



Département du Génie Civil

Relation entre les caractéristiques mécaniques de béton
de nouvelles générations à l'état durci avec leurs
paramètres à l'état frais

SYNTHESES BIBLIOGRAPHIQUES

Effectué par :

- **Anthelme OGBONI**
- **Siddhartha SHARMA**

Master 2 en Génie Civil et Infrastructures

Proposé par :

NGO Tien-Tung

Sommaire	3
Introduction	4
Béton définition	5
Types de Béton	5
Béton durcit et béton frais	5
Béton frais	6
Caractéristiques principales	6
Ouvrabilité du béton frais	6
Résistance du béton frais	7
La viscosité et l'ouvrabilité du béton	8
Béton durcit	8
Caractéristiques principales	9
La résistance en compression	9
La résistance en traction	9
La résistance en cisaillement	10
Béton de nouvelle génération	10
Les additions	10
Liant équivalent	11
Types d'additions	11
Addition filler calcaire	12
Additions fumée de silice et leur effets sur comportement	14
Comparaison effet des additions sur le comportement d'un béton	16
Influence des additions sur le comportement des bétons de nouvelle génération à l'état frais (étude comparative entre béton de nouvelles générations avec béton ordinaire)	16
Influence des additions sur le comportement des bétons de nouvelle génération à l'état durci (au jeune âge et à long terme) (étude comparative entre béton de nouvelles générations avec béton ordinaire)	17
Conclusion	18
Bibliographie	19

Sommaire :

Avec la découverte de ciment la construction augmente rapidement. Maintenant partout on peut trouver infrastructure (barrage, pont, tunnel, Autoroute) pour améliorer la vie. Comme la population mondiale augmente elle demande plus d'infrastructure mais par contraire la ressource est définitive. Utilisation de plus en plus béton demande la grande quantité de ciment et production de ciment demande beaucoup d'énergie.

Cette étude est d'un but d'étudier à minimiser la quantité de ciment afin diminuer consommation d'énergie et impact sur l'environnement éventuellement. On replace certaine quantité d'un ciment par les additions. Cendres volantes, fumées de silice, laitiers vitrifiés sont les additions de Type 1 et calcaires et additions siliceuse sont les additions de type deux.

Donc par remplaçant certaine quantité de ciment, qui dépend dans la quantité d'un ciment (en ordre de 10%) et la classe d'un ciment. En faisant ça on diminue cout de l'ouvrage car coût de ciment est élevé par rapport à cout des additions. Avec les additions améliore consommation d'un ciment et l'autre côté on peut avoir la bonne résistance. L'addition dans le ciment diminue le risque de fissuration dans le béton. La résistance d'un béton avec les additions augment parce que les fins remplissent la vide de le béton et ainsi diminue la conductivité thermique de l'ouvrage, pour ce type de béton on l'appel béton de nouvelle générations. Au jourd'hui on voit plusieurs type de béton BHP, BAP, BAC, BAN etc qui assure la bonne résistance thermique et mécanique. Les additions utilisées couramment utilisées sont les fillers calcaires et la fumée de silice.

Mais par contraire avec les additions dans le béton viscosité augmente qui demande plus de quantité de super plastifiant. L'ajoute de super plastifiant facilite la mise en place d'un béton avec aucun impact sur le comportement mécanique.

Introduction

Le temps pendant lequel le béton reste frais est insignifiant par rapport à sa durée de vie totale. Pourtant, au cours de ce temps, beaucoup d'opérations s'effectuent et qui dépendent notamment des caractéristiques mécaniques. Ainsi, apparaît de nos jours les bétons dites de nouvelles générations qui sont d'un grand intérêt à l'état frais, qu'à l'état durci

Dans ce travail, on effectuera une synthèse des connaissances actuelles du béton dans le domaine du Génie Civil ; et on s'intéressera en particulier aux bétons de nouvelles générations. Dans ce développement, on décrira une étude comparative du béton ordinaire et du béton de nouvelles générations, les différents paramètres mécaniques et rhéologiques.

