

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Mémoire de Master

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

BENSAID Sofiane

Sujet :

***L'utilisation de la poudre de verre dans
la composition du béton***

Présenté par :

Monsieur BENS AID Sofiane

Encadré par :

Monsieur Mehaddane

Session 2015

A la mémoire de mon grand père

A ma sœur

A mes parents

Remerciement

Je tiens à remercier d'abord mon promoteur M.MEHADDANE, qui m'a proposé ce sujet et qui m'a encadré et dirigé avec beaucoup d'attention et de disponibilité tout au long de ce travail.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir avec leurs propositions et leurs remarques.

Je souhaiterais remercier tous mes collègues et à tous mes amis en particulier M.AIT RAMDANE Idir et M.AIT MAMMAR Sofiane pour leur encouragement et leur soutien.

Qu'il me soit enfin permis de remercier toute ma famille spécialement ma sœur Cylia et mes parents pour leur appui et attention sans faille et leur amour inconditionnel qui m'accompagnent depuis toujours ; qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Liste des figures

I.1	Intégration de la poudre et des agrégats de verre recyclé dans les dalles de béton non structurales.....	4
I.2	Trottoir contenant de la poudre de verre.....	4
II.1	«Fer de lance» tsimshian en obsidienne,du Yukon et de l'Alaska le long de la Côte du Pacifique (1937).....	5
II.2	Amphore opaque bleue. Egypte, 1400-1300 av.J,-C.....	6
II.3	a) Structure en anneau de la Cristobalite ; b) Modèle proposé par Zachariasen.....	7
II.4	(a) l'empilement des atomes de la silice amorphe. (b) l'adjonction de Na ₂ O et CaO brise des liaisons dans la silice amorphe et donne naissance au verre sodo-calcique.....	8
II.5	Rupture d'un pont Si-O-Si par adjonction d'une molécule de modificateur Na ₂ O.....	9
II.6	variation spécifique du verre avec la température, relation entre les états solide, liquide et vitreux.....	11
II.7	a) verre débarrassé des ses impuretés,b) impuretés du verre (papiers, plastiques, métaux).....	12
II.8	Composition chimique du ciment.....	13
II.9	Composition chimique de la poudre du verre.....	13
II.10	La distribution de taille de particule de la poudre de verre et du ciment.....	13
II.11	L'obsidienne, exemple de verre volcanique.....	16
II.12	Échantillon de pierre ponce hautement poreuse du volcan de Teide à Tenerife, Îles Canaries.....	16
II.13	Feldspath plagioclase.....	16
II.14	Kaolin.....	16
II.15	Ensemble de fibres de verre.....	17
II.16	Laine de verre utilisée comme isolant.....	17
II.17	Des fulgurites.....	18
II.18	Un bécher en pyrex.....	19
II.19	Vase en verre craquelé.....	19
II.20	Détail.....	19
II.21	Mécanisme de dégradation du verre en milieu acide : désalcalinisation du verre (<i>leaching</i>).....	21
II.22	Schéma du mécanisme d'attaque du verre par une solution de soude (<i>etching</i>).....	22
III.1	Le diagramme σ - ϵ d'un béton en compression.....	36

III.2	Différents essais sur les résistances d'un béton en traction.....	38
IV.1	Calcin brut avant traitement.....	44
IV.2	Indices d'activité pouzzolanique du verre utilise dans des conditions différentes.....	46
IV.3	Affaissement du béton avec remplacement du ciment par de la poudre de verre.....	50
IV.4	Variation de la masse volumique du béton de ciment avec remplacement par de la poudre de verre.....	51
IV.5	Variation du développement de la résistance à la compression dans le béton sans soumettre à l'attaque du chlorure avec l'âge.....	52
IV.6	Variation du développement de la résistance à la compression du béton soumis aux attaques des sulfates avec l'âge.....	53
IV.7	variation de résistance à la flexion du béton avec remplacement du ciment par de la poudre de verre pour 7, 28 et 90 jours.....	54
IV.8	Variation du développement de la résistance à la flexion dans le béton avec l'âge.....	54
IV.9	Dispositif expérimental des essais sur poteaux.....	57
IV.10	La résistance en compression des différents bétons utilisés (Cure en chambre humide)...	58
IV.11	Perméabilité aux ions chlore des différents bétons.....	59
IV.12	Courbe charge axiale sur poteau en fonction de la déformation axiale : (a) (E/L= 0,40, testés à 28 j), (b) (E/L= 0,55, testés à 28 j).....	61
IV.13	Courbe charge axiale sur poteau en fonction de la déformation axiale : (E/L= 0,55, testés à 91 j).....	62

Liste des tableaux

II.1	Composition chimique des matériaux de cimentation.....	12
III.1	Ordre de grandeur en proportions.....	24
III.2	Classification des ciments selon leurs résistances.....	28
III.3	Dimension admissible D pour les plus gros granulats.....	31
III.4	Enrobage minimal «C» des armatures.....	32
III.5	Consistance du béton.....	33
IV.1	Affaissement du béton avec remplacement du ciment par de la poudre de verre..	50
IV.2	Variation de la masse volumique du béton de ciment avec remplacement par de la poudre de verre.....	51
IV.3	Résultats globaux de développement de résistance à la compression dans le béton sans soumettre à l'attaque avec l'âge.....	52
IV.4	Résultats globaux de développement de résistance à la compression du béton soumis aux attaques des sulfates avec l'âge.....	52
IV.5	Les résultats globaux de développement de résistance à la flexion dans le béton avec l'âge.....	54

Table des matières

I.	Introduction générale.....	1
I.1	Avantage.....	2
I.2	Actualité.....	3
I.2.1	Applications de la poudre dans le béton.....	3
II.	Le verre	
II.1	Historique.....	5
II.2	Définition de verre.....	6
II.3	Formation de verre.....	9
II.4	Composition de verre.....	11
II.5	Les différents types de verre.....	14
II.5.1	La forme ou lieu de fabrication.....	14
II.5.2	La composition chimique.....	15
II.5.3	L'utilisation.....	16
II.5.4	La technique de fabrication.....	19
II.6	Comportement de verre.....	20
II.6.1	Corrosion du verre en milieu acide.....	20
II.6.2	Corrosion du verre en milieu neutre.....	21
II.6.3	Corrosion du verre en milieu basique.....	22
III.	Le béton	
III.1	Historique.....	23
III.2	Définition.....	24
III.3	Composants.....	25
III.3.1	Le ciment.....	25
III.3.1.1	Constituants principaux.....	25
III.3.1.2	Constituants secondaires.....	27
III.3.1.3	Additifs.....	27
III.3.1.4	Classification des ciments.....	27
III.3.1.5	Principales catégories des ciments.....	28
III.3.2	Les granulats.....	28

III.3.3	L'Eau.....	29
III.3.4	Les Adjuvants.....	29
III.4	Composition des bétons.....	30
III.4.1	Critères en fonction de la destination des bétons.....	31
III.4.1	Formulation du béton.....	33
III.5	Comportement instantané du béton.....	36
III.5.1	Compression.....	36
III.5.2	Traction.....	37
III.6	Comportement différé du béton.....	39
III.6.1	Retrait.....	39
III.6.2	Fluage.....	39
III.6.3	Corrosion des bétons.....	40
III.7	Les différents types de béton.....	41
III.7.1	Bétons à haute performance.....	41
III.7.2	Béton future.....	41
III.7.3	Béton de granulats légers.....	41
III.7.4	Béton cellulaire.....	42
III.7.5	Béton lourds.....	42
III.7.6	Béton à base de résines.....	42
III.7.7	Béton de fibres.....	43

IV. Comportement du béton à base de la poudre de verre

IV.1	Première partie : la poudre du verre dans le béton.....	44
IV.1.1	Origine de verre recyclé.....	44
IV.1.2	Le verre dans le béton.....	45
IV.1.2.1	Réaction pozzolanique du verre.....	45
IV.1.2.2	La taille des grains de verre.....	46
IV.1.2.3	La teneur en verre des mélanges.....	47
IV.1.2.4	La couleur du verre utilisé.....	47
IV.1.2.5	Utilisation de verre en tant que sable.....	48
IV.1.2.6	La température de cure et l'activation de verre.....	48
IV.1.2.7	Comparaison de verre à d'autres pouzzolanes.....	48
IV.1.2.8	L'utilisation simultanée de verre et de pouzzolanes.....	49
IV.1.3	Propriété physico- mécanique.....	49
IV.1.3.1	Maniabilité.....	49

IV.1.3.2	Densité.....	50
IV.1.3.3	Résistance à la compression.....	51
IV.1.3.4	Résistance à la flexion.....	53
IV.2	Deuxième partie : La poudre de verre dans le béton armé.....	56
IV.2.1	Résumé de l'expérience.....	56
IV.2.2	Les résultats.....	57
IV.2.2.1	Résistance en compression.....	57
IV.2.2.2	Perméabilité aux ions chlore.....	58
IV.2.3	Comportement des poteaux et analyse des résultats.....	59
	Conclusion.....	63

Chapitre I

Introduction générale

Introduction générale

Devant les besoins croissant sans cesse des ressources en matériaux et face aux exigences et conditions de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et étudier toutes les possibilités et opportunités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous produits industriels notamment dans le domaine des travaux publics.

Notre étude consiste en l'utilisation de la poudre de verre dans la composition du béton, son objet principal est de rechercher et de contribuer à la réutilisation des déchets de verre entreposés, dans la fabrication du béton hydraulique et cela permet donc :

- D'éliminer les déchets précités par recyclage d'où protection de l'environnement.
- Réduire la production du ciment et de diminuer ou d'éliminer l'émission de dioxyde (CO₂) dans l'atmosphère.
- Remplacer une certaine quantité du ciment dans le béton par la poudre verre et examiner le comportement de ce dernier vis-à-vis des sollicitations et de déterminer ses propriétés physico-mécaniques dus à cette substitution.

Le présent mémoire est organisé sous la forme suivante :

Le **chapitre I** est consacré à la contribution de la production du ciment à la pollution, et le progrès qu'apporte la substitution de ciment par la poudre du verre dans le béton.

Quant au **chapitre II** est réservé à la définition du verre (langage courant et général) et à la détermination de la composition chimique de la poudre de verre comparativement à celle du ciment. Les différentes réactions des produits vitreux dans les milieux d'attaque (acide, neutre, basique) sont présentées brièvement.

Au cours du **chapitre III**, on procède à la présentation des constituants du béton hydraulique ainsi que quelques méthodes de sa formulation puis nous allons voir le comportement instantané et différé du béton. On termine le chapitre par la présentation des différents types de ce dernier.

Au final, le **chapitre IV** est divisé en deux parties, dont l'une on montre quels sont les changements des propriétés physico-mécanique du béton avec une substitution croissante du ciment par la poudre du verre avec un crément de 5 %. On ce qui concerne la deuxième partie, on montre que l'incorporation de la poudre du verre dans la fabrication du béton rencontre les critères de performance requis pour les applications structurales.

I.1 Avantage

Les sous-produits de l'industrie tel que la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes trouvent une large utilisation comme ajouts cimentaires dans les bétons. Leur utilisation permet d'améliorer pour le mieux les caractéristiques des bétons jusqu'à leur fournir les qualités d'un béton de hautes performances. A cet effet, en utilisant ces ultrafines comme ajouts cimentaires, le béton à hautes performances ouvre le champ à une nouvelle vision de voir le recyclage des déchets industriels.

Retenus essentiellement pour leur pouvoir pouzzolanique dus à leur teneur en agents réactifs tel que la silice ou l'alumine, les ajouts cimentaires ont la faculté de donner un plus pour la résistance du béton via la consommation de la portlandite (Ca(OH)_2) créant ainsi de nouveaux C-S-H, produits essentiels de l'hydratation du ciment et éléments responsables de la résistance du béton à jeune et à long terme[1].

