

Chapitre I : Durabilité du béton

I.1 Notions de durabilité des bétons

Un ouvrage **doit résister** au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...) c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant...tout en conservant son esthétisme. Il doit satisfaire, avec un niveau constant, les besoins des utilisateurs au cours de sa durée de service.

La durabilité de l'ouvrage caractérise **sa capacité à conserver les fonctions d'usage**, pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers), et **à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement**, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible.

La seule durabilité intrinsèque du béton ne suffit plus à garantir la durée de service de l'ouvrage. Prescrire un béton durable nécessite donc d'apprécier, dès sa conception, l'ensemble des contraintes environnementales, des agressions et des attaques potentielles, qu'il aura à subir pendant toute sa durée de service, et de respecter et mettre en œuvre les recommandations en vigueur. Il convient de ne pas assimiler la durabilité d'un produit de construction à celle de l'ouvrage. En effet, il est inutile de formuler un béton intrinsèquement durable, si sa mise en œuvre au sein de la structure n'est pas conforme aux règles de l'art et si les diverses sollicitations auxquelles il est soumis n'ont pas été correctement appréciées, ce qui conduirait à ce que l'ouvrage ne remplisse pas durablement sa fonction pendant sa durée de service requise.

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, la qualité des matériaux et des produits utilisés, la qualité des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage et de la mise en œuvre des produits ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance.

Pour s'assurer de cette durabilité, pendant longtemps, les bétons ont été spécifiés en considérant les performances mécaniques requises à 28 jours associées éventuellement à un dosage minimum en ciment. Pour la construction d'une structure, seules les exigences de résistance et de comportement en service étaient prises en compte. Un béton performant ayant en principe un dosage correct en ciment et une bonne compacité, ces deux prescriptions pouvaient effectivement garantir une certaine durabilité du matériau béton.

Il est possible de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée de service souhaitée. Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal des armatures et la teneur maximale en chlorures dans le béton. Les connaissances actuelles sur les ciments et les bétons permettent d'optimiser et d'adapter encore mieux la composition et la formulation des bétons aux contraintes environnementales auxquelles ils seront soumis, tout en respectant les critères de performances mécaniques.

I.2 Les bétons

En bref le béton est un:

Mélange d'agrégat (sable plus granulat) et de la pâte composée: de ciment, d'eau et d'adjuvant

- La pate 30 à 40%
 - Ciment portland 7% to 15% par volume
 - Eau 14% to 21% par volume
- Agrégats 60% à 80%
 - Gros granulats
 - Granulats fins
- Adjuvants chimiques

I.3 Les ciments

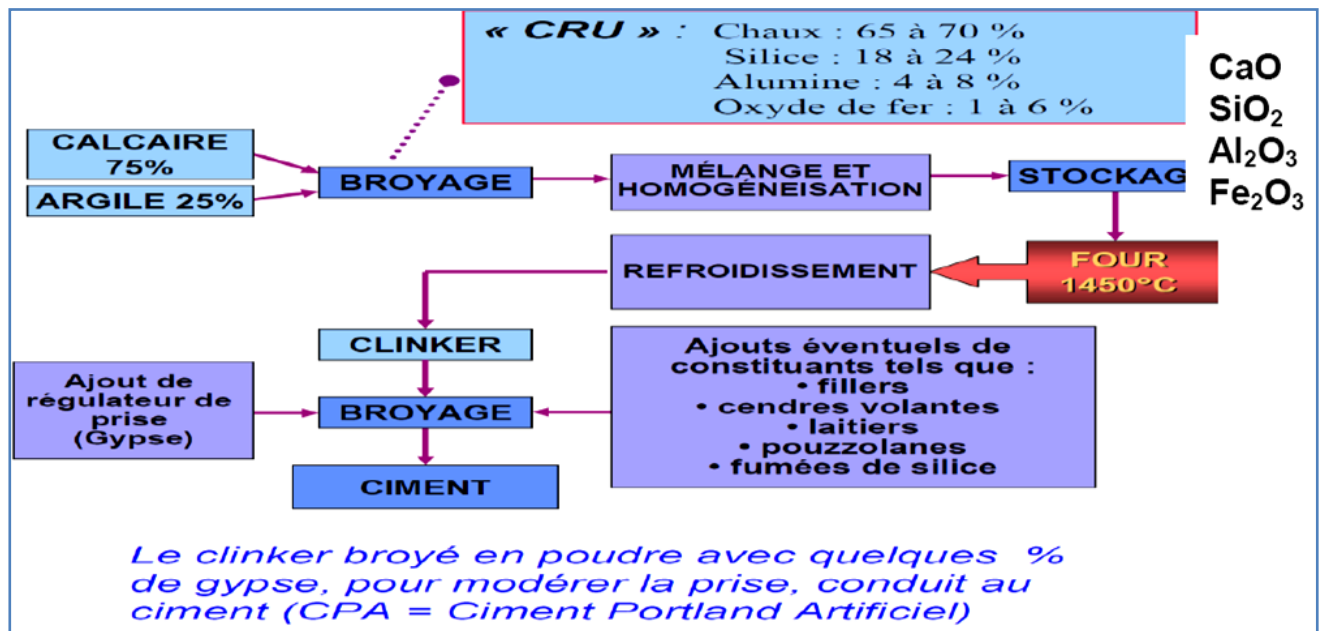
On parle du composant principal du béton qui est le ciment. Il est d'origine calcaire, qui a la propriété de faire la prise et de durcir en présence d'eau en raison de sa réaction chimique avec celle-ci; il est appelé ciment hydraulique.

