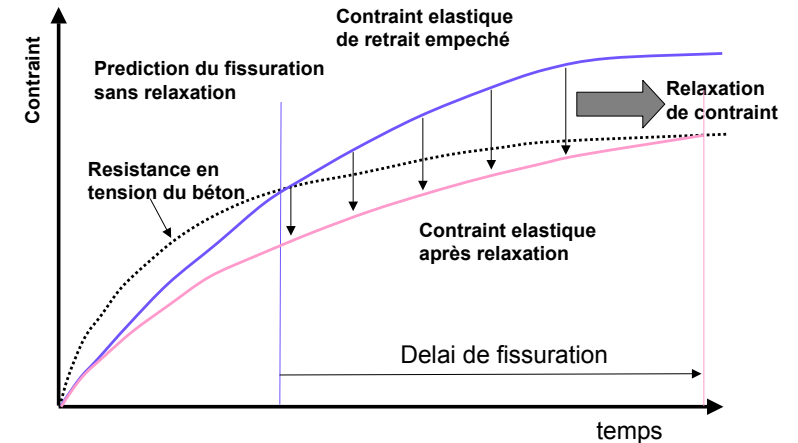
Contrôle du retrait de séchage

La quantité d'eau joue un rôle très important au niveau du retrait. La réduction de la quantité d'eau totale par adjonction de produits chimiques (ex. réducteurs d'eaux ou superfluidifiants) ou par le choix d'une courbe granulométrique appropriées permet de

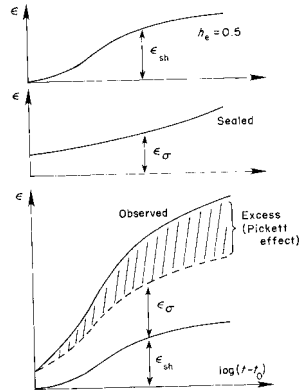


réduire de manière significative le retrait de séchage. L'utilisation des granulats bien arrondi avec le maximum étendu granulométrique possible permet de réduire le contenu en eau.

Le relaxation peut mitiger les effet de retrait



Mais l'effet de retrait plus fluage (en compression) et plus grande que le somme des deux séparé



- La charge du fluage peut accélérer le séchage donc le retrait
- Les contraintes induites par le séchage comme charge supplémentaire peuvent accélérer le fluage
- Distinguer :
fluage total
fluage de base

Effet de la température

- L'hydratation du ciment genere du chaleur
- Le béton (comme la plupart des matériaux) gonfle comme la temperature augement et diminue en volume quand le temperature diminue.
- Les effets de temperature peut poser un probleme dans les structures massive, au cœur du quel les hausses de temperature peut être significative.
- Les regions proche au surface refroidisse plus vite, sont soumis au retrait qui et empecher par le cœur et en consequence sont vulnérable au fissuration.



Un Exemple

Coefficient thermal d'expansion, $\alpha = 10^{-5}$ per $^{\circ}\text{C}$

ΔT (dû au hydratation) = 15°C

$$\varepsilon = \alpha \Delta T = 1.5 \times 10^{-4}$$

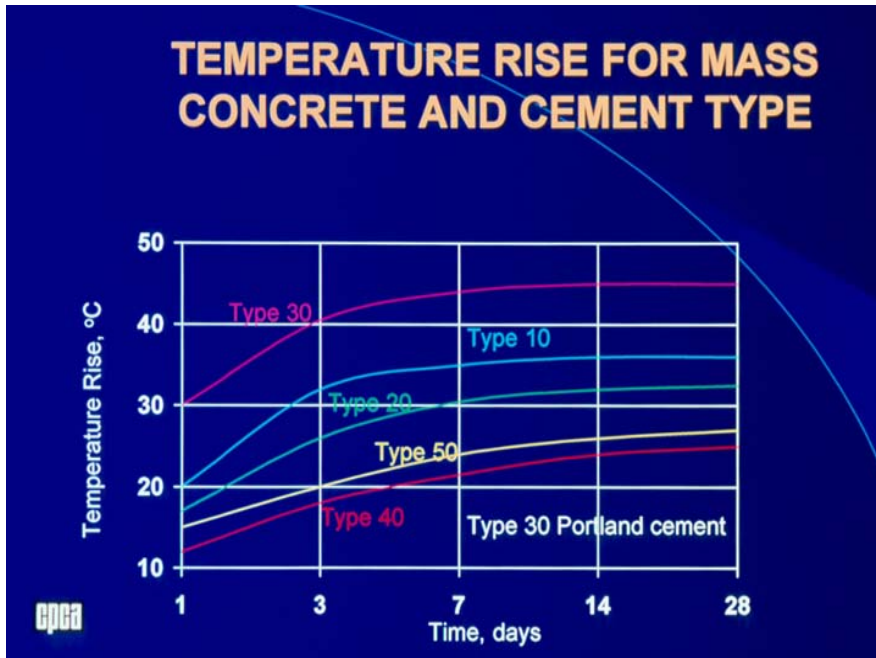
$E = 20 \text{ GPa}$

$$\sigma = E\varepsilon = 3 \text{ MPa} > f_t$$

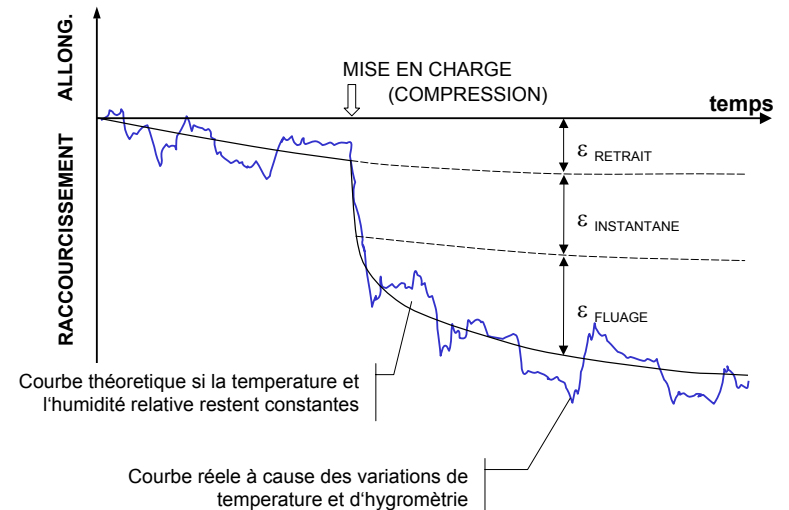
Mais il y a du relaxation – il faut éviter que $\Delta T > 20^{\circ}\text{C}$

Il y a plusieurs façons de réduire le gradients thermique:

- Réduire le température du béton frais (ex. eau glacé)
- Utilise le pozzolans ou fillers
- réduire le contenu du ciment
- réduire le masse le bétons, fait à la fois
- installe de tuyaux pour refroidire le masses
- insulation du coffrage (reduire de gradients en grandes éléments)
- coffrage en métaux (évacuation du chaleur pour les petits éléments)
- Utilisation d'un ciment bas chaleur hydratation



Interaction des effect sechage, charge mécanique, température



Production du béton en pratique

On a discuté

- **Composants du béton**
- **Le processus de durcissement**
- **L'importance de l'eau ajouté – e/c**
- **Propriétés à jeune âge**
- **Resistance mecanique**
- **Changement de dimension et fissuration**

Le pratique

- **Fabrication, mélange, transport**
- **Mise en Place**
- **Cure**

Specification du béton, d'une Centrale à Béton

On doit specifier:

Le classe de resistance, ex B 35/25
B 40/30
B 45/35

Plus les specifications liées à l'expostion:

Etanche

Resistant au gel/degel

Resistant aux sulfates

Plus specifications pour les bétons « speciale »

Ex:

Slump

Type de ciment

Ajouts

Ajuvants

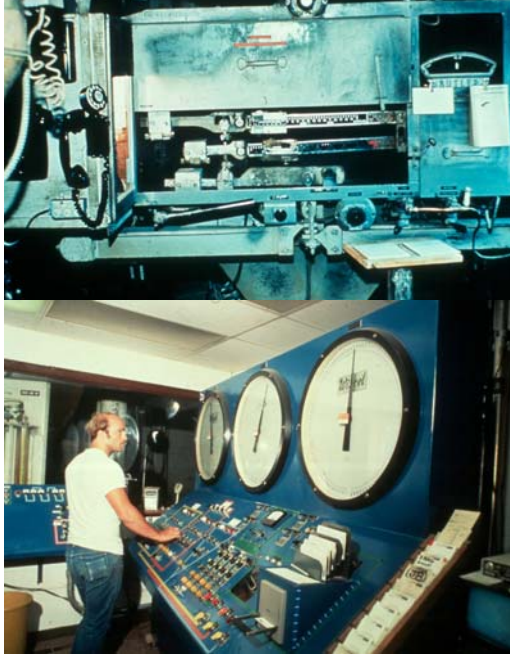
Max taille des granulats

Fabrication

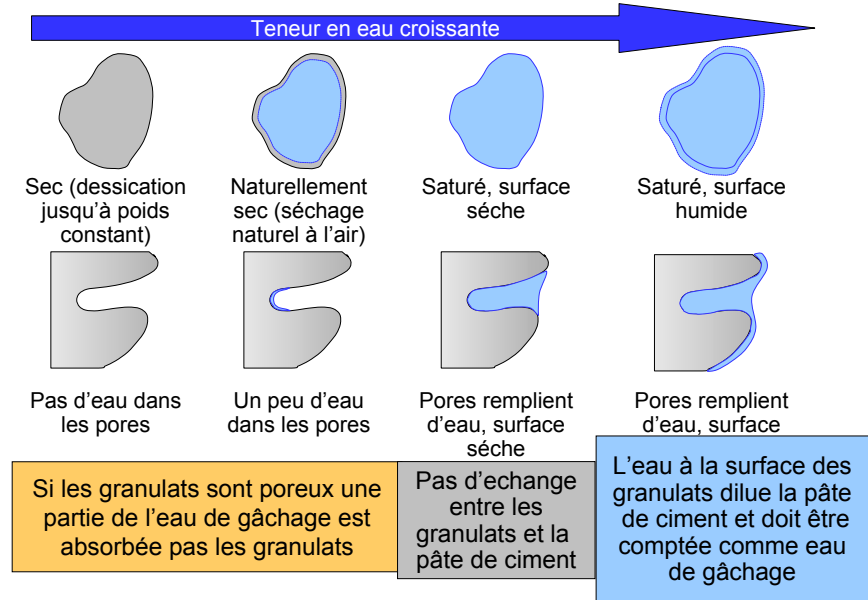
Pesage des constituants
dans une centrale à Béton

Fiabilité du pesage:

- le ciment 1%
- les granulats 2%
- L'eau 1%
- les adjuvants 3%



Teneur en eau des Granulats

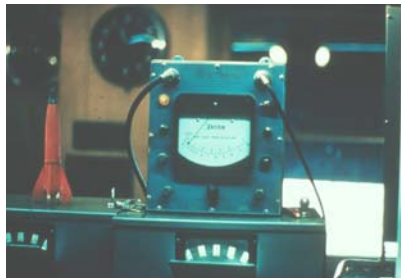


Il faut ajuster l'eau ajoutée pour
prendre en compte l'état des granulats

Pour avoir l' E/C correct

En labo, les granulats sont sec,
mesure d'absorption jusqu'à l'état saturé surface sèche
ajouter cette quantité à l'eau de malaxage

En centrale
mesure humidité,



Qualité de l'eau

Si vous pouvez la boire,
C'est bon pour le béton!



Il faut, par exemple
éviter l'eau de mer

Malaxage

"Tout béton doit être intensément malaxé jusqu'à obtenir une structure homogène, avec tout les ingrédients uniformément mélangés"



Centrale à béton - circa 1900

PCA Slides

Béton "prêt à l'emploi"

"Le béton prêt à l'emploi est préparé dans des centrales situées hors de la zone de construction. Il est livré sur le chantier à l'état frais"

Methode:

1. Béton mélangé en centrale

Il est transporté par camion - benne ou mieux par camion-malaxeur, qui en maintenant le béton continuellement agité, permet d'éviter toute ségrégation (séparation des phases).