Comme il est obtenu essentiellement de la fusion du sable à 99,99% de silice, le verre se place comme un matériau digne de terme « pouzzolanique ».

Le verre a été un matériau indispensable à l'homme pour plusieurs propriétés comme la possibilité à prendre des différentes formes facilement, la clarté de la surface, la résistance à l'abrasion, sécurité et durabilité .

Plusieurs alternatives de réutilisation de verre existent. D'après certaines études existantes, toutes ces débouchés, qui nécessitent un pré-conditionnement (y compris un broyage), ont un développement limité et ne parviennent pas à absorber les quantités de verre récupérées. Afin d'apporter une solution durable à la problématique de verre entreposé, une autre piste potentielle et encourageante consiste à le valoriser dans les bétons [2].

But du travail

Dans notre travail on essaie de comprendre le but d'utilisation de la poudre du verre dans le béton et à quelle proportion peut-on remplacer le ciment par cette poudre du verre, et quel sera son impact sur le comportement du béton, et quelles seront ces répercussions économiques et environnementales ?

I.2 Actualité

Longtemps considéré comme un matériau incapable d'évoluer, le béton est amélioré de manière spectaculaire ces dernières années comme le prouve l'arrivée des bétons à hautes performances, ce matériau est connu surtout pour sa durabilité, le peu d'entretien nécessaire, ainsi que la disponibilité et la proximité de la ressource et de la main d'œuvre, sont autant d'avantages intéressants du béton, mais son principal bémol est sur le plan environnemental, est que la fabrication du ciment portland qu'il contient est si énergivore qu'elle est responsable d'environ 5 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO₂) c'est autant qu'en émet l'industrie aéronautique; donc améliorer la performance du béton tout en réduisant l'empreinte écologique liée à sa production devient alors un enjeu important.[3]

Cet impact environnemental encourage la recherche de nouveaux liants minéraux à faible coût de production qui devrait minimiser au maximum la consommation de l'énergie. Parmi ces alternatives nous pouvons citer la poudre du verre, obtenue en broyant à une certaine finesse le verre récupéré, qu'on utilisera dans la composition du béton.

Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation de verre comme granulats dans les bétons. Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons se gonflent et se fissurent. [4]

Depuis, l'idée a été en partie abandonnée. Ce n'est que depuis une vingtaine d'année que le sujet est redevenu d'actualité. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé (mixte et coloré) dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables municipalités et celles-ci ont encouragé de nouvelles études. [3][4]

I.2.1 Applications de la poudre du verre dans le béton

- Son incorporation dans les bétons auto-plaçant (BAP) offre une fluidité considérable [5].
- Utilisée dans le béton pour couler des murs porteurs du bâtiment ainsi que les dalles de plancher des bureaux.



Figure I.1: Intégration de la poudre et des agrégats de verre recyclé dans les dalles de béton non structurales.

- L'utilisation de la poudre de verre dans les projets de construction des maisons, trottoirs et dans le pavé uni.



Figure I.2 : Trottoir contenant de la poudre de verre.

- Remplacer une partie du ciment dans les bétons binaires et ternaires qui sont recommandés pour les ouvrages d'art [6].

Le recyclage du verre dans le béton permet de plus de contribuer au développement durable de ce matériau de construction indispensable, et d'atteindre un équilibre entre les contraintes de protection de l'environnement et les considérations économiques et sociales.

Chapitre II

Le verre

II.1 Historique

Le verre existe déjà naturellement depuis plusieurs centaines de milliers d'années. L'homme l'utilisa pour la première fois il y a 100 000 ans sous forme d'obsidienne, (verre naturel d'origine éruptive) pour fabriquer des outils, des armes coupantes et des bijoux.

L'origine des verres remonte à la plus haute Antiquité. Il y a six milles ans, des potiers Egyptiens ont fabriqué le premier verre tout à fait par accident en cuisant leurs poteries. Le premier verre était un émail, mélange de sable et d'autres minéraux fondus sur la surface d'objets en céramique. Il y a trois mille ans, des artisans découvrirent que si l'émail avait une épaisseur suffisante, il pouvait servir seul à fabriquer des objets sans pour autant qu'il soit supporté par la terre cuite.



Figure II.1 : «Fer de lance» tsimshian en obsidienne, du Yukon et de l'Alaska le long de la Côte du Pacifique (1937).

Un texte Latin de Pline raconte que le verre devrait sa naissance à un concours de circonstances. Selon la légende, des marins de Syrie, n'ayant pas trouvé de pierre sur une plage, utilisèrent des blocs de nitre (carbonate de soude) issus de leur cargaison pour leur feu de camp. L'intensité des flammes permit de fusionner le sable et le nitre en un liquide inconnu auparavant et transparent : le verre. Mais ceci n'est qu'une légende car l'élaboration du verre nécessite une température d'environ 1300°C.

Il semblerait donc que le verre ait plus de 5000 ans. En effet, lors de nombreuses fouilles effectuées en Egypte, les archéologues ont retrouvé divers petits objets en verre : petits flacons de parfum, coupes, perles, etc. [7]. Ces objets antiques étaient opaques et colorés en vert ou en bleu.



Figure II.2 : Amphore opaque bleue. Egypte, 1400-1300 av.J,-C

Les premiers verriers s'aperçurent qu'ils pouvaient faire fondre le sable plus facilement en ajoutant de la soude au contenu de leurs fours. La soude ou la potasse sous forme de cendres de bois abaissait le point de fusion du sable à tel point que les fours ordinaires permettaient d'atteindre les températures nécessaires.

Mais la seule addition de la soude n'était pas suffisante pour faire du verre de bonne qualité : celui-ci avait une vie courte et même l'eau l'attaquait. Suite à quoi, on découvrit qu'en ajoutant la chaux, sous forme de calcaire broyé, le verre obtenu n'était plus attaqué par l'eau. C'est là une formule de base connue maintenant sous le nom de verre à la chaux sodique [7].

II.2 Définition du verre

Par verre, on désigne «un solide non cristallin, présentant le phénomène de transition vitreuse» [8]. Cette définition est plus générale que celle du langage courant où l'on comprend par verre un matériau fragile et transparent à la lumière visible. Elle englobe les matériaux amorphes, c'est à dire les matériaux obtenus par refroidissement, mais exclut les matériaux non cristallins qui n'ont pas la stabilité interne requise. En effet, l'état vitreux est un état solide métastable, qui peut présenter un ordre au niveau des liaisons interatomiques mais qui est désordonné, tout comme les liquides, à plus grande échelle.

L'état solide est plus ordonné que l'état gazeux ou que l'état liquide : les cristaux en sont une bonne illustration. Il existe des solides apparemment moins ordonnés : verre, polymères vitreux et des solides partiellement ordonnés comme les polymères semi-

crystallins. Pour tous ces matériaux non-cristallins, il existe fréquemment une certaine forme d'ordre à courte distance, même si ce n'est pas l'ordre cristallin. Si l'on fond des cristaux de quartz naturel, on constate après refroidissement brutal que le matériau manifeste des propriétés différentes de celles du matériau initial. On obtient un verre : silice vitreuse.

L'étude approfondie de la silice vitreuse, en particulier par diffraction des rayons X, montre que les distances interatomiques imposées par les liaisons covalentes sont toujours respectées.

Les tétraèdres continuent à exister dans la silice vitreuse, comme dans la cristobalite, mais il n'y a pas de motif qui se répète périodiquement (Figure II.3).

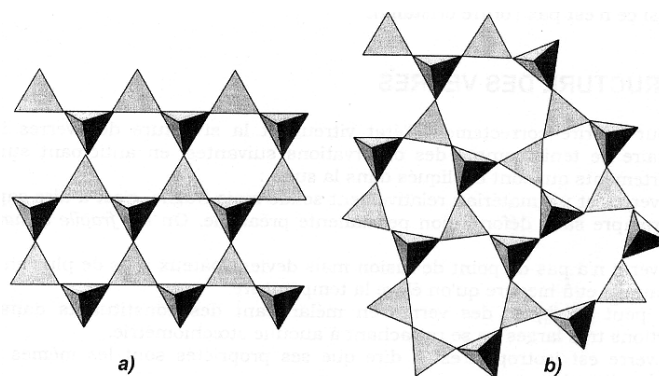


Figure II.3 : a) Structure en anneau de la Cristobalite ; b) Modèle proposé par Zachariasen : les tétraèdres continuent d'exister en formant un réseau continu irrégulier et sont désorientés dans les trois dimensions [8].

En 1921, LEBEDV avait proposé un modèle pour le verre prévoyant l'existence de très petits domaines ordonnés appelés cristallites et reliés les uns aux autres par des domaines désordonnés. La théorie de Zachariasen [8] décrit la silice vitreuse comme un réseau désordonné conservant les assemblages SiO_4 de la cristobalite. Le passage de la cristobalite à l'état vitreux s'explique par une trop grande viscosité du liquide qui empêche les tétraèdres désordonnés de reformer la cristobalite. Le matériau n'est ni totalement désordonné (conservation des tétraèdres), ni dans un état métastable au sens de la thermodynamique mais il évolue simplement vers l'état cristallin avec une cinétique très lente. Zachariasen [8] a formulé les quatre conditions suivantes pour la formation des verres d'oxydes :

La coordinance du cation doit être petite ;

- un ion d'oxygène ne doit pas être lié à plus de deux cations ;
- les polyèdres construits par les oxygènes ne peuvent avoir en commun que leurs sommets et non leurs arêtes ou leurs faces ;
- trois sommets au moins de chaque polyèdre doivent appartenir en même temps à d'autres polyèdres.

L'état vitreux est donc caractérisé par un désordre (Figure II.4), proche de celui d'un liquide qui tend à cristalliser. La cinétique de cristallisation est, en général, suffisamment lente pour que le matériau apparaisse comme stable à l'échelle de la vie humaine.

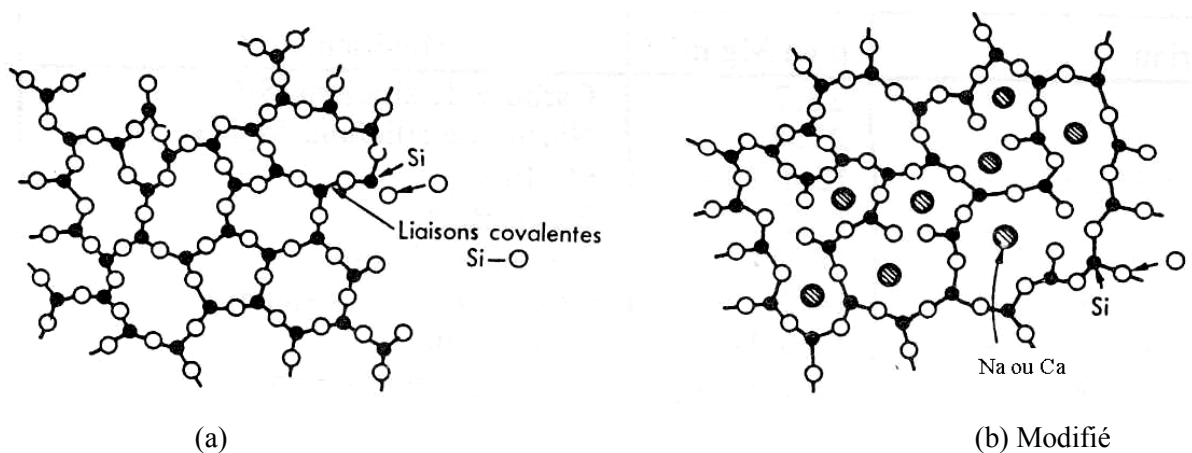


Figure II.4 : (a) l'empilement des atomes de la silice amorphe. (b) l'adjonction de Na_2O et CaO brise des liaisons dans la silice amorphe et donne naissance au verre sodo-calcique [9].