- **Constituants du ciment portland**

$$\text{Le ciment} = \begin{array}{ccc} \text{Argile} & + & \text{Calcaire} \\ \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 & + & \text{CaO} \end{array}$$

$$\underbrace{\text{La silice} \quad \text{L'alumine} \quad \text{L'oxyde de fer}}_{\text{Les oxydes}} + \text{La chaux}$$

$$(\text{C}_3\text{S} + \text{C}_2\text{S} + \text{C}_3\text{A} + \text{C}_4\text{AF}) + \text{CS.}$$



I.3.1 Constituants du clinker

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont:

- Le silicate tricalcique $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_3S) .
- Le silicate bicalcique $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_2S)
- L'aluminate tricalcique $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique) $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)
-

I.3.2 L'hydratation du ciment

L'hydratation du ciment est la réaction chimique entre l'eau et le ciment qui donne comme résultat la pâte de ciment hydratée. Il s'agit des séquences réactionnelles des principaux composés du ciment avec une dominance pour le C_3S et le C_3A à court terme.

Le C_3S est la phase la plus importante du ciment. La chaleur dégagée par cette phase est l'une des plus élevée. La majeure partie de son hydratation se passe dans les 28 premiers jours. La réaction complète peut prendre jusqu'à une (1) année.

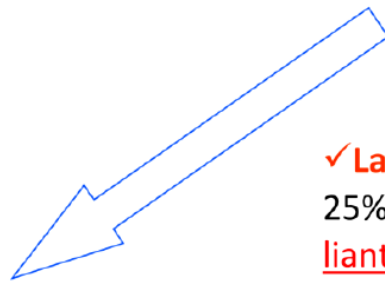
La vitesse d'hydratation de C_2S est beaucoup plus faible que celle du C_3S . Le C_2S va surtout participer au développement des résistances après 28 jours et dégage une très faible chaleur.

Les produits d'hydratation sont le silicate de calcium hydraté (C-S-H) et l'hydroxyde de calcium ou portlandite.

❖ *Hydratation des silicates C2S et C3S*

Les deux silicates s'hydratent immédiatement en présence de l'eau

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

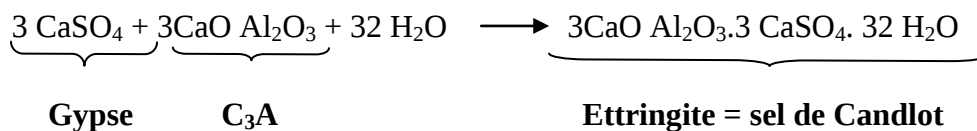


✓ La portlandite occupe de 20 à 25%. Structure cristallisée. (non-liant)

✓ Les C-S-H : peu cristallisés ("gel") et liants, ce sont les hydrates les plus importants. (50% à 60% du volume de pâte de ciment hydratée)