PCA Slides

Béton "prêt à l'emploi"

"Le béton prêt à l'emploi est préparé dans des centrales situées hors du de la zone de construction. Il est livré sur le chantier à l'état frais"

Methode:

1 Béton mélangé en centrale

2 Mélange partiel

Le béton est partiellement mélangé à la centrale et le malaxage est poursuivi lors du transport dans le camion malaxeur



PCA Slides

Béton "prêt à l'emploi"

"Le béton prêt à l'emploi est préparé dans des centrales situées hors du de la zone de construction. Il est livré sur le chantier à l'état frais"

Methode:

1 Béton mélangé en centrale

2 Mélange partiel

3 Mélange au camion malaxeur

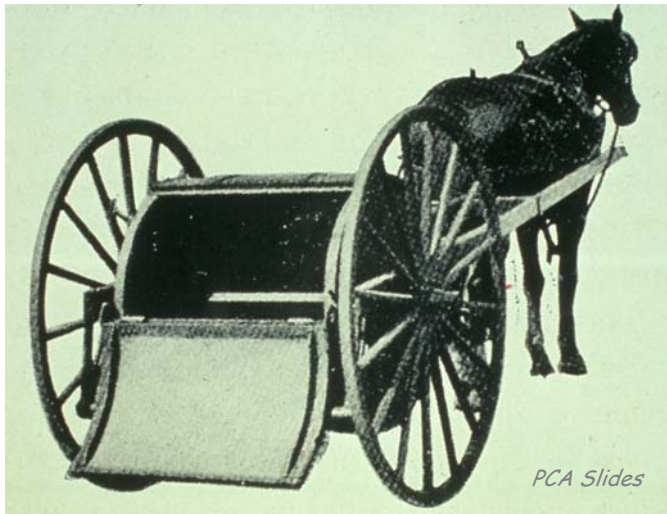
Le mélange est entièrement malaxé lors du transport



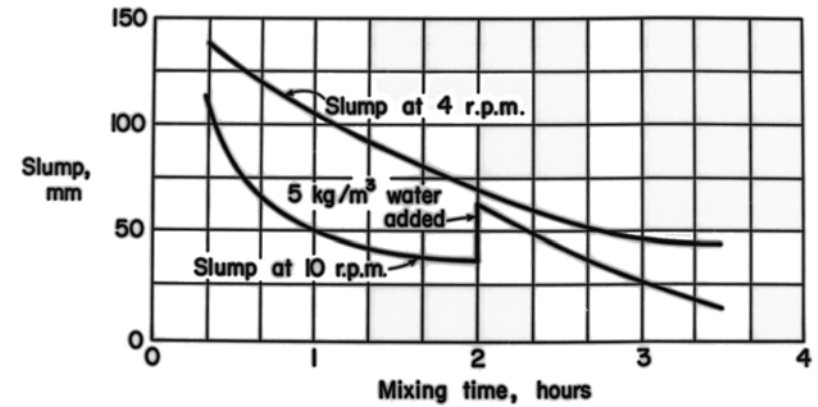
PCA Slides

Malaxeur hippomobile, d'une capacité 0.5 m³, en service au début des années 1900.

L'efficacité du malaxage dépendait de la vitesse du cheval et donc de la quantité d'avoine donnée à la pauvre bête !



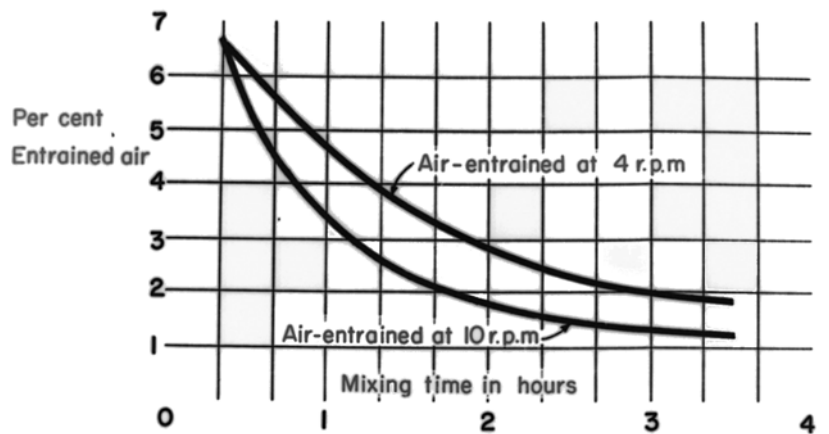
EFFECT OF MIXING TIME ON SLUMP



Cumulative revolutions	at 4 r.p.m.	200	400	600	800
	at 10 r.p.m.	400	900	1400	1900

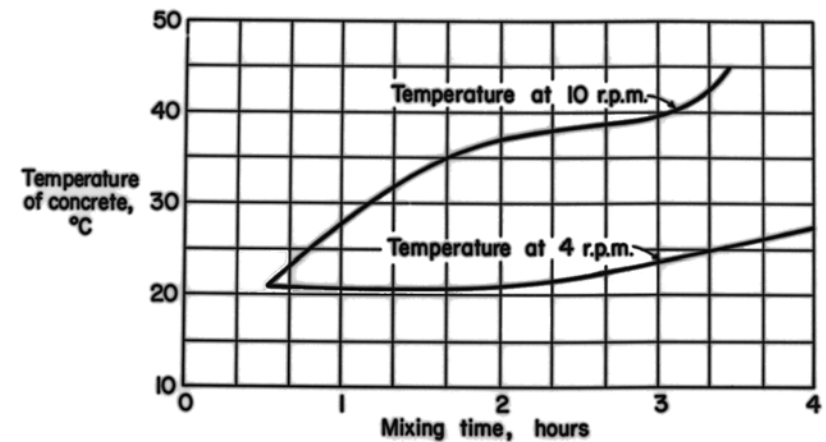
(Mixer was stopped for 5 minutes at intervals for sampling)

EFFECT OF MIXING TIME ON AIR CONTENT



Cumulative revolutions	at 4 r.p.m.	200	400	600	800
	at 10 r.p.m.	400	900	1400	1900

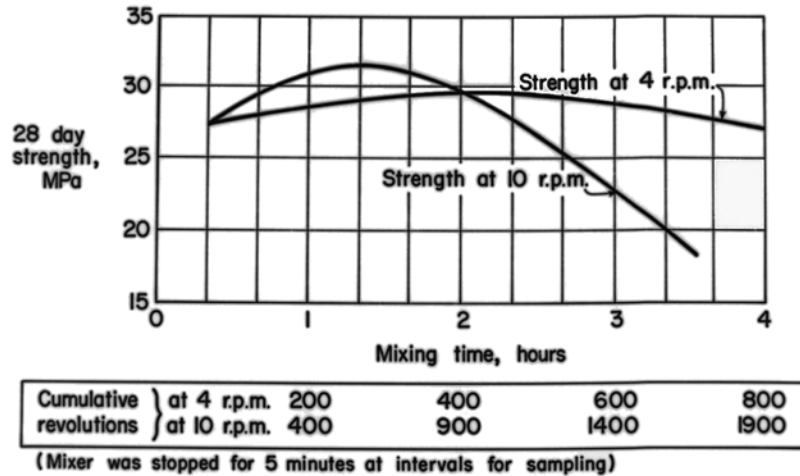
EFFECT OF MIXING TIME ON TEMPERATURE



(Mixer was stopped for 5 minutes at intervals for sampling)

Cumulative revolutions	at 4 r.p.m.	200	400	600	800
	at 10 r.p.m.	400	900	1400	1900

EFFECT OF MIXING TIME ON STRENGTH



Ajouts d'eau au béton sur chantier

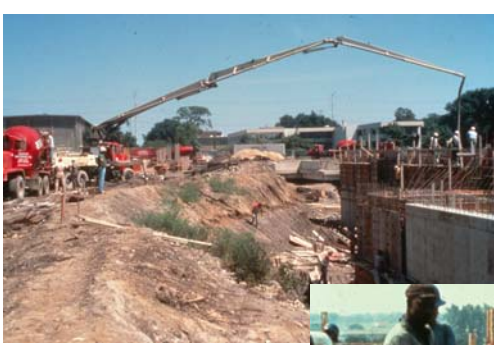
- Des fois, quand le béton arrive sur chantier l'ouvrabilité n'est plus suffisante.
- Les ajouts d'eau **limiter** (<10% d'eau initiale) peut être fait
- Mais, il faut:
 - Rehomogeniser le béton par malaxage
 - Documenter les ajouts!

FACTORS AFFECTING READY MIXED CONCRETE (Per Cubic Meter)

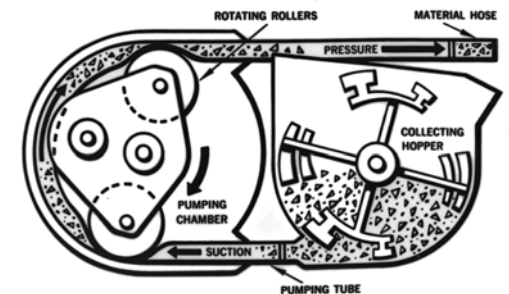
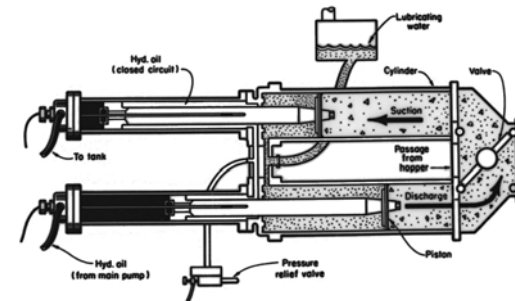
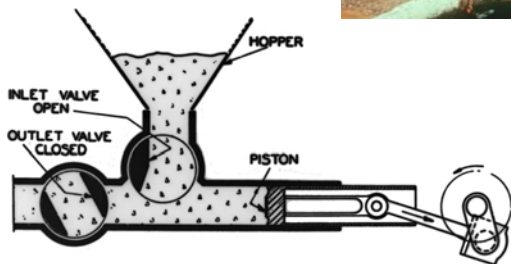
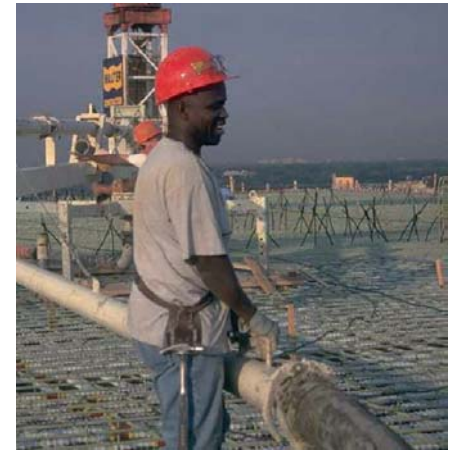
5L Water	+20 mm slump
1% extra air	+20 mm slump
+10° C	-30 mm slump
20L Water	-5 MPa
1% extra air	-1.4 MPa (20 MPa concrete)
1% extra air	-2.8 MPa (35 MPa concrete)
+20° C	-10 MPa

Livraison du béton





Pour le pompage du béton
 Max taille des granulats:
 Le plus petit de:
 $\leq 1/3$ diamètre de tuyaux
 $\leq 40 \text{ mm}$





Pour les bétons projetés et livrés par pompage, l'utilisation des adjuvant critique

3 type d'action des adjuvants:

- Accélération
- Retardation
- Reduction de demand en eau – superplastifiant (souvent en avec aussi un effet de retardation)

On va parler plus des adjuvants dans un prochaine cours

Quand il est utilisé pour reduire le demand en eau - le E/C peut être réduit pour le même slump - la resistance est augementée (et la durabilité ameliorée)

Quand il est utilisé comme plastifiant on guard le E/C constant et le slump augmente



Photo courtesy of MBT



Photos courtesy of MBT

Superplastifiants

C'est possible d'obtenir les slumps dans la gamme 200 à 250 mm, peut être obtenu sans segregation ou ressuage.

Mais ces melages exigent une bonne maitrise de la formulation - souvent il faut utiliser plusieurs adjuvants.