La silice et tous les oxydes qui permettent de telles constructions sont appelés formateurs de réseau. Chaque liaison entre deux polyèdres est effectuée par un atome d'oxygène bivalent : un tel atome est appelé oxygène pontant.

On peut modifier la structure d'un verre en y introduisant des modificateurs de réseau. Ce sont des oxydes alcalins de formule M_2O , comme Na_2O et K_2O ou des alcalino-terreux de formule MO , comme CaO et BaO . En ajoutant les fondants (oxydes alcalins), la température de fusion passe de 1730°C à 1400°C (économie d'énergie) et les possibilités de travail sont facilitées. Avec Na_2O nous avons (Figure II.5):

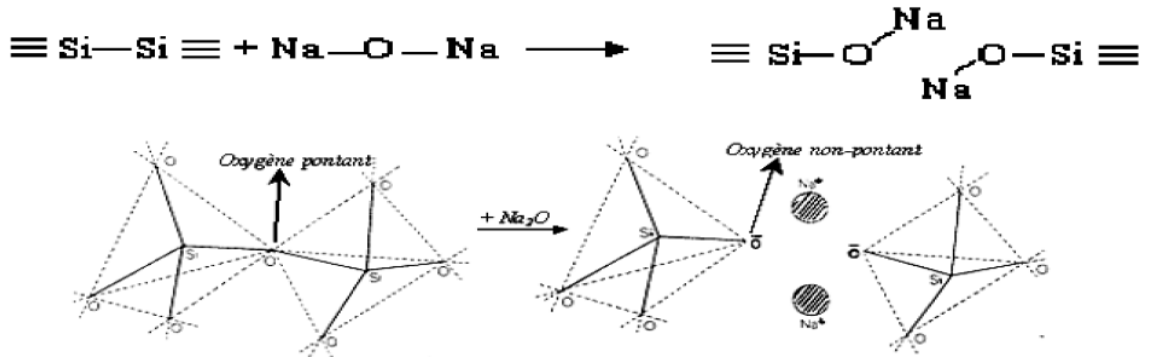


Figure II.5 : Rupture d'un pont Si-O-Si par adjonction d'une molécule de modificateur Na₂O [10].

La présence de Na₂O provoque l'interruption des liaisons du réseau continu non cristallin, rendant le verre plus fluide à haute température. La formation de ces discontinuités entraîne un affaiblissement de la structure vitreuse dont la solidité augmente avec le nombre de ponts Si—O—Si.



L'introduction de CaO entraîne l'existence d'ions O⁻² liés au silicium d'un seul côté et apporte ainsi une certaine discontinuité au réseau. Mais la liaison Ca - O est considérablement plus forte que la liaison Na - O, à cause de la bivalence de l'ion Ca⁺², de sorte que les deux oxygènes non pontants se trouvent en quelque sorte liés à travers l'ion Ca⁺² [11].

II.3 Formation du verre

Les procédés de fabrication peuvent être classés en trois catégories: le figeage du désordre d'une phase liquide, l'utilisation du caractère désordonné de la matière et la désorganisation d'une phase cristalline [8]. Le plus souvent, le verre est produit par figeage de la phase liquide. Il est refroidi progressivement jusqu'à sa solidification. En étudiant le processus de formation du verre, deux températures sont à définir: T_f la température de fusion du verre et T_g sa température de transition vitreuse.

Pour définir plus clairement ces températures, analysons l'évolution du volume spécifique V du verre avec la température (figure II.6). A partir d'un état A, dont la température est supérieure à la température de fusion T_f, la viscosité augmente pendant que

la température diminue. Quand la température atteint T_f en B , deux phénomènes peuvent se produire, soit le liquide se cristallise si la vitesse de refroidissement du verre est faible, ce qui se caractérise par une discontinuité (cas C), soit le liquide passe à l'état surfondu si la cristallisation n'a pas le temps d'avoir lieu (cas E). En E , la température est la température de transition vitreuse T_g , c'est à partir de cette température que l'on parle de verre.

Autrement dit, à T_f , on observe alors une variation de volume: il s'agit d'une modification d'une grandeur thermodynamique du premier ordre qui correspond à un changement d'état. Sous la T_f on observe aussi un changement de pente de V (cette pente est beaucoup plus faible pour un solide que pour un liquide). Mais si, lors du refroidissement du liquide, la viscosité est trop importante ou le refroidissement très rapide, la cristallisation n'a pas le temps de se produire et un liquide surfondu est alors obtenu. Aucune discontinuité de V n'est alors observée à T_f et sa pente reste inchangée. En poursuivant le refroidissement, la viscosité du liquide augmente de façon exponentielle et le liquide surfondu devient quasiment solide. Lorsqu'elle atteint 10¹³ poises, la rigidité empêche les mouvements microscopiques locaux et on observe un changement de pente : il n'y a pas de variation de grandeur thermodynamique du premier ordre, mais un changement de grandeur thermodynamique du second ordre comme le coefficient de dilatation, ou la capacité calorifique (qui s'observe par dilatomètre et calorimétrie différentielle à balayage respectivement). La température à laquelle se produit ce changement s'appelle température de transition vitreuse, T_g . La transition vitreuse est donc appelée "transition thermodynamique du second ordre" (par opposition à la fusion qui est une transition du premier ordre). La transition vitreuse résulte d'une perte de mobilités atomiques au fur et à mesure du refroidissement. Elle n'est pas intrinsèque et dépend donc de la vitesse de refroidissement: elle augmente si la vitesse de trempe augmente. Pour une température inférieure à T_g , le matériau est un solide avec le désordre structural d'un liquide : c'est un verre. Le désordre, et donc l'entropie, sont plus élevés dans un verre que dans un cristal. Sous la T_g , l'entropie (le volume) varie de la même façon pour le verre et pour le cristal. Mais, en théorie, si le verre est refroidi suffisamment lentement, la T_g s'abaissant, par extrapolation de la variation d'entropie du liquide surfondu, on pourrait obtenir un verre d'entropie plus faible que le cristal équivalent: c'est ce qu'on appelle le paradoxe de Kauzmann.

Le verre

Le passage continu de l'état liquide à l'état vitreux se fait dans une plage de température délimitée par la température de fusion (T_f) et la température de transition vitreuse (T_g). La zone de transition vitreuse encadre T_g . En dessous de T_g , le verre devient "hors équilibre": il s'éloigne de son équilibre thermodynamique, puisque les mobilités atomiques ne sont plus suffisantes (la viscosité augmentant) pour que l'équilibre soit atteint (il s'éloigne donc d'autant plus de l'équilibre que la vitesse de refroidissement est élevée).

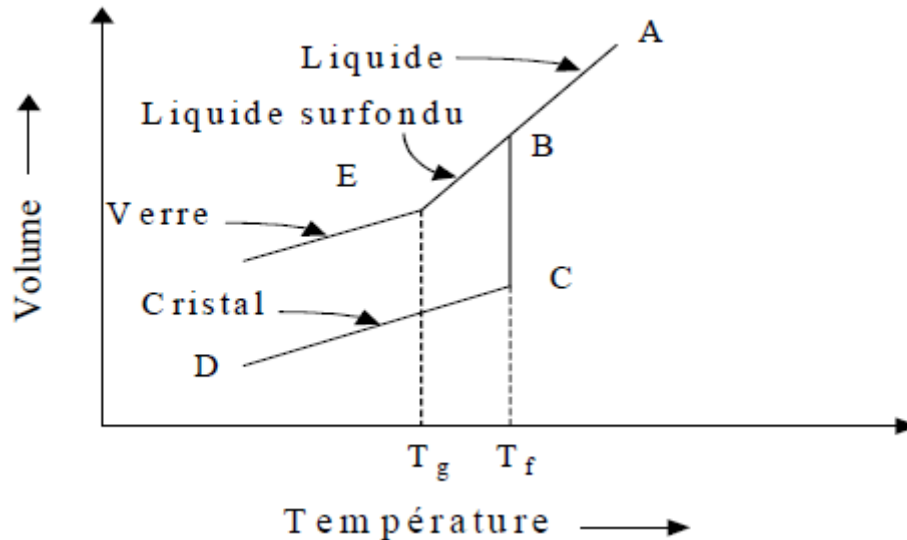


Figure II.6 : variation spécifique du verre avec la température, relation entre les états solide, liquide et vitreux [12].

II.4 Composition du verre

D'après les recherches et travaux menés par **M. Arezki TAGNIT-HAMOU** [13] et autres sur le verre mixte, récupéré, débarrassé de toutes impuretés ; métal, plastique, papier, matières organiques (alcool et colle) et autre... (figure II.7). La composition chimique (tableau II.2) a montré que ce verre est principalement composé de SiO_2 (près de 73%). Les teneurs en CaO et Na_2O confirment bien la nature sodo-calcique du verre.

Le rapport molaire $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ ne dépasse pas 1. Selon VARGIN (1961) [14], cela signifie que l'ion Al_3^+ est une consolidation de plus pour la structure du verre. C'est-à-dire qu'il jouerait donc le rôle de formateur de réseau. À côté des éléments dominants tels les oxydes formateurs (SiO_2 et Al_2O_3) et les fondants et stabilisants (K_2O , Na_2O , CaO , MgO), d'autres éléments composent ce verre. Leur présence peut s'expliquer par le fait que notre matériau est un verre mixte comportant plusieurs couleurs. En effet, différents oxydes

Le verre

métalliques peuvent être ajoutés combinés à différents pourcentages lors du processus de fabrication du verre pour le colorier. Ainsi, dans le cas de notre verre, le chrome et le fer sont attribués au vert et au vert-brun [15].



a) verre débarrassé des ses impuretés

b) impuretés du verre (papiers, plastiques, métaux)

Figure II.7

Composition (% en masse)	ciment	poudre de verre
silice (SiO ₂)	20.2	72.5
alumine (Al ₂ O ₃)	4.7	0.4
L'oxyde de fer (Fe ₂ O ₃)	3.0	0.2
L'oxyde de calcium (CaO)	61.9	9.7
L'oxyde de magnésium (MgO)	2.6	3.3
L'oxyde de sodium (Na ₂ O)	0.19	13.7
Oxyde de potassium (K ₂ O)	0.82	0.1
Le trioxyde de soufre (SO ₃)	3.9	-
Perte au feu	1.9	0.36
Finesse% passant (taille tamis)	97.4 (45 µm)	80 (45 µm)
Poids unitaire, kg / m ³	3150	2579
densité	3.15	2.58

Tableau II.1: Composition chimique des matériaux de cimentation [13].