Enfin, on conclura et on indiquera les perspectives de développement du béton de nouvelles générations, ses avantages du point de vue économique et impact environnemental

1. Béton définition

Il béton peut simplement être défini comme un mélange d'eau, ciment, sable et gravier dans une proportion donnée. Le sable et le gravier sont liés par une forme de pâte obtenue par le mélange de l'eau et du ciment. L'espace entre les particules est rempli par des gels suite à la réaction chimique dite hydratation. La bonne résistance d'un béton dépend du rapport E/C ainsi que de la qualité du gravier.

2. Types de Béton

On distingue plusieurs types de béton selon la structure à réaliser. Le béton utilisé dans les bâtiments, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories

- Les Bétons Prêts à l'Emploi
- Le béton armé
- Le béton fibré
- Le béton précontraint
- Les Bétons Hautes Performances (BHP)
- Le béton projeté
- Les bétons auto compactant (BAC), auto plaçant (BAP) et auto nivelant (BAN)
- Les bétons cavernaux, drainant et poreux
- Le béton de ciment alumineux (ou béton fondu)
- Le béton décoratif

3. Béton durcit et béton frais :

- **Béton frais**

Le béton frais est le résultat d'un mélange homogène sans prise de plusieurs composantes à savoir : gravier, sable, air (vide), eau, ciment, adjuvant suivant une proportion donnée.

Ordre de grandeur des proportions				
	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume	14% - 22%	1% - 6%	7% - 14%	60% - 78%
Poids	5% - 9%	...	9% - 18%	63% - 85%

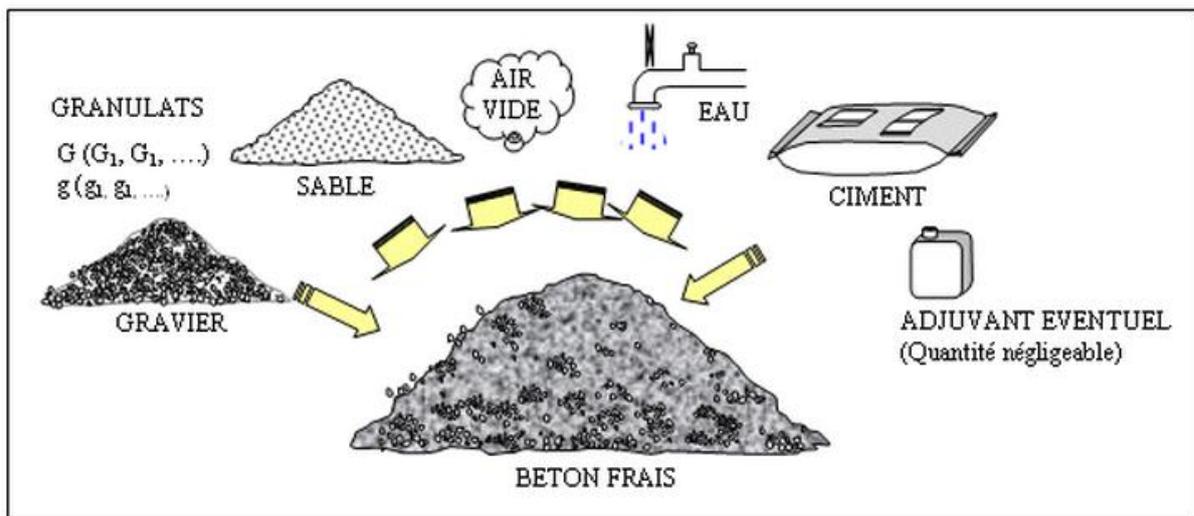


Fig.1 : les constituants du béton frais

a- Caractéristiques principales

Les caractéristiques principales du béton frais sont reconnues par son ouvrabilité et sa résistance.

b- Ouvrabilité du béton frais

Plusieurs essais permettent de connaître certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité à savoir le cône d'Abrams, l'Étalement à la table à secousses, la maniabilité L.C.P.C, Test C.E.S.L'essai le plus courant est l'affaissement au cône d'Abrams. Cet essai, fait sur place consiste à déterminer classe de consistance du béton. Ils se composent de 4 éléments :

- Un moule tronconique sans fond de 30cm de haut, 20 cm de diamètre en partie inférieure et 10cm en partie supérieure
- Une plaque d'appui
- Une tige de piquage
- Un portique de mesure