On a besoin d'une très bonne ouvrabilité pour les structures avec beaucoup de renforcement



ou pour les bétons autoplacants

Contrôle Qualité

Slump
valeurs
typique



SPECIFIED SLUMP FOR CONCRETE

Type of Construction	Specified Slump (mm)
Mass concrete, pavements, topping concrete	40
Structural concrete, sidewalks, driveways, slabs on ground	80
Tremie concrete	170

Source: CSA A23.1-94

Residential construction, footings, foundation walls

150

Source: CSA A438

Cylindres (ou cubes) fait sur chantier pour verifir la resistance à 28 jours



Après ils sont stockés dans le labo en chambre humide ou sous l'eau avant d'être testé



Cylindres "in-situ"



Pour quelques ouvrages les cylindres sont fait dans le béton de la structure pour mieux repliquer les conditions de la structure



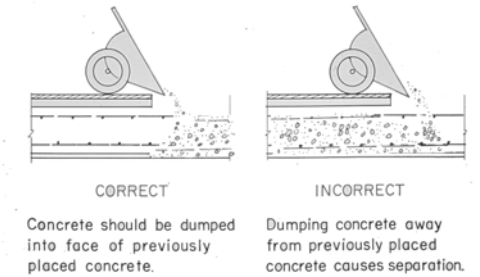
Mise en place

Exigences de base pour la mise en place du béton

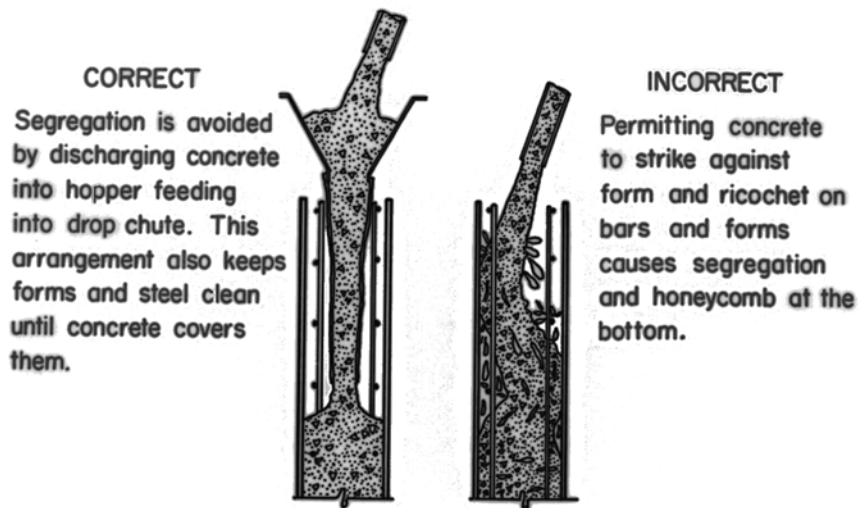
- Préserver les qualités du béton frais (homogénéité, consistance, teneur en air, etc.)
- Eviter la ségrégation
- Déverser le béton à proximité de sa destination finale
- Compacter le béton de façon efficace
- Planifier correctement les phases de mise en oeuvre
- Utiliser des moyens de mise en place adéquats



PLACING SLAB CONCRETE FROM BUGGIES



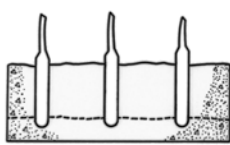
PLACING IN TOP OF NARROW FORM



Mise en place et Operations de finition

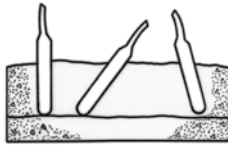


SYSTEMATIC VIBRATION OF EACH NEW LIFT



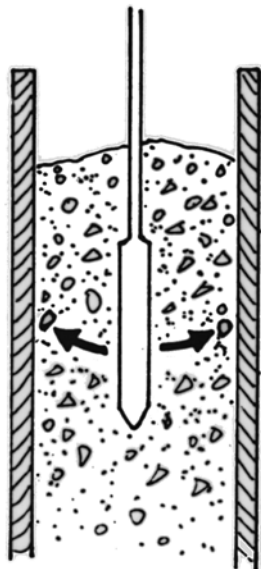
CORRECT

Vertical penetration of vibrator about 150 mm into previous lift (which should not yet be rigid) at systematic regular intervals will give adequate consolidation.

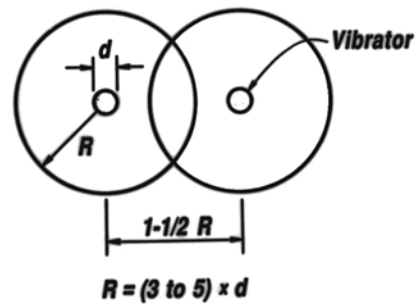


INCORRECT

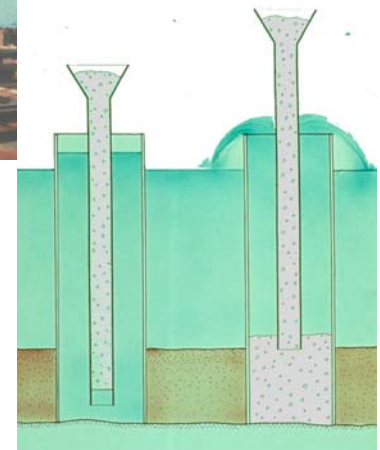
Haphazard random penetration of the vibrator at all angles and spacings without sufficient depth will not assure intimate combination of two layers.



RADIUS OF ACTION



TREMIE CONCRETE



Operations de finition

Dallage extérieur

- Placing {
- Compactage
 - Mise en place, compactage ←
 - Egalisation

Espace de temps

- Finishing {
- Façonnage des angles
 - Façonnage des joints
 - Lissage (Outil en Magnesium)
 - Texture de surface (brosse, rouleau denté)
 - Traitement de cure



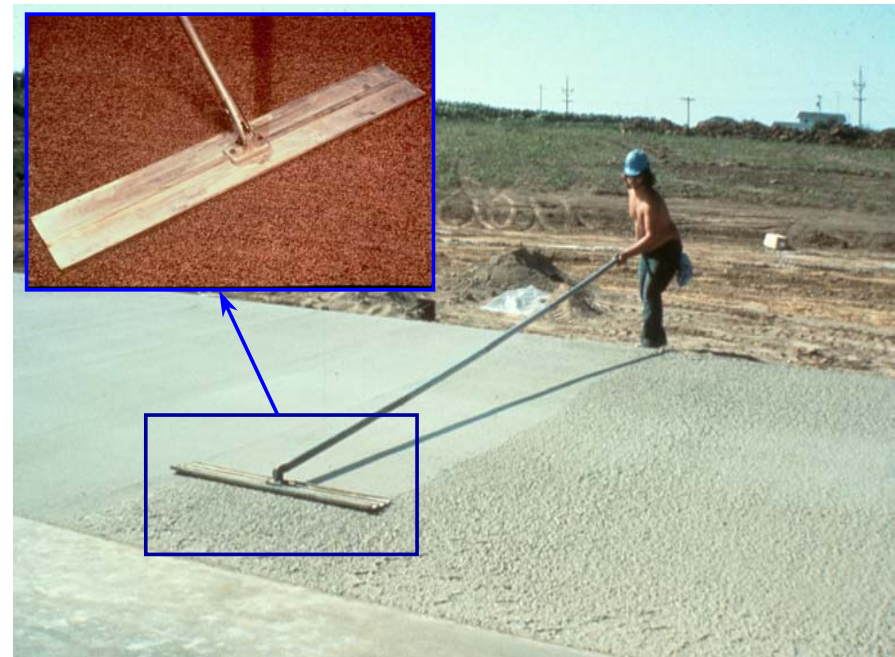


Operations de finition Dallage extérieur

- Placing {
- Compactage
 - Mise en place, compactage
 - Egalisation ←

Espace de temps

- Finishing {
- Façonnage des angles
 - Façonnage des joints
 - Lissage (Outil en Magnesium)
 - Texture de surface (brosse, rouleau denté)
 - Traitement de cure





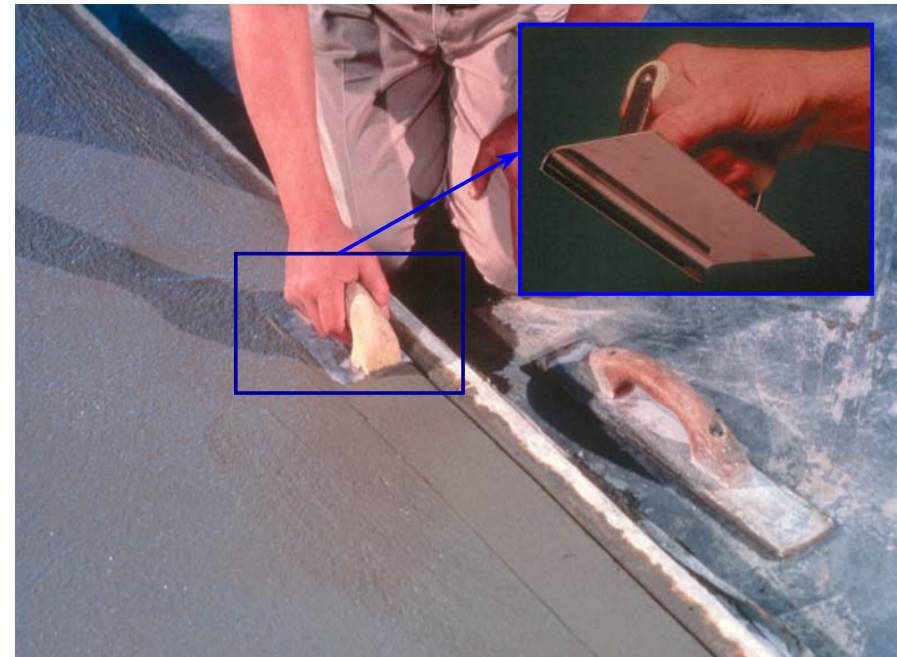
Operations de finition

Operations de finition Dallage extérieur

- Placing {
- Compactage
 - Mise en place, compactage
 - Egalisation

Espace de temps

- Finishing {
- Façonnage des angles
 - Façonnage des joints
 - Lissage (Outil en Magnesium)
 - Texture de surface (brosse, rouleau denté)
 - Traitement de cure

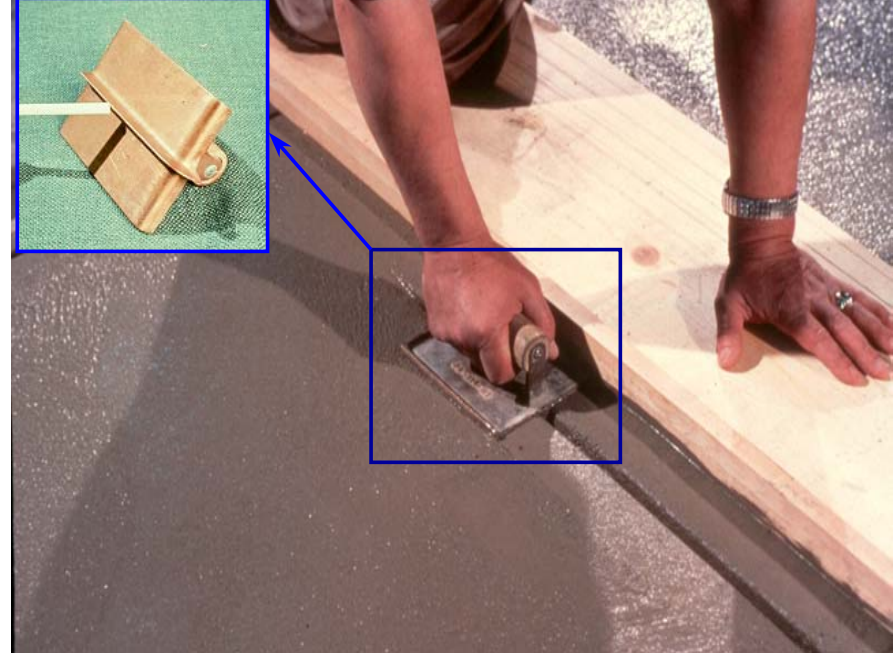


Operations de finition Dallage extérieur

- Placing {
- Compactage
 - Mise en place, compactage
 - Egalisation

Espace de temps

- Finishing {
- Façonnage des angles
 - Façonnage des joints ←
 - Lissage (Outil en Magnesium)
 - Texture de surface (brosse, rouleau denté)
 - Traitement de cure