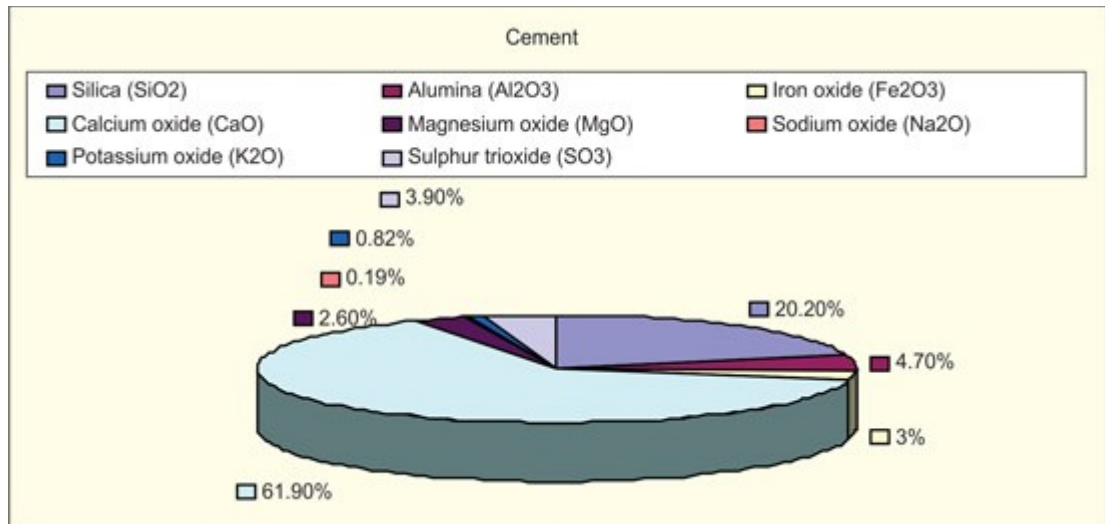


Figure II.8: Composition chimique du ciment [54]

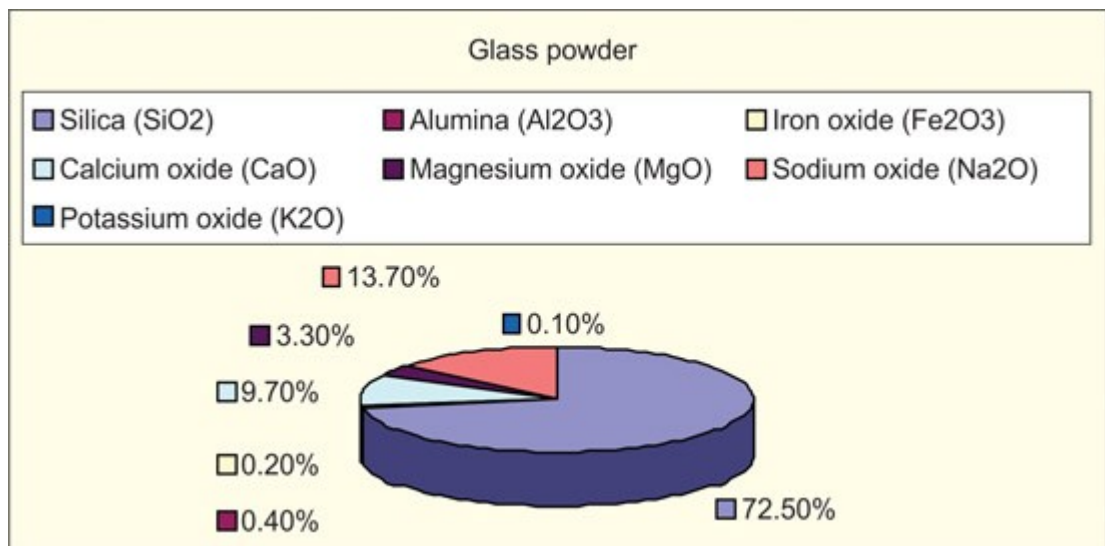


Figure II.9: Composition chimique de la poudre du verre [54].

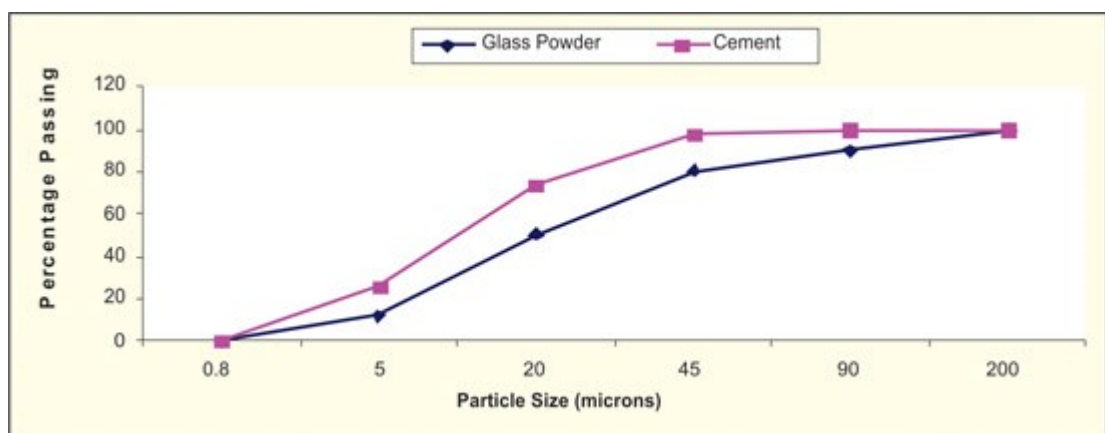


Figure II.10: La distribution de taille de particule de la poudre de verre et du ciment [54].

II.5 Les différents types de verre

On distingue plusieurs sortes de verre selon :

II.5.1 La forme ou lieu de fabrication [15]

- Verre plat ou à boudine - Pièce de verre ronde de 36 à 40 pouces de diamètre, ayant un nœud ou boudine au milieu - La qualité de ce verre est plus commune, et on n'en fait presque plus usage.
- Verre en manchon ou en feuille - Verre qui se souffle de toutes les mesures que l'on désire, et qui se vend en feuilles.
- Verre d'Alsace - Verre commun et qui se vend en feuille - On en distingue de trois sortes; le verre ordinaire, le verre teinté blanche ou demi-blanc, et le verre double.
- Verre en table ou verre de Bohême (république chèque) - Verre le plus blanc comme le plus épais de tous - Il se fabrique dans diverses parties de la France, et on en connaît de trois qualités en raison de sa plus forte ou de sa moindre épaisseur.
- Verre de couleur - Qualité de verre semblable à celui dit de Bohême pour l'épaisseur, et que l'on colore en rouge, jaune, bleu, etc.
- Verre double - Verre de Bohême qui est plus épais que le verre de Bohême ordinaire.
- Verre à estampe - Verre de Bohême le plus mince.
- Verre en paquet - La manière de livrer le verre blanc qui lui fait donner le nom dans le commerce - Chaque paquet est du même prix et contient plus ou moins de feuilles.
- Verre layé - Verre qui est calciné et privé en partie de sa transparence; ce défaut n'existe que dans le verre blanc - On le nomme aussi verre gras.
- Verre à vitre - Verre commun dit verre d'Alsace.
- Verre dépoli - Verre dont on a détruit le vernis en frottant sa surface avec du sable ou de l'émeri et une molette de grès.

II.5.2 La composition chimique [15]

- le verre sodocalcique, (« Soda-lime glass » pour les anglophones) regroupe des verres à base de silice SiO_2 , de calcium et de sodium introduits en général à la fabrication sous forme de CaO et Na_2O .
- le verre de quartz (parfois nommé *verre quartz* ou *quartz verre*) est un verre obtenu par fusion de quartz ou de sable à très haute teneur en silice, sans addition de fondant. Afin d'obtenir une grande pureté, il peut également être produit à partir de quartz ou de silice synthétiques, on le qualifie alors de verre de silice (ou encore *silice vitreuse*).
- le verre potassique, élaboré à partir de potasse K_2O ;
- le verre liquide ; L'orthosilicate de sodium (souvent dénommé « silicate de soude » ou de potassium, respectivement Na_4SiO_4 ou K_4SiO_4 sont solubles dans l'eau ; ces solutions sont connues sous le nom de verre liquide.
- le cristal : est un type de verre riche en plomb (jusqu'à 40 % de la masse et plus et au moins 24 % d'oxyde de plomb PbO doit avoir été ajouté au verre). Le plomb abaisse fortement le point de fusion, tout en stabilisant la composition du « verre ». Il rend le verre plus éclatant tout en lui conférant une très légère teinte jaunâtre. De plus, le verre est alors plus agréable à couper et à travailler, mais avec plus de risques environnementaux et sanitaires (le plomb est un métal très toxique). Le terme est trompeur, car il s'agit d'un matériau amorphe ; ce n'est donc pas un cristal au sens physique du mot.
- le verre volcanique est un matériau amorphe issu du refroidissement rapide d'un magma.

Les minéraux n'ayant pas eu le temps ou la possibilité de cristalliser, il apparaît au microscope comme une pâte amorphe. Les roches volcaniques contiennent souvent du verre volcanique entourant des cristaux qui eux ont eu le temps de se former, mais certaines sont essentiellement constituées de verre, comme la ponce, l'obsidienne ou les différents types d'hyaloclastites. Les roches contenant essentiellement du verre volcanique ont une structure dite hyaline.

La couleur de ce verre au microscope polarisé, en lumière non analysée, peut varier du jaune au noir.



Figure II.11: L'obsidienne, exemple de verre volcanique



Figure II.12 : Échantillon de pierre ponce hautement poreuse du volcan de Teide à Tenerife, Îles Canaries. La densité de l'échantillon avoisine les $0,25 \text{ g/cm}^3$. L'échelle est en cm

II.5.3 L'utilisation

- L'émail : est une substance vitreuse composée, notamment, de silice, de feldspath, de kaolin et d'oxydes métalliques [15].

Ce mélange, proche d'une terre ou d'une pâte, se vitrifie sous l'action de la température, lors de la cuisson.



Figure II.13: Feldspath plagioclase [15]



Figure II.14: Kaolin [15]

- La fibre de verre : est un filament de verre. Par extension, les matériaux composites renforcés de cette fibre sont aussi appelés *fibre de verre*. Elle trouve des applications en renforcement, isolation et optique. La première application est de loin la plus importante : la fibre de verre est alors utilisée pour renforcer les bétons ou les polymères en vue de fabriquer des matériaux composites. Ceux-ci sont alors capables de se substituer à l'acier ou au carton. Le matériau composite résultant,

Le verre

connu sous le nom de *glass-reinforced plastic* (GRP) souvent appelé « fibre de verre » en langage courant.

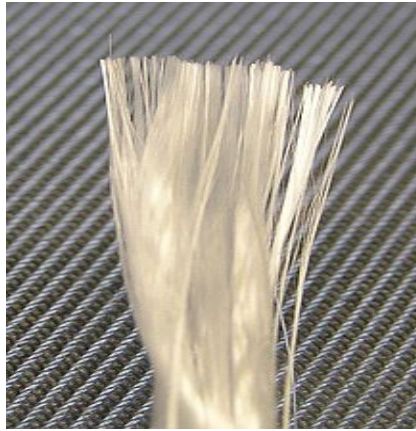


Figure II.15 : Ensemble de fibres de verre [15]

- La laine de verre : est un matériau isolant de consistance laineuse obtenu par fusion à partir de roche, de verre ou de laitier. Elle a été inventée en 1938, par Russell Games Slayter d'Owens-Corning, depuis elle est utilisée abondamment pour l'isolation thermique, l'isolation phonique et la protection incendie de tous types de bâtis.



Figure II.16 : Laine de verre utilisée comme isolant [15]

- Le strass (appelé pierre du Rhin au Québec) : est un verre imitant une gemme. Il est utilisé pour la confection de bijoux de fantaisie. Devenu un véritable accessoire de mode, le strass est utilisé partout : sur les vêtements, bijoux, objets de décoration, maquillage de fêtes, ornements de coiffures, tatouages temporaires, etc..
- Les fulgurites (du latin *fulgur* signifiant foudre) ou "pierres de foudre" : sont des morceaux de verre naturel amorphe (nommé lechatelierite (en) par Alfred Lacroix) très fragiles, généralement en forme de tube quasi cylindrique, produits par les

Le verre

impacts de foudre sur une roche. Les premières fulgurites découvertes datent du XVII^e siècle.