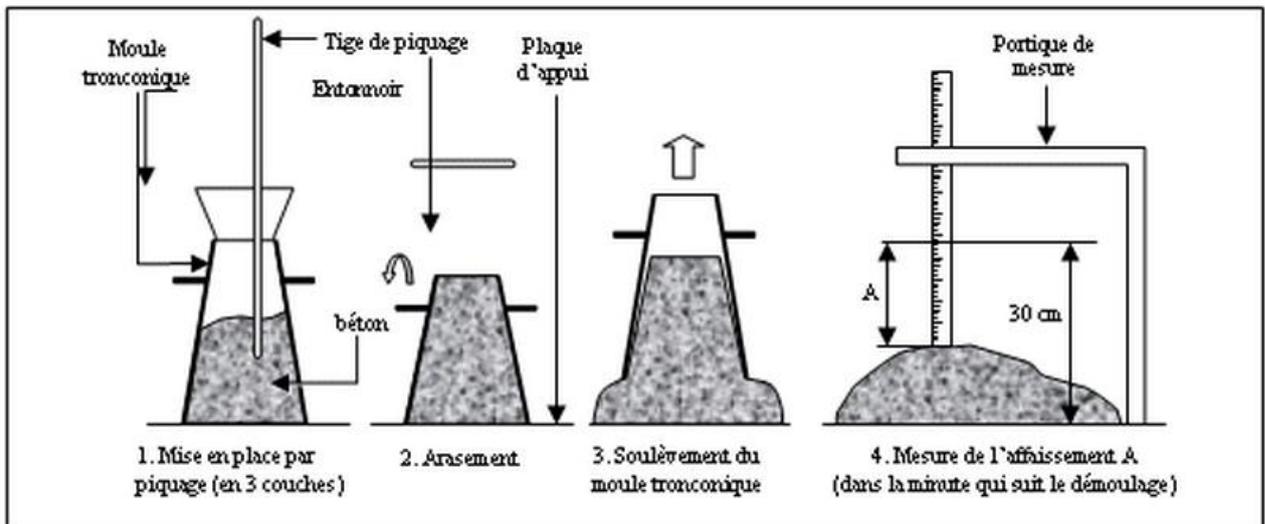


Fig.2: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

Les résultats obtenus permettent d'identifier la classe de consistance du béton présenté dans le tableau ci-dessous :

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	± 1 cm
Plastique P	5 à 9	± 2 cm
Très plastique TP	10 à 15	± 3 cm
Fluide F1	≥ 16	

Tableau : Appréciation de la *consistance* en fonction de l'affaissement au cône

c- Résistance du béton frais

Le béton frais a une faible résistance en compression pouvant atteindre 0.3 - 0.4 MPa et en traction 0.004 MPa. On peut dire que :

- Le rapport optimal E/C est proche de 0.40
- Le pourcentage sable/gravier est d'environ 0.38
- Les granulats concassés donnent une bonne résistance

d- Viscosité dans le Béton

La viscosité d'un béton c'est la caractéristique d'un matériau fluide tendant à s'opposer à son écoulement par gravité. Plus la viscosité d'un béton est faible, plus son ouvrabilité est bonne. La viscosité dans le béton est définie par « **model de Bingham** », ce modèle de Bingham est écrit comme :

$$\tau = \tau_y + \mu \dot{\gamma} \quad \text{pour } |\tau| > \tau_y$$

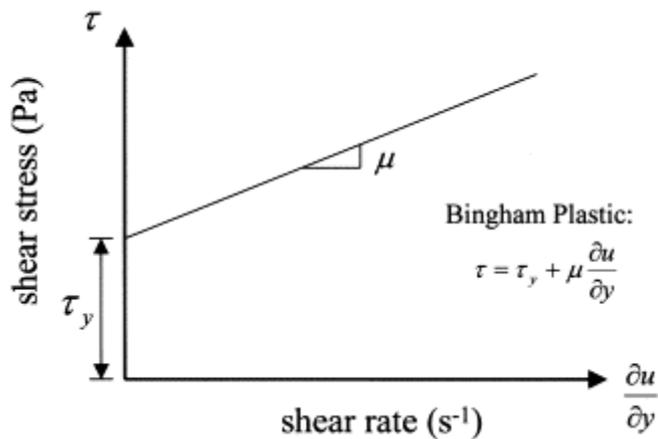
où τ = cisaillement

τ_y = Limite d'élasticité

$\dot{\gamma}$ = taux de cisaillement et

μ = plastique viscosité.