Operations de finition Dallage extérieur

- Placing {
- Compactage
 - Mise en place, compactage
 - Egalisation

Espace de temps

- Finishing {
- Façonnage des angles
 - Façonnage des joints
 - Lissage (Outil en magnesium) ←
 - Texture de surface (brosse, rouleau denté)
 - Traitement de cure





Operations de finition

Dallage extérieur

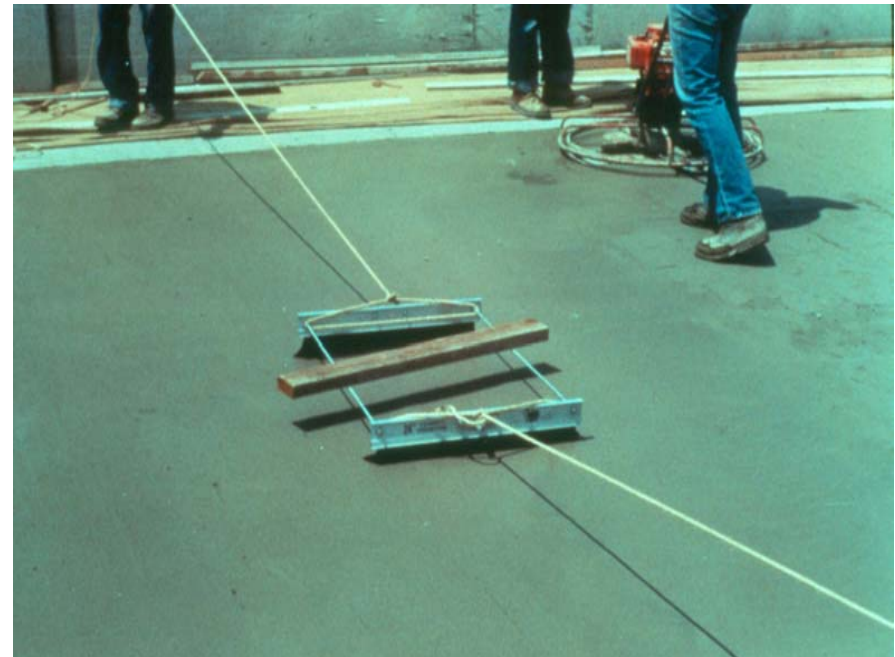
Placing

- Compactage
- Mise en place, compactage
- Egalisation

Espace de temps

Finishing

- Façonnage des angles
- Façonnage des joints
- Lissage (Outil en Magnesium)
- Texture de surface (brosse, rouleau denté) ←
- Traitement de cure



Operations de finition Dallage extérieur

- Placing {
- Compactage
 - Mise en place, compactage
 - Egalisation

Espace de temps

- Finishing {
- Façonnage des angles
 - Façonnage des joints
 - Lissage (Outil en Magnesium)
 - Texture de surface (brosse, rouleau denté)
 - Traitement de cure ←



Operations de finition Dallage extérieur

- Mise en place {
- Compactage
 - Mise en place, compactage
 - Egalisation

Espace de temps

- Finition {
- Façonnage des angles
 - Façonnage des joints
 - Surfaçage 1ère main (hélicoptère ou truelle) ←
 - Surfaçage 2ème main (hélicoptère ou truelle)

Espace de temps

- Finition à la main
- Traitement de cure



Operations de finition

Dallage extérieur

- Mise en place {
- Compactage
 - Mise en place, compactage
 - Egalisation

Espace de temps

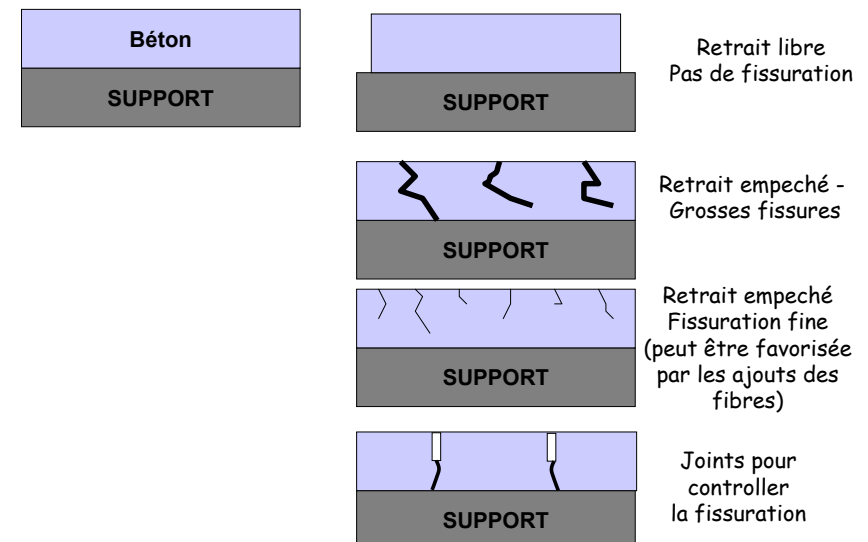
- Finition {
- Façonnage des angles
 - Façonnage des joints
- Si nécessaire
- Surfaçage 1ère main (hélicoptère ou truelle)
 - Surfaçage 2ème main (hélicoptère ou truelle)

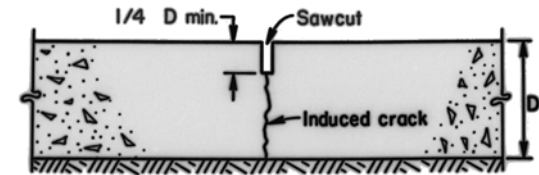
Espace de temps

- Finition à la main
- Traitement de cure

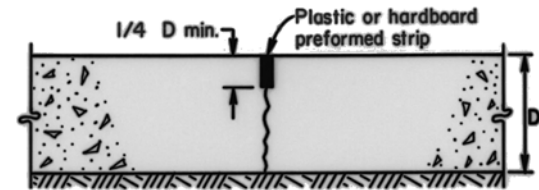


Introduction des joints





SAWED CONTROL JOINT



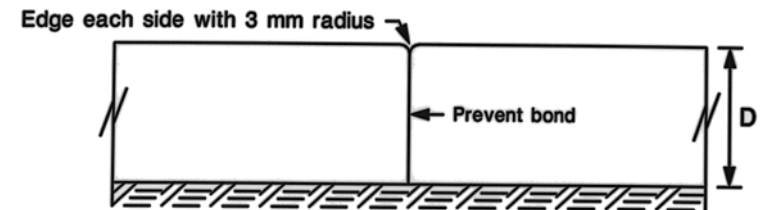
PREMOLDED INSERT CONTROL JOINT

SUGGESTED SPACING OF CONTROL JOINTS*

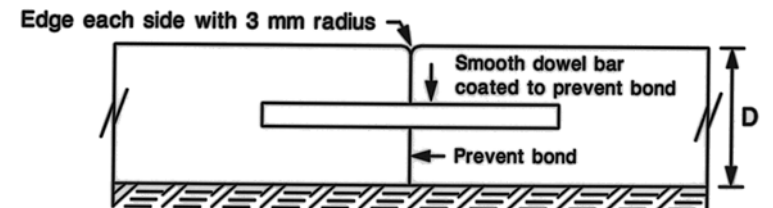
Slab thickness, mm	Slump 100 mm or more		Slump less than 100 mm spacing, m
	Less than 20 mm aggregate: spacing, m	20 mm or larger aggregate: spacing, m	
100	2.4	3.0	3.7
125	3.0	3.9	4.5
150	3.6	4.5	5.4
175	4.2	5.4	6.3
200	4.8	6.0	7.2
225	5.4	6.9	8.1
250	6.0	7.5	9.0

*Given spacings also apply to the distance from control joints to parallel isolation joints or to parallel construction joints.

CONSTRUCTION JOINTS



Butt-type Construction Joint

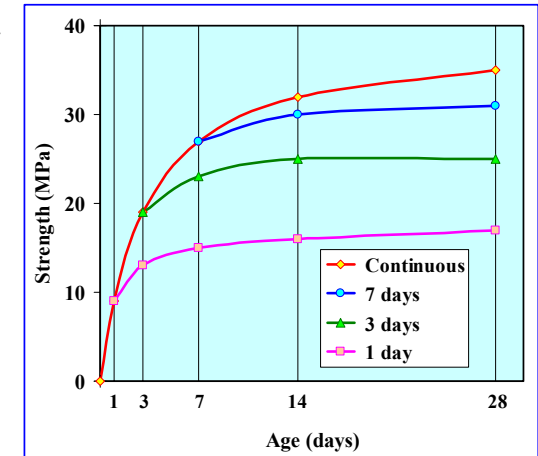


Butt-type Construction Joint With Dowel

Cure

Effet de conservation humide sur le developement de resistance

La surface du béton est particulièrement sensible aux effets de conservation. Le cœur du béton est protégé par la surface, il perd l'eau beaucoup plus lentement.



LES EFFETS D'UNE CURE (MATURATION) ADEQUATE SUR LE BETON DURCI

- | | |
|------------------------|----------------------|
| • Fissuration précoce | éliminée |
| • Gain en résistance | accéléré |
| • Résistance à l'usure | grandement améliorée |
| • Durabilité | grandement améliorée |
| • Étanchéité à l'eau | grandement améliorée |

En suisse

- **Specifiser dans le cahier des charges par l'ingénieur responsable**
- **Decoffrage ~ 24 hr**
- **+ ~3-7 jours conservation humide**

Curing Requirements – Norme Canadian

Basic Curing Period

3 days at 10°C minimum

or

Time to reach 35% of 28-day strength

Additional Curing for F-1, C-1, C-2, S-1, S-2 Exposure

Basic curing + additional 4 days at 10°C minimum

or

Time to reach 70% of 28-day strength

Methodes de cure des betons

- Mise sous eau ou arrosage continu
- Natte ou bâche continuellement humide
- Sable humide ou paille
- Produits de cure commercial
- Papier hydrofuge ou film plastique
- Étuvage avec vapeur d'eau (en préfabrication)
- Maintien du coffrage en place
- Autres méthodes approuvées par le maître de l'ouvrage



Methodes de cure des betons

- Mise sous eau ou arrosage continu
- Natte ou bâche continuellement humide
- Sable humide ou paille
- Produits de cure commercial
- Papier hydrofuge ou film plastique
- Étuvage avec vapeur d'eau (en préfabrication)
- Maintien du coffrage en place
- Autres méthodes approuvées par le maître de l'ouvrage



Methodes de cure des betons

- Mise sous eau ou arrosage continu
- Natte ou bâche continuellement humide
- Sable humide ou paille
- Produits de cure commercial
- Papier hydrofuge ou film plastique
- Étuvage avec vapeur d'eau (en préfabrication)
- Maintien du coffrage en place
- Autres méthodes approuvées par le maître de l'ouvrage



Methodes de cure des betons

- Mise sous eau ou arrosage continu
- Natte ou bâche continuellement humide
- **Sable humide ou paille**
- Produits de cure commercial
- Papier hydrofuge ou film plastique
- Étuvage avec vapeur d'eau (en préfabrication)
- Maintien du coffrage en place
- Autres méthodes approuvées par le maître de l'ouvrage



Methodes de cure

- Mise sous eau ou arrosage continu
- Natte ou bâche continuellement humide
- Sable humide ou paille
- **Produits de cure commercial**
- Papier hydrofuge ou film plastique
- Étuvage avec vapeur d'eau (en préfabrication)
- Maintien du coffrage en place
- Autres méthodes approuvées par le maître de l'ouvrage