Les plus connues proviennent de rencontres entre un éclair orageux et un sol sableux. Ce sont les plus impressionnantes et les moins rares, elles ont été trouvées en abondance dans le désert Libyque.



Figure II.17 : Des fulgurites [15]

- Le pyrex est un verre borosilicate présentant un faible coefficient de dilatation. Il est résistant à la chaleur car son coefficient de dilatation thermique est très faible. Il est principalement utilisé pour les optiques non transmissives comme les miroirs, car son homogénéité est faible et sa porosité élevée. Il se prête au travail au chalumeau. Il est aussi utilisé pour :
 - ✓ la vaisselle supportant les chocs thermiques.
 - ✓ la verrerie de laboratoire pouvant aller sur la flamme.
 - ✓ les vitres des poêles, inserts et autres foyers domestiques et industriels.
 - ✓ les appareils industriels, ballons et capacités jusqu'à 500 litres, tuyauteries et colonnes jusqu'à 1 000 mm de diamètre.
 - ✓ la construction de réflecteurs de télescopes.
 - ✓ les tubes à couder pour la réalisation d'enseignes au néon.
 - ✓ les petits sujets en verre coloré faits entre autres à Murano.
 - ✓ la consommation de certaines drogues comme le crack et la méthamphétamine.



Figure II.18 : Un bécher en pyrex [15]

II.5.4 La technique de fabrication

- Le verre craquelé : est un type de verre présentant des craquelures dans la masse et utilisé à usage décoratif. La technique aurait été découverte à Murano. Il a principalement été utilisé pour réaliser des vases ou des pichets.



Figure II.19: Vase en verre craquelé



Figure II.20 : Détail [15]

- Un verre dépoli : est un objet de verre comportant d'infimes aspérités le privant de la transparence naturelle du verre. Il est utilisé quand une transparence complète présente des inconvénients ainsi que pour des motifs esthétiques. Quand les aspérités sont de taille plus importante, une rugosité apparaît en donnant une apparence différente, *granitée*.

II.6 Comportement du verre

Le verre usagé peut être traité soit par réemploi direct (système de consigne où les bouteilles sont récupérées, lavées et réutilisées) soit comme matière première (verre concassé ou « calcin » et fondu) pour la fabrication de nouveaux verres. Ce dernier constitue l'essentiel du recyclage du verre dans le monde.

Le verre a été longtemps considéré comme un matériau inerte. Plusieurs types de verre présentent une bonne résistance à la corrosion comparée à d'autres matériaux. Mais aujourd'hui, il faut considérer que tous les produits vitreux sont chimiquement réactifs en solution. Selon les milieux d'attaque, différentes réactions ont lieu. Plusieurs auteurs, ont étudié la réaction du verre en milieu acide [17,18,19,20,21], en milieu neutre [21,22,23] et enfin en milieu basique [16,18,21,24,25] qui vont être présentés par la suite.

II.6.1 Corrosion du verre en milieu acide :

Le mécanisme de dégradation du verre par une solution acide se traduit par l'échange d'ions entre la solution aqueuse et la surface du verre, c'est la *désalcalinisation* de la surface ou *leaching* [17]. La **Figure II-21** illustre ce mécanisme dans le cas de l'attaque du verre par une solution d'acide chlorhydrique (HCl) [18]. Lorsque les ions Na^+ et OH^- passent en solution, le proton du groupe silanol SiOH échange son site de surface avec celui d'un ion alcalin de l'intérieur : il diffuse dans le verre. La cinétique est donc contrôlée pas l'interdiffusion entre le cation alcalin du verre et le proton. Il semble qu'à basse température, le cation qui diffuse dans le verre est l'ion hydronium. Les profils de diffusion des éléments hydrogène et sodium dans les couches superficielles du verre sodocalcique hydraté ont été déterminés [21]. Les études montrent qu'un atome de sodium est remplacé par trois atomes d'hydrogène et que la cinétique dépend de la racine carrée du temps [17] ($t_{1/2}$). De plus, quelle que soit la valeur du pH la vitesse d'attaque et la solubilité du verre restent constantes [18].

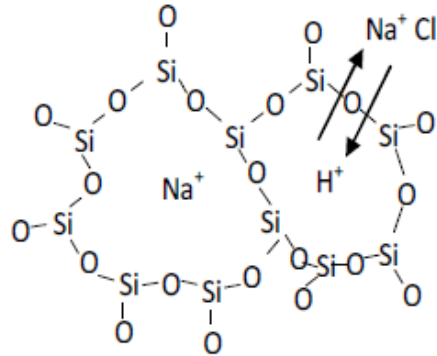
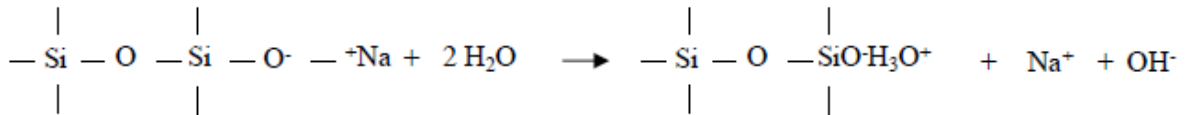
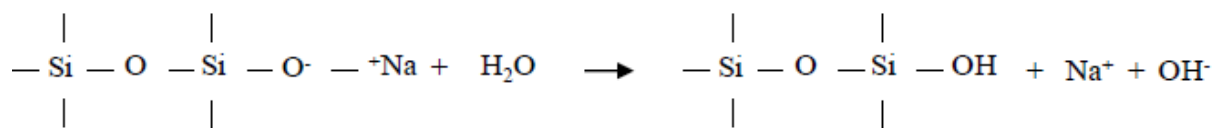


Figure II-21 : Mécanisme de dégradation du verre en milieu acide : désalcalinisation du verre (*leaching*) [18].

Les éléments modificateurs du réseau du verre sont préférentiellement éliminés en solution en modifiant peu la structure de la silice. Ainsi, l'extraction des ions Na^+ par des solutions à faibles valeurs de pH peut être classée selon l'ordre suivant [20] : $\text{H}_2\text{O} >$ acide citrique $>$ acide acétique $>$ $\text{HCl} >$ acide oxalique. Mais une partie également de l'élément silicium passe en solution et sa concentration finale correspond à la solubilité de la silice (SiO_2) à la température et à la valeur de pH considérées [19][20].

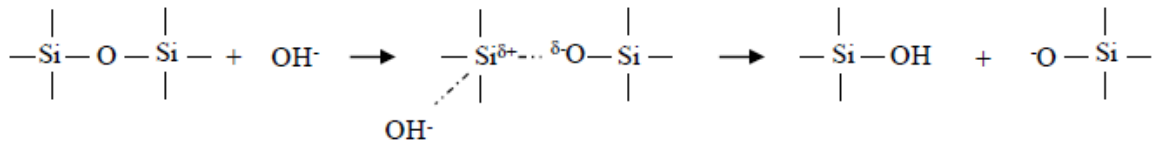
II.6.2 Corrosion du verre en milieu neutre

La diffusion des espèces chimiques est le mécanisme régissant la corrosion du verre en solution neutre [22][23]. Sous l'effet de la diffusion de l'eau à l'intérieur du verre, les atomes d'oxygène non-pontant se transforment en groupe silanol ($\equiv\text{SiOH}$). Ceci permet à l'ion Na^+ libéré de diffuser à la surface du verre avec l'ion OH^- . Par conséquent, les verres de silicates peuvent être considérés comme des sels d'un acide faible et de base forte [21] qui subiront une réaction d'hydrolyse selon l'équation suivante:



II.6.3 Corrosion du verre en milieu basique

Dans ce cas, le mécanisme qui régit est la dégradation du réseau silicique (ou leaching). Le verre est alors hydraté puis totalement dissout par rupture des ponts Si-O-Si à la surface du verre. Ce mécanisme est prédominant pour des valeurs de pH supérieures à 10. Il est donc caractéristique des attaques du verre par des solutions alcalines. Le mécanisme réactionnel peut être décrit par l'équation ci-dessous [25].



L'équation précédente montre que l'étape essentielle dans le processus de dépolymérisation est la rupture de la liaison siloxane Si-O-Si (liaison polarisée : Si $_{\delta+}$ -----O $_{\delta-}$) qui subit une attaque nucléophile. Les ions hydroxydes (OH $^-$) contenus dans la solution entraînent la rupture des liaisons Si-O-Si pour donner lieu à la formation de nouvelles liaisons Si-O- et Si-OH [16][21].

Les espèces sont ainsi détruites les unes après les autres. En supposant qu'aucune couche de protection ne se forme à la surface du verre, et que la solution ne change pas, la réaction serait linéaire en fonction du temps. Les ions sodium apportés dans la solution par l'échange ionique sont très importants dans la rupture du réseau. Ils peuvent se combiner aux espèces siliceuses pour former du silicate de sodium en solution appelé « water glass » [26]. A titre d'exemple, la **Figure II-22** illustre ce mécanisme dans le cas où le verre est attaqué par une solution de NaOH.

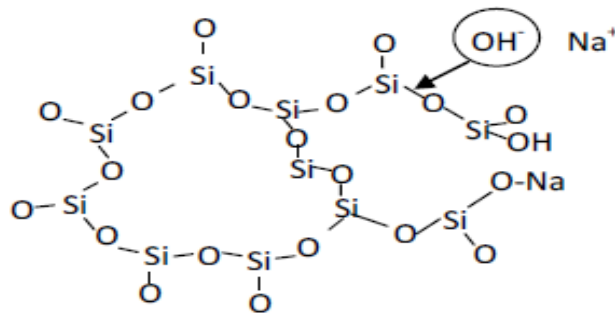


Figure II-22 : Schéma du mécanisme d'attaque du verre par une solution de soude (*etching*) [18].

Chapitre III

Le béton

III.1 Historique

L'histoire du béton revient avant même l'invention de l'écriture, appelé le béton de terre qui est un matériau à base de terre crue argileuse. Il est souvent présent à même le sol et peut être facilement mis en œuvre par moulage dans des techniques de brique de terre crue ou de banchage.

On voit par la suite la chaux associée à d'autres matériaux. La première utilisation du ciment remonte au temps des égyptiens. En effet, un des mortiers les plus anciens, composé de chaux, d'argile, de sable et d'eau, fut utilisé dans la conception de la pyramide d'Abou Rawash, érigée aux alentours de - 2600 avant J-C, sous la IV^{ème} dynastie, mais également pour d'autres ouvrages.

Vers le 1^{er} siècle après J-C, la Rome antique reprend cette technique en l'améliorant avec l'incorporation de sable volcanique de Pouzzoles ou de tuiles broyées. La pouzzolane comme on l'appelle est associée à la chaux et mélangée à des matériaux tout venant et forme un béton extrêmement résistant puisque beaucoup de vestiges construits dans ce matériau sont encore bien debout.

En 1818 Louis Vicat, ingénieur de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, crée le ciment tel qu'on le connaît aujourd'hui, avec la première fabrication de manière artificielle et contrôlée des chaux hydrauliques. Et c'est en octobre 1824 que le brevet du ciment est déposé par Joseph Aspdin, suivi par la création de la marque « ciment de Portland ».

Concernant l'histoire des utilisations du béton, c'est dans les années 1830 que l'on voit apparaître les premiers développements de ce matériau avec notamment la construction d'une maison de trois étages en béton à Montauban, par l'architecte François-Martin Lebrun, qui fut le tout premier à utiliser le béton comme matériau principal d'un bâtiment. C'est ensuite en 1852 que fut construit le premier immeuble en béton coulé avec fers profilés enrobés, par l'industriel français François Coignet. Sans être totalement du béton armé, c'est la première fois que l'association béton – acier fut utilisée, ce qui constitue le point de départ d'une grande avancée dans l'industrie du béton.