❖ *Hydratation des Aluminates C3A et C4AF*

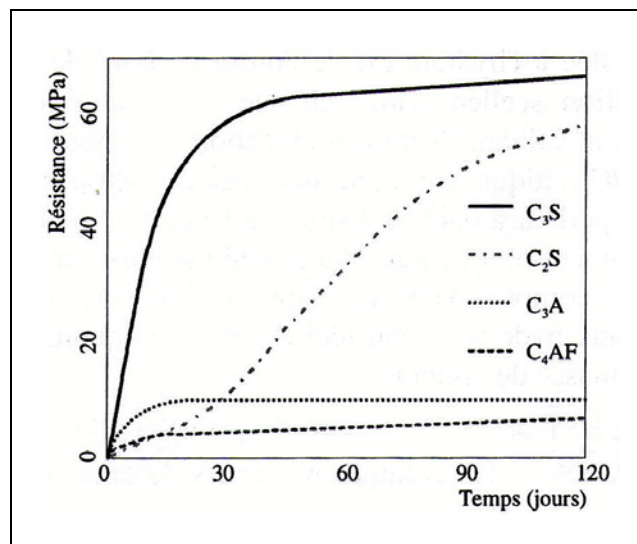
- L'hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A est très rapide et violente surtout en absence des sulfates et donne des aluminates hydratés qui bloquent l'hydratation des autres composants et résultent un mauvais béton, ce qui mène à utiliser le gypse comme régulateur de prise.



- L'alumino ferrite tétracalcique (C_4AF): Il possède une séquence réactionnelle proche de celle de C_3A avec une vitesse plus faible et il dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance.

• Les mécanismes d'hydratation du ciment transforment un milieu fluide en un corps solide, par développement de la microstructure car la porosité de pâte diminue au fur et à mesure de l'avancement des réactions d'hydratation, ce qui développe les performances mécaniques, en particulier la résistance en compression.

- le C_3A est un indésirable dans le ciment, car si la pâte durcie est attaquée par des eaux sulfatées, il peut y avoir formation de sulfoaluminates et la pâte risque d'éclater. Mais d'autre part, l'alumine est nécessaire dans le ciment car elle facilite les réactions dans le four rotatif.
- Une pâte de ciment hydratée contient: 50 à 70% de **C-S-H** et 25 à 27% de **Ca (OH) $_2$** .
- Le **Ca (OH) $_2$** est l'hydrate qui joue le rôle principal sur la durabilité car la chaux passive les armatures du béton armé, et elle permet de mobiliser une réaction pouzzolanique avec certains fines réactives, en formant des **C-S-H** secondaires
- La portlandite et les C-S-H remplissent peu à peu les pores, et le matériau devient dense et solide
- L'élément chimique le plus important pour le développement de la résistance mécanique du ciment est le C3S



Evolution de la résistance en compression des composants du ciment

I.4 L'eau de gâchage :

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher du béton, car parfois elles contiennent un excès d'impuretés qui dégrade les propriétés physiques et mécaniques du béton et menacer sa durabilité.

L'eau est nécessaire pour l'hydratation du ciment. Il Donne au béton une **consistance suffisamment fluide** pour qu'il puisse être utilisé.

- Départ de l'eau en excès $\Rightarrow$ présence de vides dans le béton durci (porosité) $\Rightarrow$ deux conséquences majeures:

1/diminution des résistances mécaniques des bétons

2/ détérioration de leur durabilité car les bétons, plus poreux (donc plus perméables), sont plus accessibles aux agents extérieurs agressifs.

Selon la norme européenne **EN 1008**, évaluation de l'aptitude d'une eau à être employée, différents critères sont à satisfaire:

a) Critères sensoriels: (voir le tableau 1)

- Odeur: une eau malodorante doit être suspectée de contenir des matières organiques en décomposition.
- La vue: après la décantation, si l'eau garde une couleur foncée, doit être considérée comme douteuse

Tableau 1: Conditions pour qu'une eau soit utilisable (critères sensoriels)

Type d'essai	Méthode d'essai	Utilisable si	Renvoi aux conditions du tableau 3
Couleur	Inspection visuelle dans un cylindre de mesure placée devant un arrière-plan blanc (laisser se décanter les matières en suspension)	Incolore, voire légèrement jaunâtre	Foncé ou coloré (rouge, vert, bleu)
Huile ou matières grasses	Inspection visuelle	Trace uniquement Emulsion d'huile	Pellicules d'huile
Détergents	Agiter vigoureusement l'échantillon d'eau dans un cylindre	Légère formation de mousse, stabilité de la mousse < 2 min	Formation importante de mousse, stabilité de la mousse > 2 min.
Matières en suspension	Cylindre de mesure de 80 cm ³	$\leq 4 \text{ cm}^3$	$> 4 \text{ cm}^3$
Odeur	Ajouter HCl	Aucune odeur, voire pas plus d'une légère odeur	Forte odeur (par exemple, sulfure d'hydrogène)
Valeur de pH	Papier indicateur / indicateur liquide	≥ 4	< 4
Substances humiques	Dans une éprouvette verser 5 cm ³ de soude caustique à 3 ou 4 %. Agiter. Procéder à l'inspection visuelle au bout de 3 min	Plus pâle que brun jaunâtre	Plus foncé que brun jaunâtre

b) Critères chimiques: il s'agit du dosage de l'eau en chlorures, sulfates, phosphates, nitrates,...etc (Tableau 2).