La relation de contrainte et de la vitesse de déformation de cisaillement est représentée par la courbe ci après :



- **Béton Durci :**

Le béton durci est le résultat d'un mélange homogène avec prise de plusieurs composantes à savoir : gravier, sable, air (vide), eau, ciment, adjuvant suivant une proportion donnée.

Les qualités du béton durci dépendent de plusieurs facteurs :

- le rapport eau-ciment;
- les procédés de mise en place;
- la cure du béton.
- La qualité de granulat.

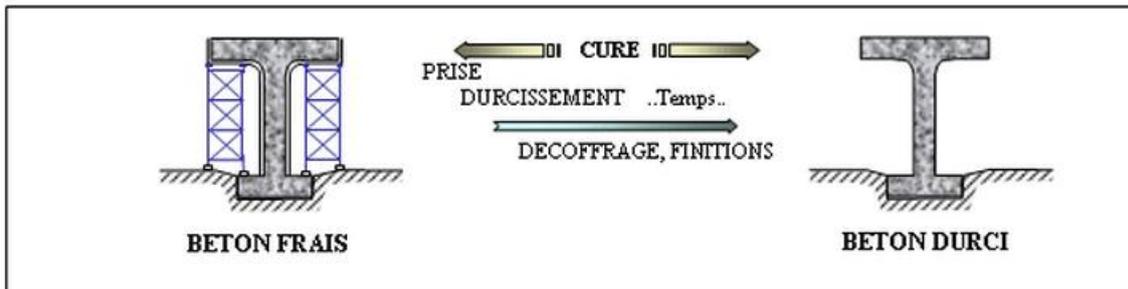


Fig. 3 : durcissement finition

a- Caractéristiques principales

La principale caractéristique du béton durci est la résistance mécanique en compression à un âge donné et la résistance en traction.

b- La résistance en compression

La résistance d'un béton à 28 jours est désignée $f_c 28$. Cela s'obtient par sollicitation d'une charge verticale appliqué sur une éprouvette cylindrique de béton de dimension 16 cm de diamètre et 32cm la hauteur par un appareil de compression. En générale la résistance du béton se trouve entre 20 MPa et 40 MPa.

c- La résistance en traction

La résistance d'un béton à 28 jours est désignée $f_t 28$. Les essais le plus couramment utilisés sont les essais de traction, par flexion, par fendage, de traction directe.

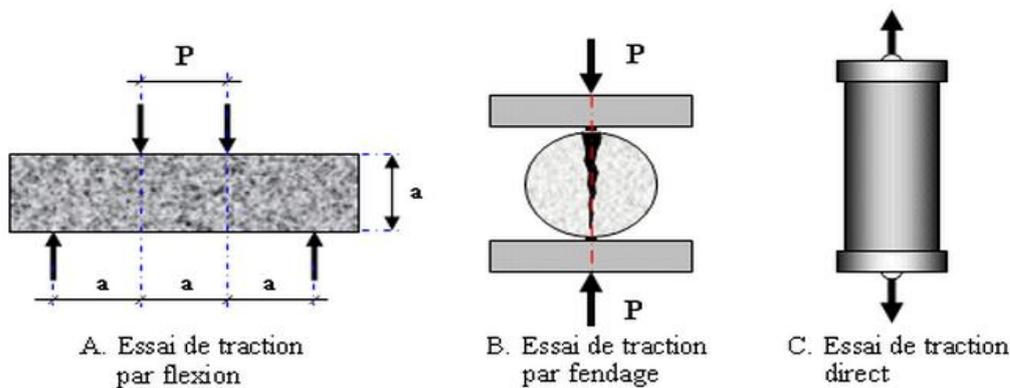


Fig. 4 : différents essais sur les résistances d'un béton en traction.

d- La résistance en cisaillement

Cisaillement est une contrainte appliquée en deux points très proche mais dans le sens opposés. Béton seul a une faible résistance à cisaillement.