En 1929, c'est Eugène Freyssinet, ingénieur français, qui va révolutionner le monde de la construction en inventant le béton précontraint.

Le béton

À la fin des années 1980, on voit apparaître les bétons à hautes performances et par la suite, de nouvelles grandes innovations vont voir le jour avec notamment les bétons autoplaçants (BAP) et les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP). Le béton de ciment est, à l'heure actuelle, le matériau de construction le plus utilisé au monde [27].

III.2 Définition

Le béton est l'union de matériaux hétérogène constitué de granulats, sable et de pate (ciment, eau) .La pate de ciment représente 25% à 40%(voir le tableau III.1) du volume total du béton[28].chaque constituant joue un rôle bien défini :liant hydraulique pour la pate de ciment, remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) est la source de la résistance pour les granulats.

Un béton hydraulique est constitué :

- D'une pate pure (ciment, eau),
- D'un mélange granulaire,
- De produits additions (adjuvants, additions minérales)

On désigne habituellement sous le nom :

- De matrice ou de mortier :(liant+sable+eau),
- De squelette solide ou granulaire : mélange de granulats.

	Eau %	Air %	Ciment %	Granulats %
Volume	14-22	1-6	7-14	60-75
poids	5-9	/	9-18	63-85

Tableau III.1: Ordre de grandeur en proportions [29].

III.3 Composants

III.3.1 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissement progressivement dans le temps. Ce dernier est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium [29].

III.3.1.1 Constituants principaux

Le ciment courant a pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type : du calcaire, du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, des fines calcaires, de la pouzzolane naturelle, des schistes calcinés, des fumés de silice, dans le but de modifier de leur certaines propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions environnementales soit pour des raisons de performances mécaniques.

✓ Clinker portland :

Obtenu par la cuisson des matières premières constituées principalement de calcaire, d'argile et autres de correction, est un matériau hydraulique se présentant sous forme de petits nodules très durs composés essentiellement des quatre phases cristallines suivantes :

-silicate tricalcique : $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$ (C_3S) qui libère une quantité de chaleur donnant au ciment une résistance rapide et élevée (résistance aux premiers âges).

-silicate bicalcique : $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$ (C_2S) permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et à long terme.

-aluminat tricalcique : $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) est la phase présentant la plus grande vitesse de réaction initiale d'où l'obtention de résistance initiale élevée (contribue essentiellement à la prise de la pâte de ciment).

-alumino-ferrite tétracalcique : $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF), qui forme une solution solide de C_2A et C_2F (son rôle est mineur dans la réaction de durcissement du ciment).

Le béton

En dehors de ces quartes principales phases, le clinker comporte également :

-la chaux libre dont le pourcentage $\leq 2\%$ pour ne pas risquer de provoquer une expansion en présence d'eau.

-de l'oxyde de magnésium MgO qui peut être à l'origine d'une réaction avec l'eau.

✓ **Laitier de haut fourneau :**

Sous produit de fabrication de fonte brusquement refroidi avec aspiration d'eau, est un matériau hydraulique dont la composition chimique est : l'oxyde de calcium (40 à 50%), la silice (25 à 35%), l'alumine (12 à 30%) et la magnésie et d'autres oxydes en très faible quantité. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le Portland et craint donc davantage la dessiccation.

✓ **Cendres volantes :**

Sont des produits pulvérulents de grande finesse qui proviennent de dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. Elles peuvent être :

-siliceuses, constituées de silice réactive (40 à 55%) et d'aluminium (20 à 30%).

-calciques avec une proportion de chaux réactive supérieure à 5%.

✓ **Pouzzolanes naturelles :**

Sont des produits d'origine des roches volcaniques ou sédimentaires. Elles sont composées de silice réactive (dans des proportions $> 25\%$), d'alumine et d'oxyde de fer.

✓ **Schistes calcinés :**

Ces produits, obtenus à des températures de l'ordre de 800°C , présente, outre leurs propriétés pouzzolaniques, des propriétés hydraulique lorsque qu'ils sont finement broyés.

✓ **Fumée de silice :**

Constituées de particules environ 100 fois plus petites que les grains de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de $1/10$ de micron, présentent des propriétés pouzzolaniques en raison de leur forte teneur en silice amorphe. En outre, en raison de leur finesse, elles complètent la granulométrie du ciment. Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice.

III.3.1.2 Constituants secondaires

Ils peuvent être :

- Soit des constituants définis précédemment s'ils sont en proportion $\leq 5\%$ (exception faite du clinker).
- Soit des fillers, leur nature exacte et leur proportion devant d'ailleurs être précisées par le fabricant dès que cette proportion dépasse 3%.

Lorsque le constituant secondaire est un filler, il s'agit de poudres minérales très fines, généralement inertes mais pouvant parfois présenter des propriétés légèrement hydrauliques ou pouzzolaniques. Ces poudres peuvent améliorer la maniabilité du ciment, ce qui conduit à une augmentation de la maniabilité du béton.

✓ Sulfate de calcium :

Peut être de gypse, de l'anhydrite ou l'hémihydrate, doit être ajouté en faible quantité 3 à 5% maximum. Son rôle est de réguler la prise du ciment.

III.3.1.3 Additifs

Ne doivent pas présenter aucune action nocive sur les propriétés des ciments mais ils peuvent, suivant les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques.

- Agent de mouture, fréquemment employés, ce sont des sels organiques solubles à des doses extrêmement faibles. Ils agissent comme déflaquants empêchant la réagglomération des grains en cours de broyage.
- De sels solubles, tels certains adjuvants pour mortiers, béton ou coulis qui, agissent sur une caractéristique bien précise mais dont la présence dans le ciment doit être obligatoirement indiquée pour éviter d'éventuelle incompatibilité avec d'autres produits.

III.3.1.4 Classification des ciments

Les ciments sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression à 28 jours. La norme spécifiant une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont les suivantes :

Le béton

Classement des ciments	Résistance à 2 jours (MPa)	Résistance minimale à 28 jours (MPa)	Resistance maximale à 28 jours
32.5	/	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5R	≥ 13.5	≥ 32.5	≤ 52.5
42.5	≥ 12.5	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5R	≥ 20	≥ 42.5	≤ 62.5
52.5	≥ 20	≥ 52.5	/
52.5R	≥ 30	≥ 52.5	/

Tableau III .2 : Classification des ciments selon leurs résistances [29].

Les classes «R», rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées et trouvent leurs intérêts particulièrement dans certaines circonstances telles que le bétonnage par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication...

III.3.1.5 Principales catégories des ciments

La norme P 15.301 [30] distingue 4 catégories, à savoir :

- le ciment portland artificiel (C.P.A) qui contient au moins 97% de clinker, le reste est du filler.
- le ciment portland composé (C.P.J) qui contient au moins 65% de clinker, le reste est l'un ou plusieurs des constituants définis précédemment.
- le ciment d'haut fourneau (C.H.F) qui contient entre 60 te 75%de laitier le reste des constituants est du clinker ou du filler dans la limite de 3% de l'ensemble des constituants.
- le ciment de laitier au clinker (C.L.K) qui contient au moins 80% de laitier, le reste est du clinker ou du filler dans la limite de 3% également.

III.3.2 Les granulats (sables et gravillons)

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes (sables, gravillons, cailloux) d'ont l'origine peut être naturelle ou artificielle. Nous distinguons les granulats extraits de ballastières naturelles ou des rivières, et le granulats concassés obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières ; les granulats sont classées selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux

passants dans des tamis de dimensions normalisées [31]. Dans le béton frais, les granulats servent au remplissage de l'espace (ils occupent environ 70%) de volume de plus en raison de leur porosité ouverte, ils peuvent absorber une certaine quantité d'eau (effet de mouillage). Dans le béton durci, les granulats apparaissent comme des inclusions dures. Ils ont un rôle important dans la résistance mécanique et dans la consistance du béton de plusieurs manières :

- leur qualité mécanique ;
- leur capacité d'adhérence avec la pâte du ciment ;
- leur forme (roulés ou concassés) ;
- leur diamètre maximal des granulats ..;

III.3.3 L'eau

Est un constituant nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier. La quantité d'eau a une influence sur les caractéristiques du béton, est normalisée par la norme NF P 18-303. Les eaux ne doivent pas contenir de produits risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension (2 ou 5g/l) dont la quantité pourrait modifier ses qualités originales. Il convient donc d'y apporter une grande attention lors de l'emploi d'eau de rejet ou de lavage.

III.3.4 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques, incorporés au béton en faible quantité, permettant d'améliorer certaines de ses propriétés. Leurs efficacités sont liées à l'homogénéité de leur répartition dans le béton [32], [33]. Les principaux adjuvants sont :

✓ **Le fluidifiants (ou réducteur d'eau) :** Ces produits jouent un double rôle. ils sont utilisés pour fluidifier le béton et permettre le maintien du rapport E/C constant (ils doivent, par rapport au béton témoin, assurer une résistance à la compression de 110% minimum [29]) ils permettent aussi, dans certains cas, de réduire le rapport E/C (réduction de dosage en eau de 5%) pour avoir une meilleure résistance tout en ayant la même fluidité du béton [34]. Dans le premier cas l'ajout du fluidifiant va permettre d'avoir du béton de même classe de résistance mais de consistance variable allant d'un béton ferme, béton plastique, très plastique jusqu'au béton auto-plaçant ; dans le cas des bétons auto-plaçant on utilise des super plastifiants qui sont des fluidifiants très puissants .

Le béton

✓ **Les retardateurs de prise de ciment :** Dans le cas de bétonnage en temps chaud ou d'éléments massifs il est conseillé d'utiliser un retardateur de prise pour freiner les réactions d'hydratation et aussi réduire la chaleur dans le béton , de manière que les propriétés du béton soient préservées et le béton ne fissure pas . Ils sont aussi employés pour éviter toute discontinuité lors de reprises de bétonnage.

✓ **Les accélérateurs de prise du ciment :** Pour le bétonnage en temps froid, on utilise les accélérateurs de prise pour provoquer l'hydratation et accélérer le durcissement freiné par la température ambiante. Les accélérateurs de prise permettent d'obtenir les résistances prévues pour 28 jours et à des âges avancés.

✓ **Les entraineurs d'air :** Ils permettent d'entraîner à l'intérieur du béton, des microbulles d'air parfaitement réparties qui serviront d'espace d'expansion de béton dans le béton durci. Ces microbulles permettent d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action de gel et améliore la résistance du béton sous l'action des incendies.

✓ **Les additions minérales :** Il existe deux catégories de fines minérales :

-les fines actives à caractère pouzzolanique : ce sont des particules de faible diamètre qui, ajoutées en quantité de l'ordre de 10% du poids du ciment, améliorent notablement les performances de résistance et de la durabilité du béton grâce à leurs propriétés pouzzolaniques (cendres volantes, fumée de la silice, laitier...) [35], [36].

-les fines inertes comme les fillers calcaires : l'objectif dans leur utilisation est d'améliorer la compacité du béton et donc sa résistance. Elles sont également utilisées pour améliorer la consistance des bétons notamment dans le cas des bétons auto plaçant qui nécessite une forte teneur pour assurer au BAP un compromis entre une bonne fluidité apportée par les fluidifiants et une bonne viscosité que l'on essaye d'avoir par l'introduction des fillers .