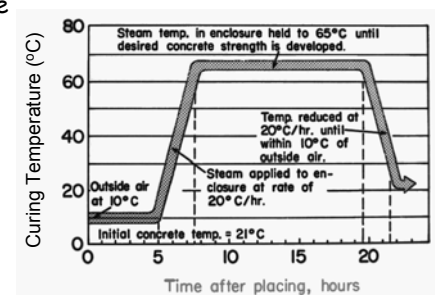
Methodes de cure

- Mise sous eau ou arrosage continu
- Natte ou bâche continuellement humide
- Sable humide ou paille
- Produits de cure commercial
- **Papier hydrofuge ou film plastique**
- Étuvage avec vapeur d'eau (en préfabrication)
- Maintien du coffrage en place
- Autres méthodes approuvées par le maître de l'ouvrage



Methodes de cure

- Mise sous eau ou arrosage continu
- Natte ou bâche continuellement humide
- Sable humide ou paille
- Produits de cure commercial
- Papier hydrofuge ou film plastique
- **Étuvage avec vapeur d'eau (en préfabrication)**
- Maintien du coffrage en place
- Autres méthodes approuvées par le maître de l'ouvrage



Methodes de cure

- Mise sous eau ou arrosage continu
- Natte ou bâche continuellement humide
- Sable humide ou paille
- Produits de cure commercial
- Papier hydrofuge ou film plastique
- Étuvage avec vapeur d'eau (en préfabrication)
- **Maintien du coffrage en place**
- Autres méthodes approuvées par le maître de l'ouvrage



Methodes de cure

- Mise sous eau ou arrosage continu
- Natte ou bâche continuellement humide
- Sable humide ou paille
- Produits de cure commercial
- Papier hydrofuge ou film plastique
- Étuvage avec vapeur d'eau (en préfabrication)
- Maintien du coffrage en place
- **Autres méthodes approuvées par le maître de l'ouvrage**



Tous se qui se passe dans cette première partie de la vie d'un béton peut avoir un impact sur la durablité

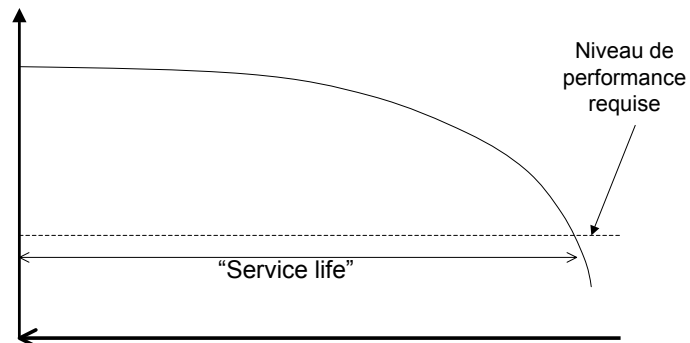
Durabilité



Bien que des ruptures structurelles se produisent, la plupart sont dues à des dégradations progressives des matériaux - i.e. manque de durabilité.

Durabilité

Maintien des performances



- **Un matériau n'est pas intrinsèquement durable ou non durable**
 - la durabilité est une fonction de l'interaction du matériau avec son environnement.
- **Un béton plus durable est un béton plus coûteux**

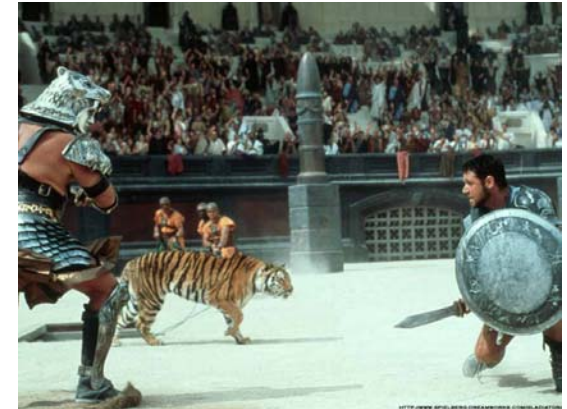
Certaines structures romaines durent depuis des millénaires



Pantheon (~ 120 a. J.C.)

Pourquoi cette excellente durabilité?

- Bonne qualité de construction
- (les punitions pour une mauvaise qualité étaient sévères)



Pourquoi cette excellente durabilité

- Bonne qualité de construction
- L'environnement était relativement benin



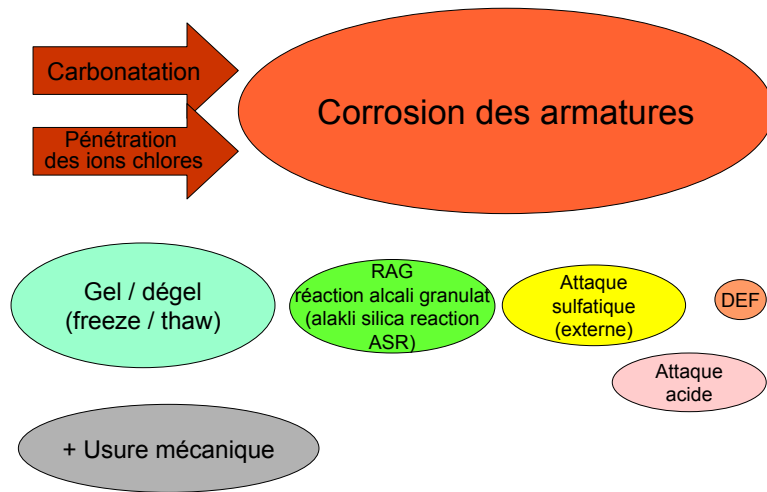
Pourquoi cette excellente durabilité

- Bonne qualité de construction
- L'environnement était relativement benin
- Le béton ne contenait pas d'acier



La cause principale d'une mauvaise durabilité est la corrosion des armatures

Causes de dégradation des bétons



Les dimensions du problème

- Dans les pays développés, les dépenses pour les réparations des structures en béton constituent entre 50% et 100% des dépenses par rapport aux constructions nouvelles.
- En 1991, le « *Transportation Research Board* » (USA) a estimé les frais de réparations nécessaires à cause de l'utilisation de sels de déverglacage comme suit:



- Tabliers des ponts	\$200M / an
- autres parties des ponts	\$100M / an
- parkings, etc.	\$100M / an
	\$400M / an

Manifestation des dégradations

Distribution des Fissures – “Map Cracking”



Misalignment (Distorsion)



Misalignment (Distorsion)



Fuites Seepage (Leaks)



Taches de rouille

Rust Staining



Délamination



Delamination



Spall



Echelonnage de surface



Surface Scaling

Désintégration

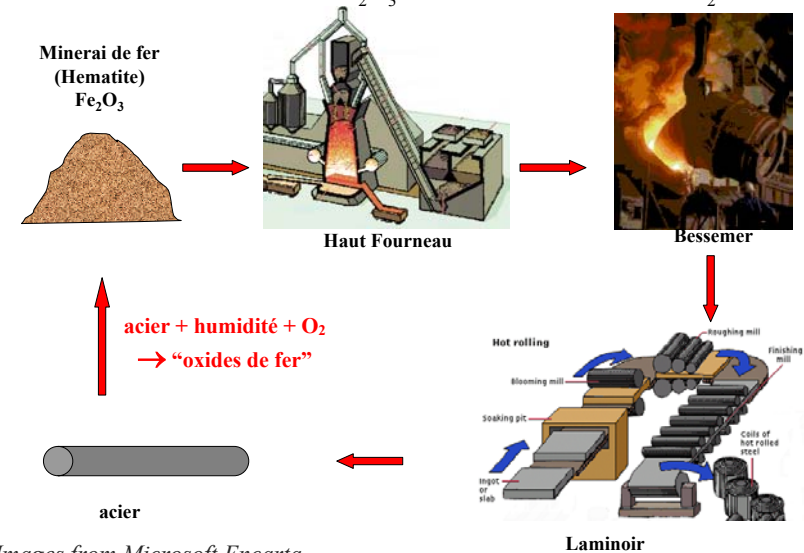
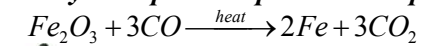
Disintegration



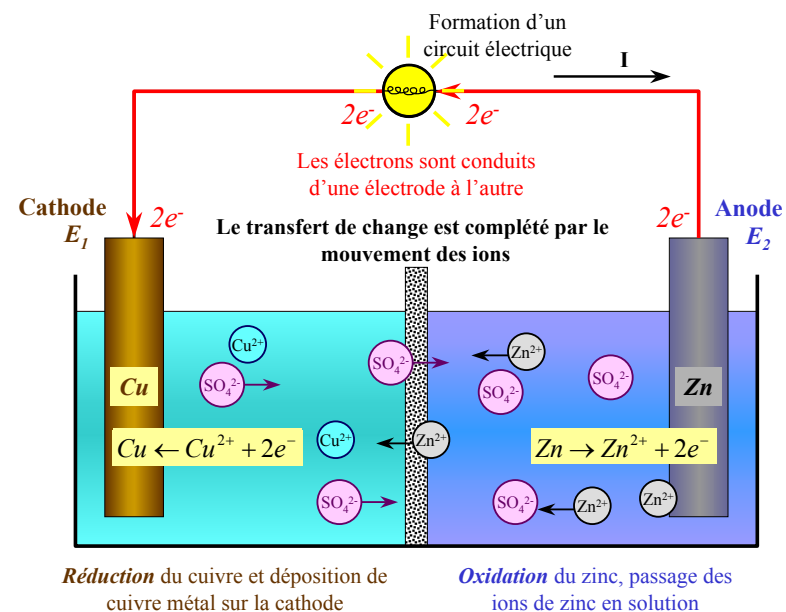
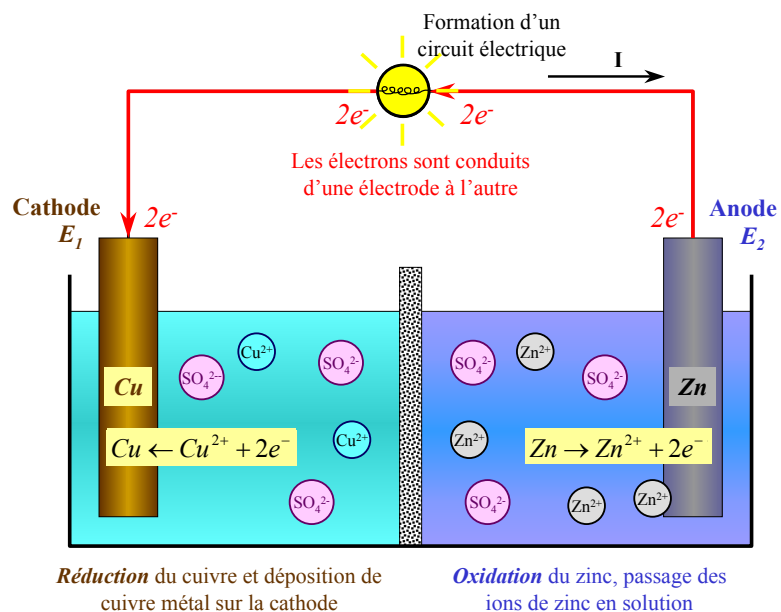
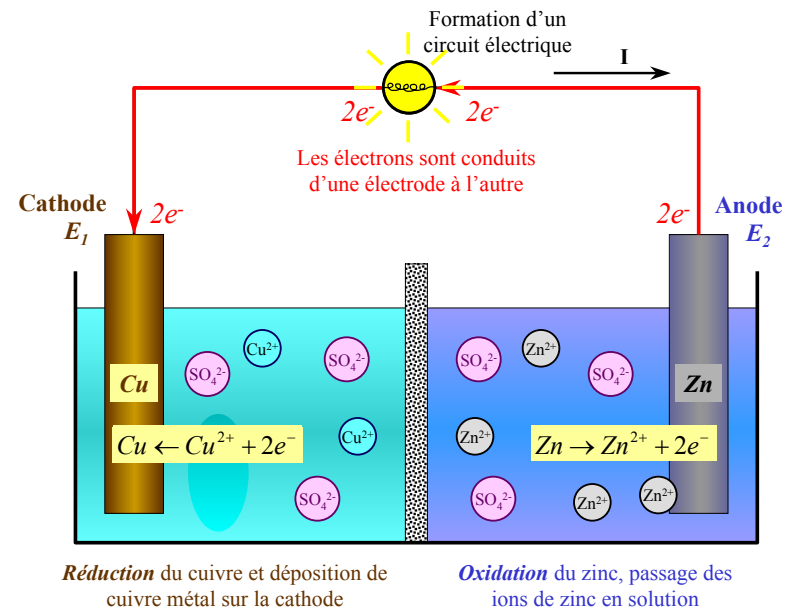
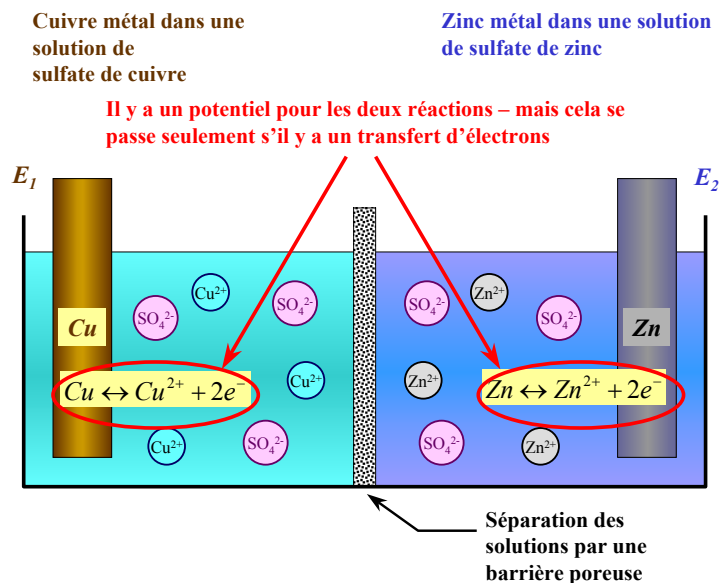
Corrosion des armatures