4- Béton de nouvelle génération

Aujourd'hui un nouveau type de béton apparaît améliorant l'impact environnemental tout en gardant une bonne résistance par la diminution du dosage en ciment en y ajoutant des additions au béton (ces additions coûtent moins que le ciment) appelé **béton de nouvelle génération**. On peut citer les bétons de nouvelle génération comme ci- dessous :

- Les Bétons Hautes Performances (BHP)
- Les bétons auto compactant (BAC)
- Béton auto plaçant (BAP)
- Béton auto nivelant (BAN)
- Thermédia 0.6B

5- Les additions

Les additions sont des matériaux minéraux finement divisés et pouvant être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés, ou pour lui conférer des propriétés particulières. En somme des additions permettent de :

- améliorer l'ouvrabilité et l'homogénéité du béton frais ;
- augmenter l'efficacité du liant, éventuellement diminuer son dosage ;
- diminuer le retrait et les risques de fissuration ;
- améliorer la résistance du béton aux agressions extérieures (durabilité)

a- Liant équivalent

En introduisant les additions dans le béton, le rapport de E/C devient équivalent à $E/(C+kA)$. On appelle $(C+kA)$ le liant équivalent d'où :

- ✓ C est la quantité de ciment de type CEMI,
- ✓ A est la quantité d'additions prise en compte, additions de type II et certains additions de type I, dont la valeur maximale définie par eurocode $A/(A+C) = 0.10$ et
- ✓ K est le coefficient de prise en compte de l'addition.

b- les types d'additions

Selon Eurocode, il existe deux types d'additions :

1. Les additions quasiment inertes (type I),
2. Les pouzzolanes ou les additions à caractère hydraulique latent (type II).

Dénomination de l'addition	Valeur du coefficient k	Conditions supplémentaires à remplir
Additions de type II		
Cendres volantes (NF EN 450)	0,60	Si $i_{28} > 0,83$ et $i_{90} > 0,95$
	0,50	Si $i_{28} > 0,80$ et $i_{90} > 0,90$
	0,40	Si $i_{28} > 0,75$ et $i_{90} > 0,85$
Fumées de silice (NF EN 13263-1)	2,00	Si dans les expositions XA, E/C < 0,45 et C > 295 Si dans les expositions différentes de XA, E/C < 0,45 et C > 280 kg/m ³ Dans les autres cas
	1,00	
Laitiers vitrifiés moulus de classe B (NF P 18-506)	0,90	$H_{3/7} > 0,70$ et $H_{3/28} > 0,85$
Additions de type I		
Aditions calcaires (NF P 18-508)	0,25	$i_{28} > 0,71$
Addition siliceuses (NF P 18-509)	0,25	$i_{28} > 0,71$

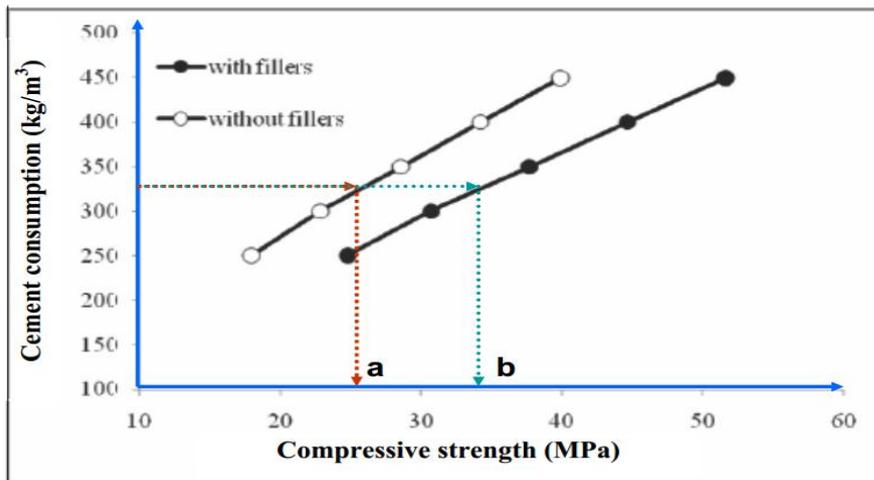
Fig 5: La norme Béton NF EN 206-1

c- Comparaison des effets des additions sur le comportement d'un béton

Notre recherche s'est porté sur deux types d'additions utilisées couramment que sont les fillers calcaires et la fumée de silice