Tableau 2: Conditions pour qu'une eau soit utilisable (critères chimiques)

Ions à considérer	Utilisable si	Renvoi aux conditions tableau 3	Impropre à l'utilisation si
Chlorures (Cl^-) :			
- Béton précontraint/coulis	$\leq 600 \text{ mg/l}$		$> 600 \text{ mg/l}^*$
- Béton armé	$\leq 2\,000 \text{ mg/l}$	$> 4\,500 \text{ mg/l}$	$> 2\,000 \text{ mg/l}^*$
- Béton non armé	$\leq 4\,500 \text{ mg/l}$		
Sulfates (SO_4^{2-})	$\leq 2\,000 \text{ mg/l}$	$> 2\,000 \text{ mg/l}$	
Sucre:			
- Glucose	$\leq 100 \text{ mg/l}$	$> 100 \text{ mg/l}$	
- Saccharose	$\leq 100 \text{ mg/l}$	$> 100 \text{ mg/l}$	
Phosphates (P_2O_5)	$\leq 100 \text{ mg/l}$	$> 100 \text{ mg/l}$	
Nitrates (NO_3^-)	$\leq 500 \text{ mg/l}$	$> 500 \text{ mg/l}$	
Zinc (Zn^{2+})	$\leq 100 \text{ mg/l}$	$> 100 \text{ mg/l}$	
Sulfures (S^{2-}) ^{**}	$\leq 100 \text{ mg/l}$	$> 100 \text{ mg/l}$	
Sodium (Na^+) ^{***} Potassium (K^+)	Au total $\leq 1\,000 \text{ mg/l}$		$> 1\,000 \text{ mg/l}$
* L'eau peut néanmoins être acceptée si la teneur maximale en chlore (Cl^- du béton est inférieure à 0,2 % par kg de ciment pour le béton précontraint, 0,4 % par kg de ciment pour le béton armé, 1 % par kg de ciment pour le béton non armé). ** N'est exigé que pour les bétons et les coulis en contact direct avec les aciers précontraints. *** N'est exigé qu'en cas de risque de réaction des granulats avec les alcalins (granulats potentiellement réactifs).			

c) Critères mécaniques (Tableau 3) : L'aptitude d'une eau considérée comme douteuse se vérifie sur deux types d'essai :

- Un essai de prise sur mortier,
- Un essai de résistance mécanique à 7 jours sur mortier ou béton.

Une eau douteuse peut être utilisée comme eau de gâchage si elle n'altère pas la prise et la résistance au-delà de certaines valeurs limites précisées dans la norme (Tableau 4)

Tableau 3: Conditions pour qu'une eau soit utilisable (critères mécaniques)

Type d'essai		Sur le résultat	Par rapport au témoin*
Temps de prise	Début	$\geq 1 \text{ h}^{**}$	$\pm 25 \%^{**}$
	Fin	$\leq 12 \text{ h}$	$\pm 25 \%$
Résistance à la compression à 7 jours			$\geq 90 \%$
* Le mortier témoin est gâché avec de l'eau potable. ** Supposons que le mortier témoin ait un temps de début de prise de 100 min. L'eau pourra être utilisée si le temps de début de prise reste compris entre 75 et 125 min (condition par rapport au témoin). En aucun cas il ne peut être inférieur à une heure (condition sur le résultat).			

I.5 Les granulats : 70% du volume du béton

I.5.1 Critères de qualité pour les granulats à béton (NF EN 12620)

☐ Sensibilité au gel : Le critère de non-gélivité des granulats dépend principalement:

- du coefficient d'absorption d'eau des granulats ainsi que de leur résistance mécanique LA.
- gélivité des granulats :

-peu d'influence sur la stabilité au gel des bétons, par contre, influence importante sur la résistance à l'écaillage des bétons soumis au gel en présence des sels fondants.

☐ Éléments chimiques nocifs : limites sur la teneur de certains éléments. Les principaux : chlorures et sulfates (et sulfures).

- sulfates : risque de gonflement (ettringite secondaire),
- chlorures : corrosion du béton armé,
- silice réactive : risque de gonflement (alcali-réaction).