Un processus *électrochimique*

Les oxides de fer sont thermodynamiquement plus stables que le métal



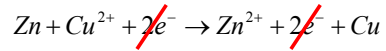
Images from Microsoft Encarta



Réaction anode: $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$ oxydation de zinc (moins d'électrons)

Réaction cathode: $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$ réduction de cuivre (plus d'électrons)

Ces deux réactions sont les réactions "half cell"
ensemble elles donnent la réaction complète:



ou

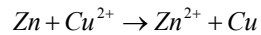
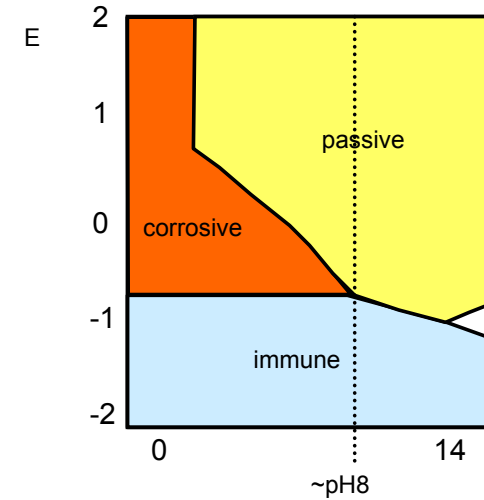
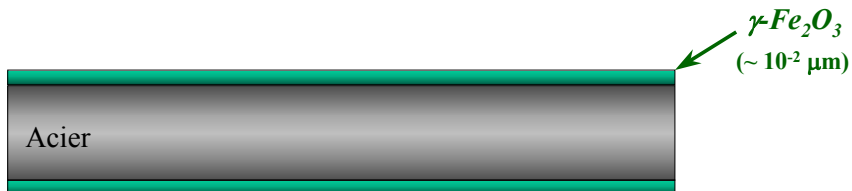
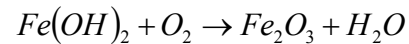
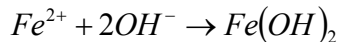
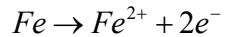


Diagramme « Pourbaix »



Les conditions alcalines (pH>13) dans un béton
favorisent la formation d'une couche passive sur l'acier



Passivation

Dans certaines conditions, les métaux vont se corroder et former un film d'oxide de métal dense, très adhérent sur leur surface.

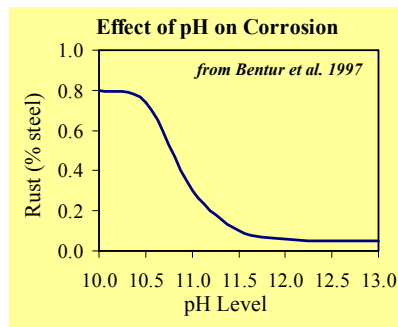
Cette couche isole le métal de l'électrolyte (et de l'oxygène), et empêche efficacement le processus de corrosion.

Ce processus est appelé **passivation** et le film à la surface la couche passive.

Aussi longtemps que la couche passive reste efficace, le processus de corrosion se maintient à un taux négligeable.

Pour que la couche passive reste efficace, elle doit former une couche dense, continue, uniforme, très adhérente sur la surface de métal.

L'efficacité/stabilité de la couche passive dépend des conditions environnementales entourant le métal.



L'acier n'est efficacement **passivé** que si la concentration de ions OH^- est assez élevée.

$$pH = 14 - \log[OH^-]$$

Dans le béton: $13 < pH < 14$

$$0.1 < [OH^-] < 1.0$$

L'acier dans le béton peut être **depassivé** en cas de:

- réduction du pH (concentration de ions OH^-)
- présence suffisante de chlorures dans l'acier pour "déstabiliser" la couche passive

pH du béton

Une solution poreuse de béton est presque entièrement composée d'alcali hydroxides - NaOH & KOH.

Généralement la somme des ions alcali est égale à la somme des ions hydroxydes - $[Na^+ + K^+] = [OH^-]$

Concentration de $[OH^-] > 0.1$ moles/litre - i.e. $pH > 13.0$

Un pH élevé est aussi **tamponné** par la présence d'hydroxide de calcium - $Ca(OH)_2$ - produit par l'hydratation du ciment

Une solution saturée $Ca(OH)_2$ a un pH ~ 12.4

Analyse Typique d'Oxide pour le ciment Portland

Oxide	OPC
SiO ₂	20.55
Al ₂ O ₃	5.07
Fe ₂ O ₃	3.10
CaO	64.51
MgO	1.53
K ₂ O	0.73
Na ₂ O	0.15
SO ₃	2.53
LOI	1.58

+ other trace elements

100 g de ciment contiennent:-

- 0.73 g d'oxide de potassium (K_2O)
≡ 0.61 g potassium (K)
- 0.15 g d'oxide de sodium (Na_2O)
≡ 0.11 g sodium (Na)

L'hydratation de 100 g de ciment produit approximativement 20 - 25 g de $Ca(OH)_2$

pH du béton



50 g eau

100 g ciment

pH du béton



30 g eau

120 g ciment hydraté

à 70% d'hydratation

En admettant que 70% des alcalis sont dissous

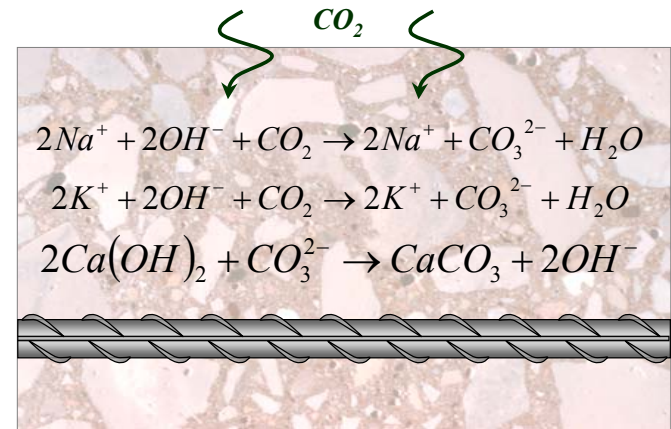
Il y a 0.42 g K^+ et 0.08 g Na^+ dans 30 ml d'eau

soit 14.1 g K^+ et 2.6 g Na^+ par litre d'eau

correspondant à 0.36 mol K^+ et 0.11 mol Na^+ par litre d'eau

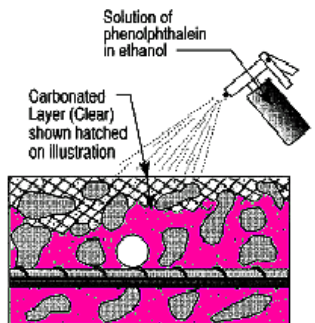
0.36 + 0.11 = 0.47 mol OH^- par litre d'eau associés avec les alcalis;
ce qui correspond à $pH = 14 - \log [0.47] = 13.67$

Carbonatation du béton



Note: d'autres hydrates (e.g. C-S-H) carbonatent aussi, mais ce n'est pas décrit ici.

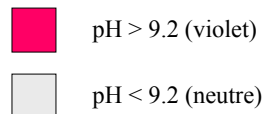
Carbonatation du béton



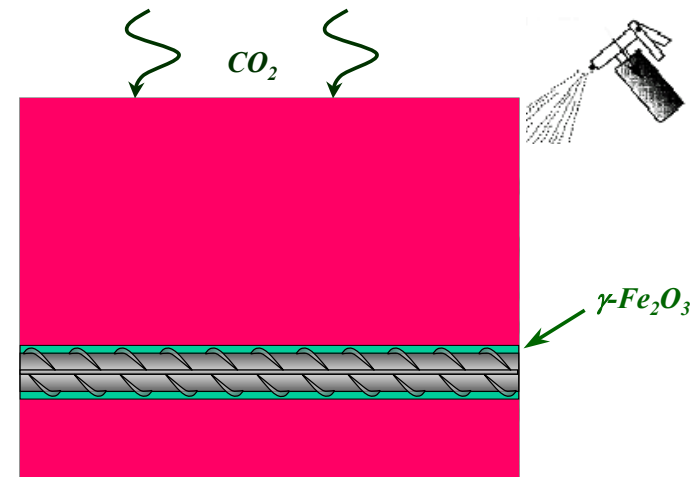
Surfaces with pH below 10 (carbonated) will have no change in color, with a pH above 10 the color of concrete will change to a pink color.

Le béton **carbonaté** a un $pH < 9.0$
(~ 8 selon Bentur *et al*, 1997)

Indicateur Phenolphthaléine (indicateur de base acide) est un moyen pratique de mesurer la profondeur de la carbonatation lorsqu'elle change de violet → neutre selon figure:

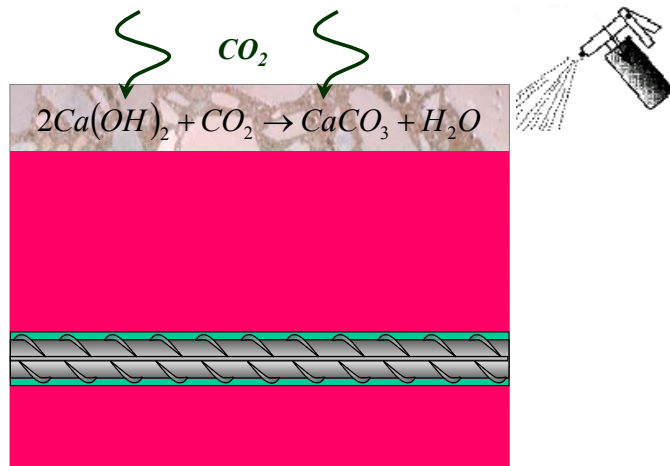


Carbonatation du béton



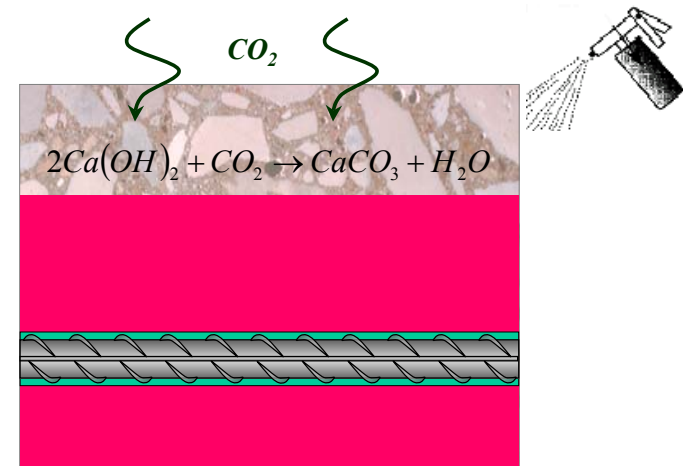
t_0

Carbonatation du béton



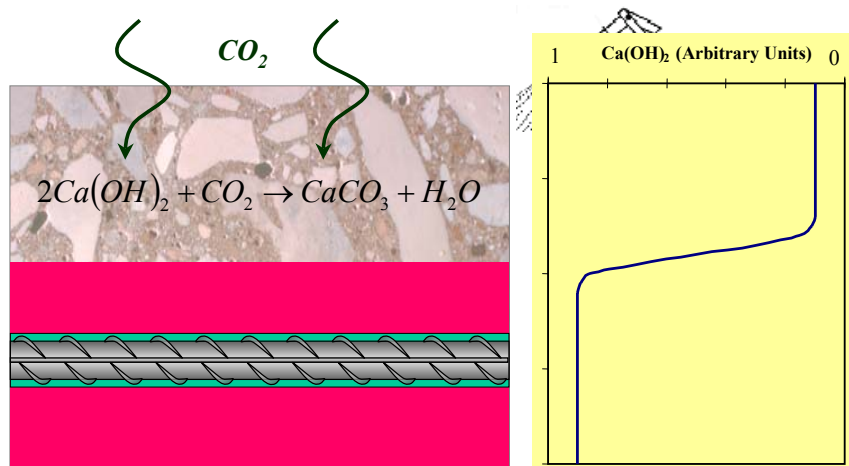
$$t_1 > t_0$$

Carbonatation du béton



$$t_2 > t_1$$

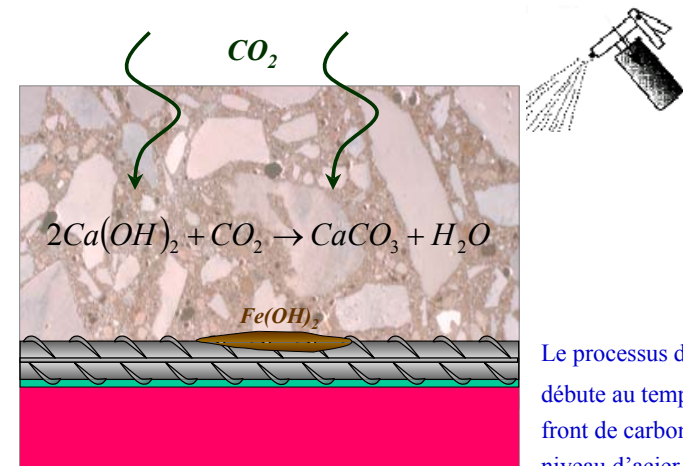
Carbonatation du béton



$$t_3 > t_2$$

Le front de carbonatation est abrupt
avec le changement de pH > 13 à pH < 9
se produisant sur quelques mm de béton

Carbonation of Concrete



$$t_i > t_3$$

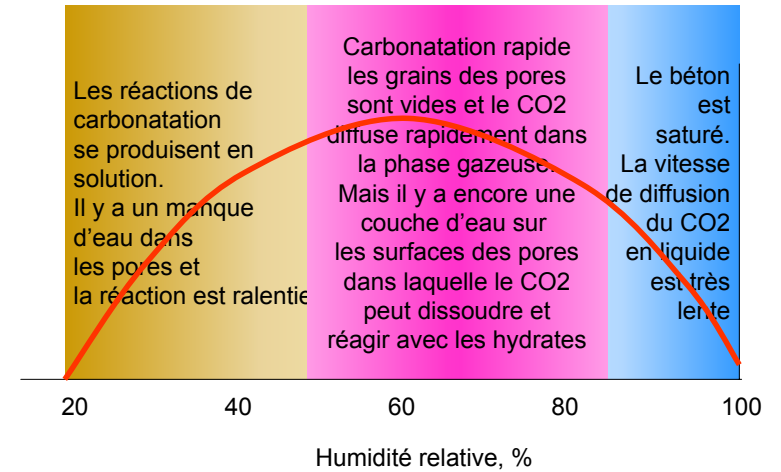
Le processus de corrosion
débute au temps t_i quand le
front de carbonatation atteint le
niveau d'acier



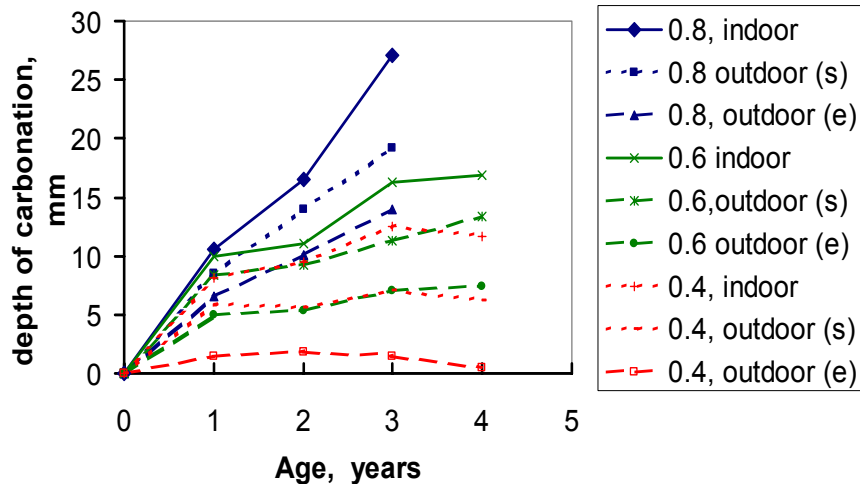
La photo 1 montre un éclat de béton résultant de la corrosion d'une barre d'armature – à noter les taches de rouille où la fissure atteint l'acier. Après avoir sprayé la surface fraîchement fissurée avec de la phenolphthaléine (Photo 2), on peut voir que la couche de béton sur la surface extérieure de la barre a été carbonatée (Photo 3). Beaucoup de béton entourant la barre d'armature reste hautement alcalin, cependant.

<http://www.comprehensus.com/comprehensus.html>

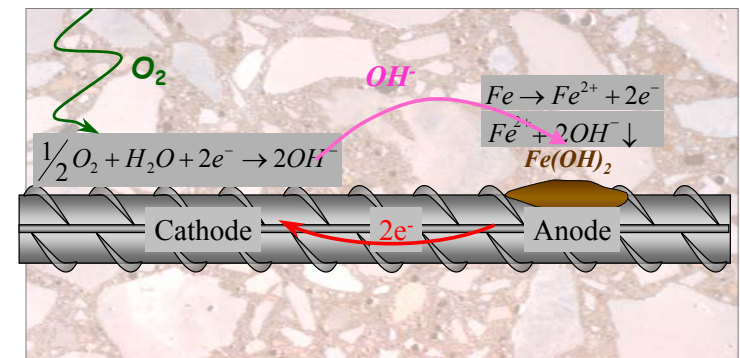
Vitesse de carbonatation



Epaisseur carbonatée



Quand l'alcalinité est réduite:

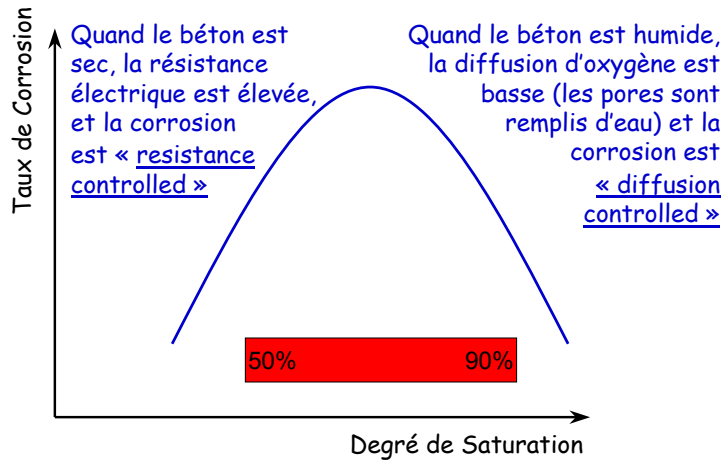


Corrosion active - la vitesse est contrôlée par:

1. l'arrivée d'oxygène à la cathode
2. Le transfert des ions OH^- de la cathode à l'anode

PERMEABILITÉ
DIFFUSION
RESISTIVITÉ

Effet de la teneur en eau sur vitesse de corrosion



Note:- l'eau participe également à la réaction cathodique.

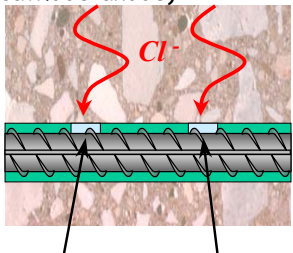
Effet des chlorures

Il est maintenant reconnu que la présence de ions chlore dans le béton armé peut provoquer la corrosion de l'acier (avec une présence suffisante de O_2 et H_2O pour soutenir la réaction).

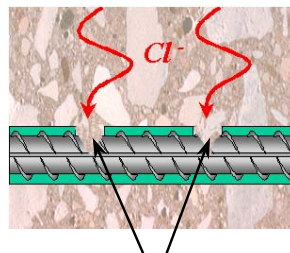
- La structure de la couche passive et sa dégradation par les chlorures n'est pas totalement comprise
- On pense généralement que les ions chlore s'introduisent dans la couche passive - remplaçant un peu de l'oxygène et augmentant à la fois sa solubilité, sa perméabilité et sa conductivité ionique
- La couche passive perd donc sa propriété protectrice
- Il y a une concentration critique des ions chlore qui provoque la corrosion

Effet des chlorures

- Les ions chlore sont rarement distribués de manière homogène à la surface de l'acier et il subsiste quelques imperfections dans la couche passive qui facilitent l'incorporation des ions chlore
- Par conséquent, la dégradation de la couche passive est un phénomène local
- Cela conduit à une corrosion par piqûre (avec un taux élevé de cathode-anode)

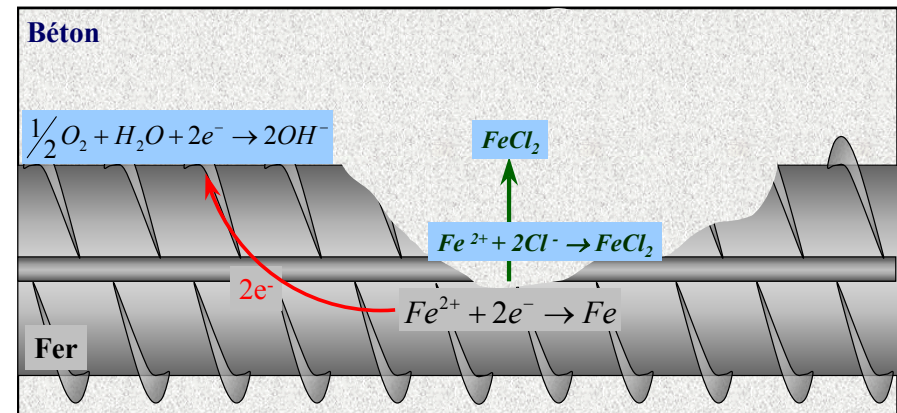


Défauts dans la couche passive et/ou Cl^- élevé



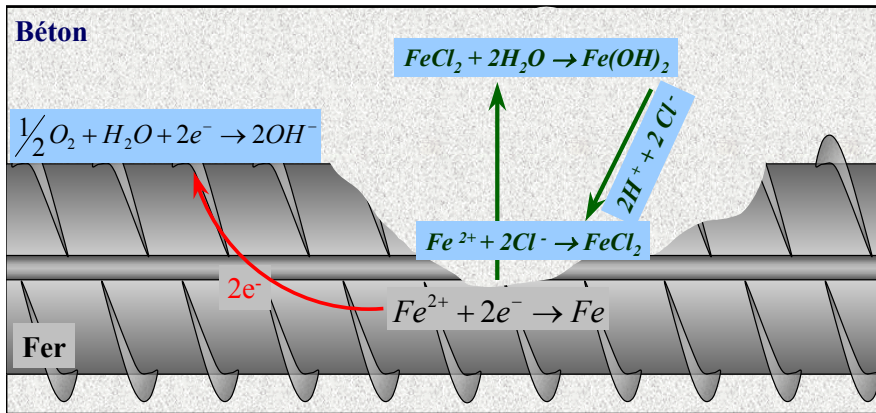
Piqûres

Rôle des chlorures dans la corrosion par piqûre



La présence de chlorures favorise également la formation chlorure ferreux, qui est soluble dans le faible pH qui existe à l'anode. Le $FeCl_2$ est facilement évacué de l'anode, empêchant par conséquent la fabrication de ions Fe^{2+} qui pourraient freiner le processus de corrosion.