- **Additions fillers calcaires et impact sur résistance.**

Il s'agit d'un matériau sec et fin obtenu par broyage et/ou sélection des gisements de roches calcaires ; parfois dolomitiques, massives ou meubles. Les fillers doivent être préparés correctement et ce, en tenant compte de leurs conditions de production ou de livraison.



On a pu observer que, pour une teneur en ciment donnée ($\approx 325 \text{ kg/m}^3$), dans lequel aucun agent de remplissage est ajouté, la résistance du béton est d'environ 26 MPa; (point "a"). Pour le même contenu, la résistance est d'environ 33 MPa dans le cas de l'ajout des additions; (point "b").

Comme on peut montrer, en ajoutant 18% de remplissage F5 (poids spécifique 2,7), Blaine spécifique Surface $5400 \text{ cm}^2/\text{g}$) la consommation de ciment réduit d'environ 23%. Le coût de ciment est très élevé par rapport à coût de calcaire et donc on peut minimiser le coût de ciment en ajoutant filler de calcaire.

L'amélioration de la résistance est essentielle en raison de l'effet de l'accélération de la charge du calcaire liée à la formation d'hydrates de calcium carboaluminate, qui peut être contribué à l'augmentation globale du taux d'hydratation. En outre, l'augmentation de la capacité de liaison de carboaluminate est probablement due à sa structure compacte décrite par Bonavetti et al. (2001). En outre, la consommation de la calcite dans la formation d'hydrates carboaluminate, l'influence sur l'accélération de l'hydratation de CA, les changements dans le calcium aluminates hydrates entre filler calcaire et le constituants du ciment, en plus de la finesse de calcaire sont les facteurs spécifiques à la réactivité de filler calcaire.

- **Additions de fumée de silice et impact sur la résistance**

La fumée de silice ou microsiline est une pouzzolane artificielle d'une grande finesse, environ 100 fois plus fin que le ciment (grain moyen inférieur à 1 micron). De couleur soit premium blanc ou gris, elle est obtenue lors de la fabrication de certains produits siliceux. La fumée de silice n'est cependant pas qu'une pouzzolane très réactive, elle a d'autres propriétés intéressantes. En effet, la petite taille des particules de fumée de silice permet de combler l'espace entre les grains de ciment, ce qui améliore donc le remplissage des vides et de ce fait possède des propriétés qui sont bénéfiques au béton.

Elle contient généralement plus de 90% de SiO₂. De petites quantités de fer, de magnésium, et les oxydes alcalins sont également présents. La fumée de silice amorphe est dans la nature et peut contenir un peu de la silice cristalline sous forme de quartz ou de cristobalite. La nature supérieure et la surface amorphe de fumée de silice la rend très réactif. L'hydratation du C₃S, C₂S, et C₄AF sont accéléré en présence de fumée de silice. Grutzeck et al. ont conclu que la silice de fumée a une expérience de dissolution rapide en présence de Ca (OH)₂ et une sursaturation de la silice par rapport à une phase riche en silice. Cette phase instable riche en silice forme une couche sur la surface des particules de fumée de silice. La couche est ensuite partiellement dissoute et le reste se substitue à laquelle C-S-H est formée.