III.4 Composition des bétons

L'étude d'une composition du béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soit celles recherchées pour la construction de l'ouvrage [37]. Il existe de nombreuses méthodes dont on retiendra 2 types :

- Celle qui consiste à obtenir une granulométrie « continue ».
- Celle qui consiste à obtenir une granulométrie « discontinue ».

III.4.1 Critères en fonction de la destination des bétons

Les ouvrages que l'on construit aujourd'hui en béton sont des plus divers tant dans leur destinations que dans leurs dimensions et toutes études de composition de béton doit en tenir compte. Il convient donc d'en définir les critères qui devront constituer clairement les données de l'énoncé du problème que pose l'étude de la composition d'un béton destiné à un ouvrage donné.

Quatre critères principaux doivent être retenus [37] :

- La dimension maximale des granulats ;
- Les résistances ;
- L'ouvrabilité ;
- L'agressivité du milieu ambiant ;

Ces critères sont retenus dans la norme P 18-305 concernant les bétons prêts à l'emploi préparés en usine et sont la base de l'énoncé du problème dans la méthode de Dreux et Gorisse .

✓ Dimension maximale **D** des granulats :

Cette dimension dépend évidemment des dimensions de l'ouvrage (barrage, digues et murs de quai, structures de bâtiments, voiles minces,...), mais elle dépend également des dispositifs de ferrailage (densité relative par rapport au coffrage, maillage). Une valeur de **D** est préconisée par George Dreux [37].

Caractéristiques de la pièce à bétonner	Valeur maximale de D
e espacement entre les armatures principales	e 0,8r
r rayon moyen des mailles de ferrailage	R
R rayon moyen de moule	$h_m/5$
h_m épaisseur minimale de la pièce	

Tableau III.3 : Dimension admissible **D** pour les plus gros granulats [29].

Le rayon moyen **r** d'une maille de ferrailage est le rapport entre la surface de la maille et son périmètre. Le rayon moyen **R** du moule est le rapport entre le volume à remplir dans la zone la plus ferrillée et la surface de coffrage et d'armature en contact avec le béton.

Le béton

Pour l'épaisseur d'enrobage des armatures les plus proches du coffrage (c), des recommandations sont faites par le Comité Euro-International du béton (CEB) [36] et le règlement BAEL [29]-article A.7.1.

Milieu ambiant	c minimal(CEB)	D maximal(CEB)	c minimal(CEB)
Locaux couverts et clos	1 cm	2 c	1 cm
Exposition aux intempéries	2 cm	1,5 c	3 cm
Milieu agressif	3 cm	c	3 cm
Milieu très agressif	4 cm	c-5 mm	5 cm

Nota : c doit, par ailleurs être supérieur ou égale au diamètre des armatures (ou à la largeur paquet d'armatures).

Tableau III. 4 : Enrobage minimal «c» des armatures [29].

✓ **Résistance souhaitée :**

D'après les notes de calcul d'un ouvrage, on définit la résistance caractéristique à exiger en valeur minimale pour le béton utilisé. Cette résistance caractéristique se calcule d'après le résultat sur éprouvettes de contrôle (soumises à la rupture) en déduisant de la moyenne K fois l'écart type (sur l'ensemble des valeurs). Il convient donc que l'on vise dans l'étude du béton une valeur moyenne probable supérieure à la résistance caractéristique exigée.

D'après les règlements en vigueur, on prend pour K la valeur de 0,85 à 1,2 en général et selon les cas, il convient de viser une résistance moyenne d'environ 15à20% supérieure à la résistance caractéristique exigée. Ce critère de résistance conduira au choix de ciment (nature, classe) et son dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvant. Ce critère a également une influence sur le rapport G/S (gravier/sable).

✓ **Ouvrabilité :**

L'ouvrabilité peut se définir comme la facilité offerte par le béton à bien se mettre en place pour le bon enrobage des armatures, un parfait remplissage de coffrage et son ségrégation. Ce critère peut, en générale se définir à partir de la plasticité par mesure de l'affaissement au cône d'Abrams selon les valeurs indiquées dans le tableau III.5.

L'ouvrabilité pour le béton est une qualité fondamentale qui doit être très sérieusement prise en compte dans l'étude de compression d'un béton.

Le béton

Consistance du béton	Affaissement au cône (cm)	Serrage nécessaire
Très ferme	≤ 2	Vibration puissante
Ferme	3 à 5	Bonne vibration
Plastique	6 à 9	Vibration normale
Très plastique	10 à 15	Simple piquage
fluide	> 16	Léger piquage

Tableau III.5 : Consistance du béton [29].

✓ **Agressivité du milieu ambiant :**

Le milieu ambiant dans le quel se trouvera l'ouvrage conditionnera également, selon son agressivité, l'étude de la composition du béton ; la présence d'eau agressive (eau de mer, gypseuse, très purs, ...) et condition thermiques d'utilisation (revêtement de fours ou ouvrage à des gels sévères) sont des considérations qui conditionnent surtout le choix du ciment et éventuellement la nature minéralogique des granulats, et parfois l'utilisation d'adjuvant.

III.4.2 Formulation du béton

Les méthodes proposées sont nombreuses ; elles aboutissent à des dosages volumétriques ou, de préférence pondéraux. Le passage de l'un à l'autre pouvant se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac, on citera [29] :

- Méthode de BOLOMY ;
- Méthode D'ABRAMS ;
- Méthode de FAURY ;
- Méthode de VALETTE ;
- Méthode de BARON-LESAGE ;
- Méthode de DREUX et GORISSE ;

▪ **Méthode de BOLOMY :**

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et on s'efforce de réaliser, avec des granulats qu'on dispose, une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe est aussi proche que possible de la courbe de référence

theorique. la formule de base est la suivante : $P = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}}$

Avec :

P : pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d,

D : diamètre du plus gros grain,

A : varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort,

Cette méthode aboutit théoriquement tout au moins, à une granulométrie continue.

▪ **Méthode d'ABRAMS**

Cette règle de mélange fondée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour un mélange de granulats à partir de la connaissance de la finesse des granulats à employer. Cette règle de mélange d'ABRAMS permet de calculer le pourcentage relatif des granulats de module de finesse M_{f1} et M_{f2} pour obtenir un module M_f choisi pour le mélange.

▪ **Méthode de FAURY**

FAURY a distingué les grains fins et moyens ($<D/2$) des gros grains ($>D/2$) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories. On trace donc pour l'ensemble de mélange, ciment compris, une courbe granulométrique de référence qu'est composée de deux droites. L'abscisse du point de rencontre des deux droites est fixée à $D/2$ et son ordonnée Y est donnée par la formule suivante :

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{D^{-0.75}}$$

Le paramètre A est choisi dans un tableau et D est exprimé en dimension passoire.

B varie de 1 à 2 selon que le béton est ferme ou mou.

R est le rayon du moule.

▪ **Méthode de VALLETTE**

Dans le cas le plus courant on partira, en général, de deux granulats : un sable 0/5 mm et un gravier présente une certaine discontinuité avec le sable, un 16/25 mm par exemple. On calcule le dosage de sable qui s'obtient en mesurant les vides de sable mouillé et en calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par un volume égal de pâte pure de ciment. On ajoute ensuite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient alors un béton plein avec un minimum de sable et le moins dosé.

▪ **Méthode de BARON -LESAGE**

Elle a pour objet d'obtenir sur le chantier un béton comportant le minimum de vides et d'eau. L'étude peut être faite soit à partir de mesures de compacité, soit à partir de mesures de temps d'écoulement. Celle-ci est fondée sur l'existence d'une fonction qui caractérise le mélange des constituants solides et sur le repérage pratique de cette fonction. Une propriété de cette dernière est d'avoir la valeur maximale pour le meilleur béton et ce quelles que soient les conditions de la mise en œuvre et la teneur en eau.

La méthode consiste à déterminer le constituant, les proportions des constituants pour que la fonction soit maximale.

▪ **Méthode de DREUX et GORISSE**

La résistance et l'ouvrabilité désirée conduisent à déterminer le dosage en ciment et en eau. une courbe de référence granulaire et ensuite tracée schématiquement en tenant compte des différents paramètres concernant le béton étudié et ses constituants : dimension des granulats, dosage en ciment, plasticité, intensité de serrage, module de finesse du sable, etc. Cette courbe de référence permet de doser les proportions, en volume absolu, des différents granulats dont on dispose. En fin la prise en compte d'un coefficient de compacité probable du béton et de la masse volumique des différents granulats permet d'aboutir à la formule de dosage pondéral pour le béton désiré. Il s'agit ensuite quelques essais sur ce béton pour apporter à cette formule les corrections expérimentales nécessaires.

III.5 Comportement instantané du béton

III.5.1 Compression

Elle se mesure par compression axiale de cylindres droits de révolution et d'une hauteur double de leur diamètre. Le cylindre le plus couramment utilisé est le cylindre de $\varnothing=16$ cm dont la section est de 200 cm^2 . la normalisation Européenne indique comme dimension des cylindres $\varnothing=16$ cm de $H=32$ cm [29].

Les résultats sont donnés sous forme d'une courbe contraintes-déformations :

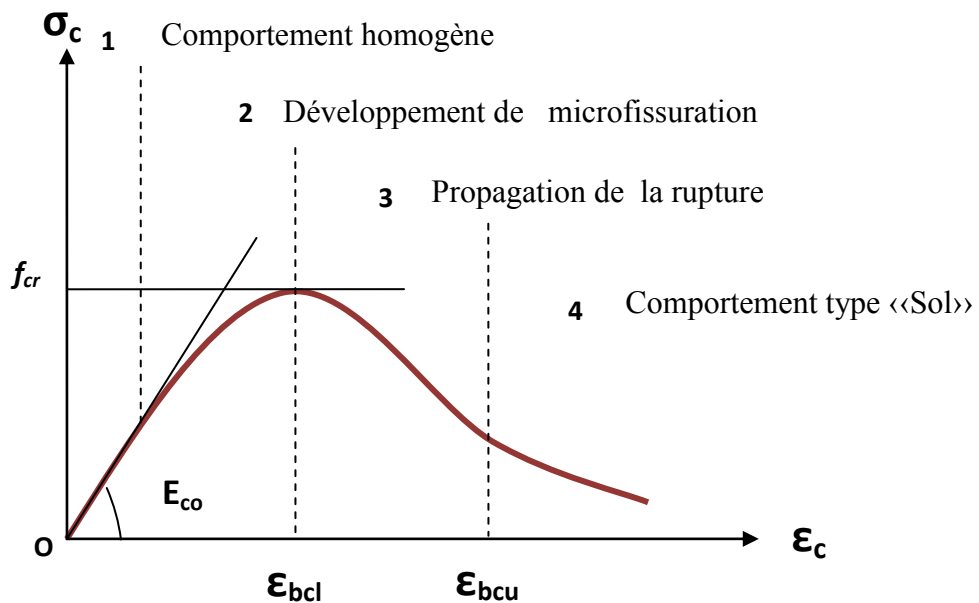


Figure III.1 : Le diagramme σ - ϵ d'un béton en compression [38].

Phase 1 : ($\sigma < 0.4 f_{cr}$) environ : comportement analogue à celui d'un matériau homogène et élastique.

Dans cette phase le béton suit sensiblement la loi de Hook ; la pente à l'origine de la courbe est le module de déformation longitudinal tangent à l'origine E_{co} .

Phase 2 : développement de la microfissuration d'où incurvation progressive de la courbe jusqu'à la résistance à la compression f_{cr} (contrainte maximale) atteinte pour une certaine valeur ϵ_{bc1} , de la déformation.

Phase 3 : la pente de cette branche renseigne sur le caractère fragile plus ou moins accentué du béton étudié (si elle est presque horizontale, le béton est très ductile, si elle est quasi verticale, le béton est très fragile).