Rôle des chlorures dans la corrosion par piqûre



A quelque distance de l'anode, où la concentration de pH et d' O_2 est plus élevée, le $FeCl_2$ se dégrade, $Fe(OH)_2$ précipite, le Cl^- et H^+ retournent à l'anode.

Ainsi le processus se reproduit sans cesse et au lieu de s'étendre le long de la barre – la corrosion se poursuit localement à l'anode et des piqûres profondes se forment.

Piqûre profonde causée par une attaque de chlorure



<http://www.vectorgroup.com/CorrosionOverview.pdf>

Sources de chlorures dans le béton

- Adjuvants chimiques
 - e.g. $CaCl_2$ utilisé comme accélérateur d'hydratation
 - Quelques autres peuvent contenir de faibles quantités de Cl
- Certains granulats peuvent contenir du $NaCl$
 - e.g. sable de mer
 - granulat contenant le minéral *halite*
- L'eau de gâchage peut contenir des chlorures

Provenance
interne de chlorures

Les normes limitent la teneur en chlorures des bétons.

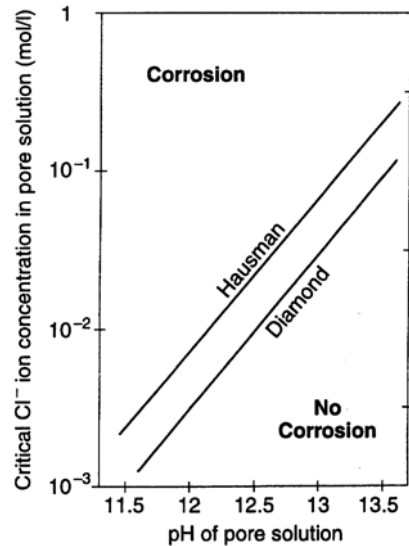
EX. norme canadienne	% Chlorure (soluble) (par masse béton)
Béton précontraint	0.06
Béton armé dans un environnement humide et/ou avec présence de chlorures	0.15
Béton armé en atmosphère sèche, en absence de chlorures	1.0

Sources de chlorures dans le béton

- Chlorure dans l'eau de mer (structures marines, ports, plate-formes pétrolières, ponts côtiers, tunnels, bateaux)
- Chlorure dans l'eau souterraine (structures enterrées, pilônes, tunnels, fondations)
- Chlorure de sels de déverglacage ~ e.g. (autoroutes, ponts, parkings, etc.)

Sources externes de chlorures

Concentration critique de chlorures



Actions contradictoires vis-à-vis de la couche passive:

$Cl^- \rightarrow$ destruction

$OH^- \rightarrow$ stabilisation

Il a été montré que le rapport molaire des ions chlore aux ions hydroxydes est le facteur critique qui gouverne le développement de la corrosion de l'acier dans le béton. Diamond suggère que la corrosion est probable lorsque:

$$\frac{[Cl^-]}{[OH^-]} > 0.3$$

Bentur et al, 1997

pH du béton



30 g eau

120 g ciment hydraté

à 70% d'hydratation

Dans la solution ci-dessus, la concentration de OH^- est de 0.47 mol par litre.

La concentration critique en chlorures sera donc de $0.3 \times 0.47 = 0.14$ mol/L Cl^- – soit 5 g/L Cl^- .

Concentration critique de chlorures

Il est plus courant de spécifier la teneur en chlorures par rapport à la masse du béton, plutôt qu'en concentration de solution dans les pores.

La teneur en chlorures peut être exprimée en % de la masse du ciment (courant en Europe) ou du béton (Amérique du Nord).

La teneur en chlorures est exprimée par rapport à la masse du ciment de façon à tenir compte du taux d'alcalinité du système (OH^-) qui dépend du ciment.

L'alcalinité du béton dépend entre autres de la teneur en alcalis du ciment et du rapport E/C.

Il est difficile de déterminer la teneur en ciment du béton durci, c'est pourquoi il est plus simple d'exprimer les chlorures en % de la masse du béton.

La teneur en chlorures dépend de son mode de détermination - i.e.

Chlorures totaux > chlorures solubles dans l'acide > chlorures solubles dans l'eau

Concentration critique de chlorures

Beaucoup d'études empiriques ont été effectuées, visant à déterminer la teneur en chlorures critique ou la valeur limite de la teneur en chlorures.

Des études menées par le

“*Building Research*

Establishment” ont établi les

directives suivantes (*BRE*

Digest 263, 1982) $\rightarrow$

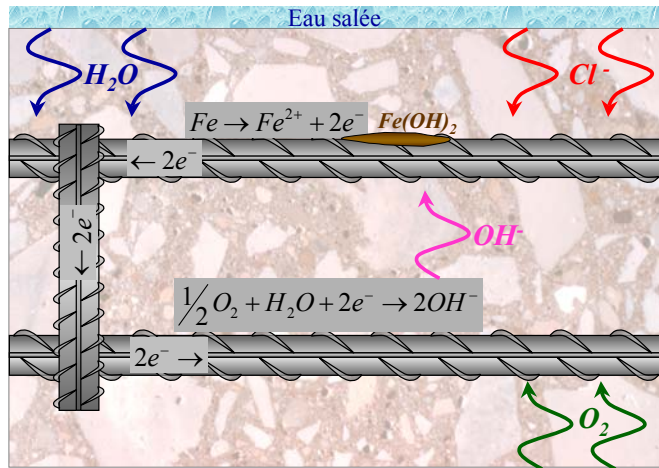
Total Chlorures (%-masse de ciment)	Risque de corrosion
< 0.2	Négligeable
0.2 to 0.4	Bas
0.4 to 1.0	Moderé
> 1.0	Elevé

La valeur limite de la teneur en chlorures, $C_t = 0.4\%$ par masse de ciment est fréquemment utilisée lors d'études de corrosion (e.g. prévision durée de vie, etc.)

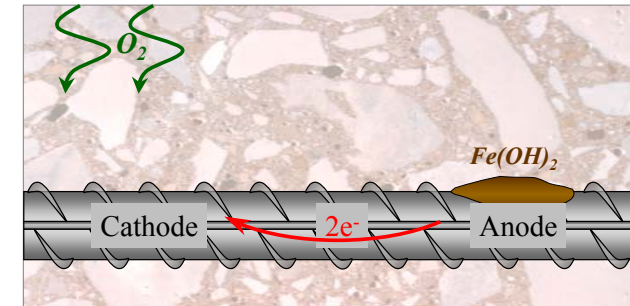
Pour des bétons avec des teneurs en ciment de 300 à 400 kg/m³ cette valeur se traduit par $C_t = 0.05$ to 0.07% par masse de béton (en supposant une densité du béton de 2350 kg/m³)

Pour les besoins de ce cours, nous supposons que la valeur limite de la teneur en chlorures acide-soluble est $C_t = 0.05\%$ par masse de béton.

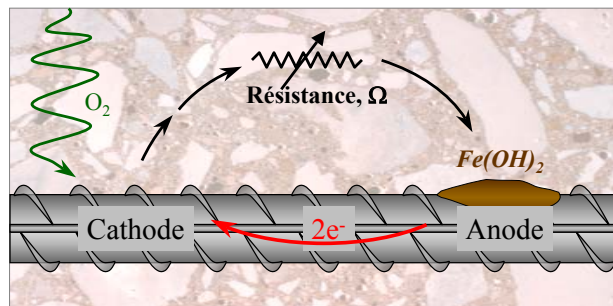
Corrosion macrocellulaire dans le béton



Corrosion microcellulaire dans le béton



Taux de corrosion dans le béton

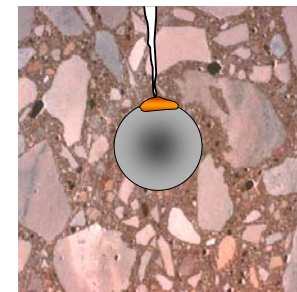


Le taux de corrosion, une fois débuté est contrôlé par:

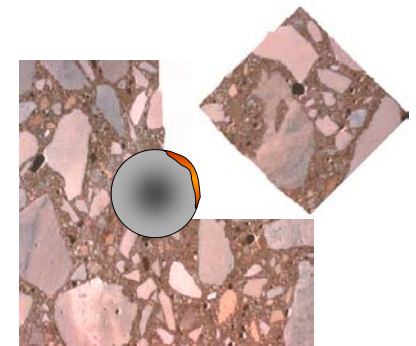
- Le taux de diffusion d'oxygène
- La résistance électrique du béton entre anode & cathode

Le taux de corrosion peut être réduit par l'utilisation de béton à faible diffusion d'oxygène et haute résistance électrique – 2 caractéristiques de béton à faible pourcentage de E/C et contenant des matériaux cimentaires supplémentaires (i.e. Béton haute performance)

Conséquences de la corrosion sur le béton

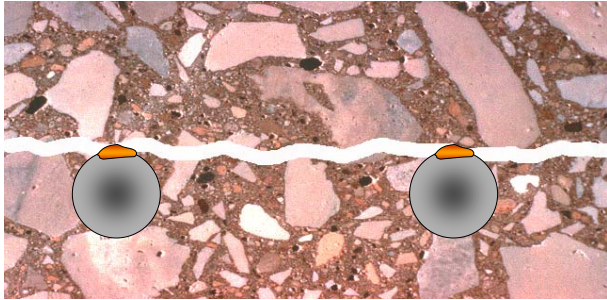


Fissuration



Spalling

Conséquences de la corrosion sur le béton

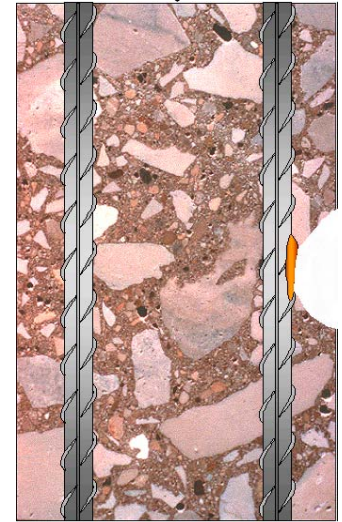


Délamination

Conséquences de la corrosion sur le béton

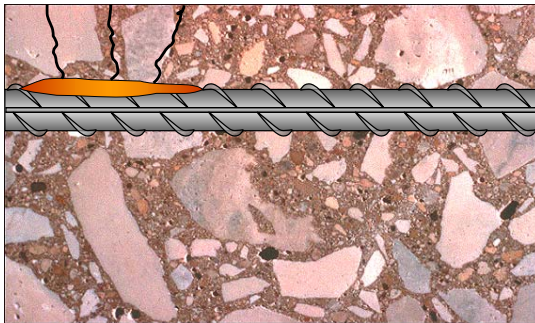


Perte de section



Excentricité

Conséquences de la corrosion sur le béton



Perte d'adhérence

Autres conditions de corrosion

Dégât dans le béton précontraint

➤ Corrosion sous contrainte

- Se produit en présence de forte contrainte dans un environnement corrosif.
- Peut être considéré comme un cas extrême de corrosion par piquê avec la formation d'une micro cavité.
- Le fond de la cavité est sujet à une forte concentration de contraintes, pendant la dissolution anodique.
- Cet ensemble de sollicitations induit une propagation rapide de la fissure en fond de cavité.
- Ce processus se développe à une échelle macroscopique conduisant à des ruptures fragiles.

Comment augmenter le temps avant carbonatation ou pénétration des ions chlore, jusqu'au renforcement

- **Augmenter la couche de béton entre l'environnement et les armatures – « cover »**
- **Diminuer la vitesse de pénétration du CO_2 ou Cl^- – “perméabilité”**