Uchikawa et Uchida ont rapporté que l'ajout de fumée de silice accélère l'hydratation du ciment Portland ordinaire. Immédiatement après le mélange, le facteur de saturation de Ca (OH)₂ indicative des concentrations de Ca²⁺ et des ions OH⁻, à la silice fumée de pâte contenant a été réduite par rapport à celle faite de ciment Portland ordinaire. Cependant, le facteur de saturation fortement porté à son maximum plus tôt que pour la pâte de ciment Portland ordinaire. Au cours de l'hydratation, la chaleur cumulative évolue en raison de l'hydratation de l'ordinaire Ciment Portland contenant de la silice fumée a toujours été plus élevé que d'ordinaire Portland pâte de ciment. Toutefois, cette tendance pourrait être inversée si un réducteur est ajouté à l'eau de gâchage. En présence de **mélamine** (réducteur d'eau de base), le pic d'hydratation importante a été accéléré dans une pâte de ciment avec fumé de silice. La chaleur cumulée évolue également et augmente en présence de fumée de silice dans le coller, et plus la quantité de fumée de silice dans la pâte, plus la chaleur évolue et le plus court est le temps d'hydratation.

Pour un béton à haute résistance ayant 540 kg/m³ de ciment et 10% de ciment remplacé par la fumée de silice, la chaleur est de 9% en moins par rapport à la composition sans silice fumées. L'Addition de fumée de silice peut accélérer la montée en température au cours du premier, deuxième et troisième jour, mais une diminution nette de la température du béton fumée de silice est observée à des stades ultérieurs (7-28 jours) par rapport au béton ordinaire correspondant.

Au jeune âge, grâce à une réaction pouzzolanique rapide de la fumée de silice, une plus grande quantité de la chaleur est libérée par rapport au ciment Portland. Ratio de la chaleur dégagée par activités pouzzolanique de la fumée de silice pendant les 2-3 premiers jours par gramme de silice fumées à celle du ciment Portland et est signalé à être de l'ordre de 1-2.

Néanmoins, il a été observé que les mélanges incorporant plus de fumée de silice ont tendance à exiger des doses plus élevées de superplastifiant.

Concrete mixes	Silica fume (%)	Compressive strengths (MPa)						
		7 days	14 days	28 days	42 days	90 days	365 days	400 days
OPC	0	46	52	58	62	64	73	74
SF 6	6	50.5	58	65	69	71	73	73
SF 10	10	52	61	67.5	71	74	73	73
SF 15	15	53	63	70	73	76	75	76

Mazloom et al. ont étudié la résistance à la compression de haute performance béton contenant de la silice fumée. La teneur en fumée de silice est 0, 6, 10, et 15%, et le rapport de l'eau /ciment étant 0,35. Les résultats sont donnés dans le tableau ci dessus. A partir de les résultats, on peut voir que:

- (i) à l'âge de 28 jours, le béton avec la fumée de silice est 21% plus fort que le béton ordinaire,
- (ii) le développement de la résistance à la compression de béton contenant des fumées de silice est négligeable après l'âge de 90 jours; Cependant, il était de 26% et l'augmentation de la résistance de 14% dans le béton témoin après la première année par rapport à 28 et 90 jours respectivement.

6- Influence des additions sur le comportement des bétons de nouvelle génération à l'état frais (étude comparative entre béton de nouvelles générations avec béton ordinaire)

A l'état frais l'influence sur le comportement du béton de nouvelle génération porte sur l'ouvrabilité, la rhéologie du béton et l'influence des additions sur la rhéologie

- L'ouvrabilité

L'ouvrabilité d'un béton ordinaire, définit comme l'aptitude d'un béton à être mis en œuvre, (l'effort demandé pour manipuler une certaine quantité de béton frais avec un minimum de perte d'homogénéité). En matière du béton de nouvelle génération, une forte viscosité est remarquée donc mauvaise ouvrabilité (mauvais écoulement à travers le ferrailage) avec une ségrégation statique mais qui peut être corrigé par l'application de superplastifiant afin de réduire la viscosité (améliorer la fluidité), empêcher le ressuage, limiter les risques de ségrégations.

- La rhéologie

Définit comme la science qui étudie la déformation et l'écoulement des matériaux sous l'influence des forces qui leur sont appliquées. Généralement, en termes mécanique, la grandeur cinématique correspond à l'écoulement est tenseur de gradient de vitesse et la grandeur correspondant à la force appliquée à l'élément est le tenseur de contrainte.

Comparé au béton ordinaire, le béton de nouvelle génération présente une rhéologie améliorée avec les additions.

- L'influence des additions sur la rhéologie

Les additions influencent sur la rhéologie, on peut citer entre autre :

- ✓ Le temps de prise : (la pate fabriquée avec le fillers de calcaire par exemple), son temps de prise est caractérisé par une surface de Blaine plus élevée et présente des prises de temps plus longs
- ✓ L'introduction du superplastifiant joue le rôle de retardateur de prise, très important pour la résistance mécanique au jeune âge

- ✓ La finesse de l'addition influe de manière significative sur la quantité d'eau nécessaire pour remplir les vides dans la pâte

7- Influence des additions sur le comportement des bétons de nouvelle génération à l'état durci (au jeune âge et à long terme) (étude comparative entre béton de nouvelles générations avec béton ordinaire)

A l'état durci l'influence sur le comportement du béton de nouvelle génération porte sur la résistance au jeune âge et à long terme

- Au jeune âge et à long terme

Au jeune âge, la résistance à la compression est d'autant plus importante que la surface de Blaine des additions calcaires est élevée. La résistance à la compression se stabilise entre 21 et 28 jours puis atteint un maximum à 365 jours en se référant au tableau ci-dessus en indiquant que les réactions qui accompagnent le durcissement ne sont pas achevées car il augmente à 400 jours. En conclusion nous remarquons une meilleure performance du béton de nouvelle génération comparée au béton ordinaire.

8- Conclusion

Le béton de nouvelle génération constitue une avancée pour la construction en béton. L'utilisation des additions réduit le coût du ciment (béton) et également constitue une véritable alternative au béton ordinaire. Cependant leur formulation et le contrôle de leur propriété lors de la mise en œuvre nécessite une attention particulière.

Outre les avantages d'un béton ordinaire, le béton de nouvelle génération présente beaucoup plus d'avantage sur le plan économique, impact environnemental et technique.

Avantages :

1. Facile à fabriquer, moins coûteux que le béton ordinaire du point de vue de la diminution du ciment remplacé par les additions et peu d'entretien.
2. Il devient solide déjà au jeune âge d'où un gain en temps pour la continuité des travaux et il résiste au feu et aux actions mécaniques.
3. Meilleure résistance à la compression due aux additions.
4. Peut-être associée aux armatures et à la précontrainte pour avoir bonne résistance mécanique.
5. Matériaux de fabrication, et additions existant dans nombreux pays.
6. Il nécessite moins d'énergie pour sa fabrication comme tout béton mais encore plus dans sa facilité à mettre en place avec les super plastifiants.
7. Il assure une meilleure isolation thermique à cause de sa faible conductivité thermique due aux additions (fumée silice)
8. Réduire le coût de l'ouvrage (ciment), de l'énergie consommée et dégagement du CO₂ dans la fabrication du ciment

Inconvénients :

1. Faible résistance à la traction.
2. Forte densité (2.4kN/m³).
3. Coût élevé en cas de modification comme tout béton.
4. Demande de super plastifiant avec les additions

9- Bibliographies

- www.la.refer.org
- www.portail-beton.fr
- www.cotita.fr
- www.memoireonline.com
- www.builtsearch.ch/fr
- www.portail-beton.fr/additions/
- www.la.refer.org/materiaux/chapitre_six_cinq.html
- www.portail-beton.fr/additions/
- www.cotita.fr/IMG/pdf_13_developpement_durable_et_innovation.pdf
- www.memoireonline.com
- Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 3, No. 2, 2009)
- www.builtsearch.ch/fr/complete-19.html?definition=464

Mazloom, M., Ramezani pour, A.A., Brooks, J.J.: Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cem. Concr. Compos.* 26(4), 347–357 (2004)

Grutzeck, M., Atkinson, S., Roy, D.M.: Mechanism of hydration of condensed silica fume in calcium hydroxide solutions. *ACI Special Publications SP-79 (2)*, pp. 643–664 (1983)

Uchikawa, H., Uchida, S.: Influence of pozzolans on the hydration of C3A. In: *Seventh International Congress on the Chemistry of Cement, Paris*, pp. IV-23–IV-29 (1980)

Khatri, R.P., Sirivivatnanon, V., Gross, W.: Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete. *Cem. Concr. Res.* 25(1), 209–220 (1995)