Phase 4 : cette phase est sans intérêt pratique ; le béton désagrégé se comporte comme un sol «tout- venant».

Il existe une déformation limite $\epsilon_{c,lim}$ qui , conventionnellement , correspond à la frontière entre les phase 3 et 4 mais qui , pratiquement correspond au point à partir duquel on n'est plus en mesure de maîtriser la déformation et donc d'enregistrer la courbe.

III.5.2 Traction

Plusieurs essais sont réalisés pour avoir le comportement du béton à la traction :

- a) En traction-flexion : c'est l'essai plus couramment utilisé. il consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique de côté a et de longueur $4a$ (voir la figure III.2). pour une charge totale P , le moment de flexion constant entre les deux points de

l'application de la charge est :
$$M = \frac{Pa}{2}$$

La section pour module d'inertie $\frac{I}{v} = \frac{a^2}{6}$ et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est :
$$f_{ij} = \frac{Mv}{I} = \frac{6M}{a^3}$$

Toutefois , la comparaison des résistances obtenues en traction flexion avec celles mesurées en traction directe ou par fendage montre que ces dernières sont en général et en moyenne inférieures de 40% par rapport aux premières ; ceci peut s'expliquer par la plastification du béton dans la phase pré rupture ; ne sont alors

plus valables, les lois d'élasticité qui donnent $\sigma = \frac{6M}{a^3}$ (proportionnalité des contraintes et des déformations). On affecte donc d'un coefficient 0,6 les valeurs trouvées en traction flexion et le calcul dans ce cas se fait par la formule :
$$\frac{3,6M}{a^3}$$

- b) En traction par fendage : l'essai consiste à écraser un cylindre du béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse ; cet essai est souvent appelé «Essai Brésilien». la rupture se produit par apparition des fissures suivant le plan diamétral correspondant (voir la figure III.2).

- c) En traction directe, la mesure se fait par la mise en traction de cylindres identiques aux précédents (voir la figure III.2). la rupture survient par formation d'une fissure perpendiculaire à l'axe de l'éprouvette.

P est la charge maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction

du plan diamétral vertical, la résistance en traction sera : $f_{tj} = 2 \frac{P}{\pi DL}$

Avec : j=âge du béton (en jour) au moment de l'essai ;

D et L = diamètre et longueur du cylindre

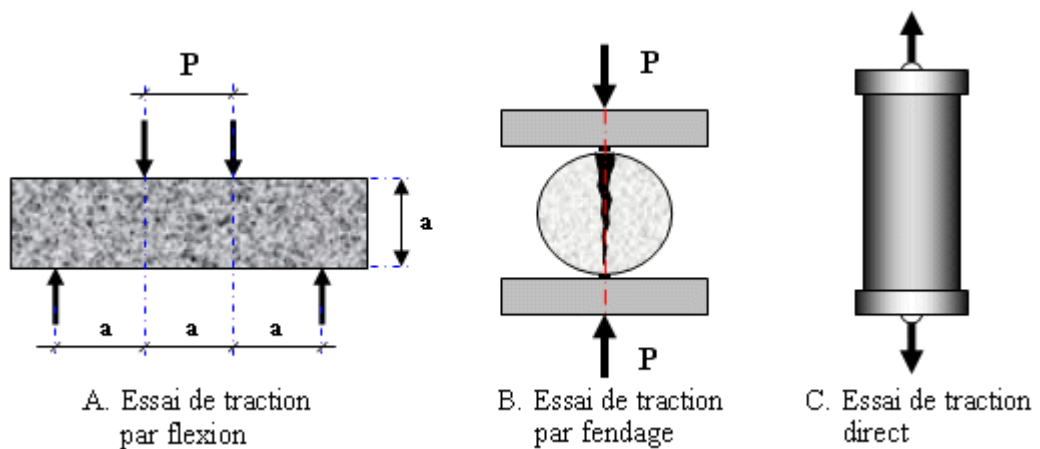


Figure III.2 : Différents essais sur les résistances d'un béton en traction [39].

III.6 Comportement différé du béton

Tous les matériaux, et entre autres le béton, sont, à des degrés divers, viscoélastique. Le facteur temps intervient donc dans leur comportement et dans la formulation de leurs déformations. Il faut donc distinguer les déformations instantanées des déformations différées qui se produisent au cours du temps. Cela est d'autant plus vrai pour le béton dont la résistance s'accroît asymptotiquement avec le temps à mesure que se complète l'hydratation du ciment.

III.6.1 Retrait

Le béton est l'objet de retrait, c'est-à-dire d'une réduction dimensionnelle, en l'absence de chargement, due essentiellement à l'évaporation de l'eau excédentaire interne [61]. On distingue :

Le retrait plastique : créé par la dessiccation de pâte de ciment au début du phénomène d'hydratation ; la cure de béton a pour but de prévenir les effets de ce retrait qui, non contrôlé, peut être à l'origine de fissurations importantes.

Le retrait thermique : dû aux effets des gradients de température qui se manifestent dans le béton lors de la dissipation de la chaleur d'hydratation.

Le retrait à long terme du béton durci : ou retrait proprement dit, dû à l'évaporation de l'eau contenue dans le béton et, à moindre échelle, à la poursuite de l'hydratation du liant, toutes causes qui ont pour effet de réduire l'hygrométrie des pores du béton.

III.6.2 Fluage

Le fluage du béton est ce processus continu de déformation d'un élément sur lequel s'exerce une charge constante ou variable. Il est fonction notamment des caractéristiques de béton, de l'âge lors du chargement, de l'épaisseur de l'élément, de l'hygrométrie de l'environnement et du temps. Le fluage est un phénomène complexe, constaté mais mal compris. Il serait lié à des effets de migration d'eau dans les pores et les capillaires de la matrice.

III.6.3 Corrosion des bétons

✓ **Gonflement dû au sulfate**

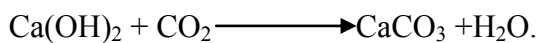
Les eaux souterraines contiennent parfois des sulfates en solution (les eaux séléniteuses contiennent du sulfate de calcium) ; un gonflement peut être occasionné, si la teneur en sulfate atteint une certaine concentration ; l'aluminate tricalcique et le sulfate de calcium se combinent pour donner un trisulfate «étringite» hydraté qui constitue un sel gonflant par suite de fixation d'un grand nombre de molécules d'eau [37].

✓ **Réaction alcali-granulats**

Dans les granulats, certains constituants amorphes et mal cristallisés de la silice (SiO_2) sont sensibles aux alcalis et peuvent en présence d'humidité réagir avec un hydroxyde alcalin provenant du ciment (NaOH , $\text{Ca}(\text{OH})^2$) ; il se forme des silicates alcalins hydratés plus volumineux entraînant la désagrégation du béton en présence d'humidité qui se traduit par des fissurations, du faïençage à mailles plus au moins serrées, des gonflements provoquant des déformations éventuelles parfois très importantes de la structure, des écaillages, des exsudations des cratères superficiels. Ces désordres qui certes n'apparaissent pas tous, peuvent dans certains cas entraîner plus au moins longue échéance la ruine totale de l'ouvrage.

✓ **Carbonatation**

La carbonatation du béton est due à l'action de l'acide carbonique CO_2 (dioxyde de carbone) qui se trouve dans l'atmosphère (en faible quantité environ 0,5%) sur la chaux libérée par l'hydratation des carbonates de calcium CaCO_3 [37].



Cette carbonatation qui progresse dans le béton à partir des faces en contact avec l'atmosphère fait baisser le pH (13 dans le béton non carbonaté) à 11,5 ou 9, neutralisant ainsi progressivement l'alcalinité du béton et son rôle «passivant» sur les armatures qui ne sont plus protégées, se corrodent.

III.7 Différentes types de béton

III.7.1 Béton à haute performance BHP

Ils présentent une résistance caractéristique à la compression à 28 jours (f_{c28}) supérieur à 50 MPa et un rapport pondéral E/C inférieur à 0,40.

Leurs principales propriétés sont :

- Sur le béton frais, une maniabilité accrue.
- Sur le béton durci :
 - une augmentation mécaniques (compression, traction, module d'élasticité) tant aux jeunes âges qu'à terme ;
 - une plus grande imperméabilité à l'air et à l'eau, due à une compacité plus élevée ;
 - une plus grande résistance aux agents agressifs d'où une meilleure durabilité ;
 - une plus grande résistance à l'abrasion ;
 - une meilleure tenue aux cycles de gel/dégel.

III.7.2 Béton du futur

Ils appellent bétons à très hautes performance «BHTP», ou à très hautes résistance, leur résistance caractéristique à la compression dépasse 200MPa. Outre que cette dernière, les autres caractéristique sont améliorées, comme le coefficient d'élasticité, la résistance à l'attraction ou la compacité. Ayant une très faible porosité, leur teneur aux principales agressivités de l'environnement telles que carbonatation, pénétration aux ions chlore, cycle gel/dégel, tenue à l'abrasion, est excellente.

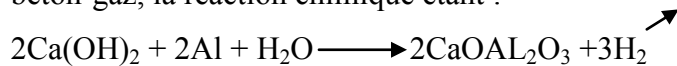
III.7.3 Béton de granulats légers

Dans la construction d'un certain nombre d'ouvrages, une réduction de poids est de nature à entraîner des économies générales. L'emploi de granulats légers permet de réaliser des bétons pour lesquels la densité peut varié de 0,5 à 2,0 mais dont la résistance en compression est d'autant plus faible que la densité est moins élevée. Elle n'est que de 2 à 5MPa pour des bétons de vermiculite de densité 0,5 en moyenne, mais elle peut atteindre 40MPa pour des bétons d'argile ou schiste expansé de densité 1,7 à 1,9 réalisés avec des granulats légers de bonne qualité. Plusieurs ouvrages importants tels que les ponts en béton armé et en béton précontraint, des immeubles, des couvertures en voile mince ont été réalisés avec des bétons légers. Cependant après une période de grande vogue, l'utilisation des bétons légers est assez ralentie surtout limité à des éléments préfabriqués.

III.7.4 Béton cellulaire

Il ne s'agit pas de bétons à proprement parler mais plutôt de mortiers. On rajoute à se dernier :

- Soit une matière génératrice de gaz en présence du ciment (le plus souvent de l'hydrogène), comme par exemple de la poudre d'aluminium, ce qui donne un béton-gaz, la réaction chimique étant :



Ils sont destinés aux produits préfabriqués. A cette sujétion s'ajoute le fait qu'ils sont habituellement traités par étuvage ou autoclavage, ce qui présente l'avantage, en plus de la possibilité d'atteindre rapidement leur résistance, de diminuer dans de grandes proportions les inconvénients dus au retrait.

- Soit un produit moussant à base de savons ou de détersifs qui, en cours de malaxage, provoque une infinité de petites bulles, ce qui donne un béton mousse. Leur utilisation allant du comblement de grands volumes du type comblement de carrière, de puits...

III.7.5 Béton lourds

La fabrication de béton lourds a déjà été, depuis longtemps, envisagée mais l'emploi de ces bétons était très limité (contreponds de certains ponts basculants). Les bétons lourds ne diffèrent essentiellement des bétons classiques sauf par les granulats employés (sable 0/3mm, gravillon 3/7mm, gravier 7/15 et 15/30).

III.7.6 Béton à base de résines

Ces résines sont des produits synthétiques qui présentent, entre autres propriétés, une remarquable adhésivité, en présence d'un catalyseur, elles durcissent plus au moins rapidement par polymérisation (association de molécule identiques engendrant des molécules plus grosses). Ils sont employés comme liants pour confectionner certains bétons. Parmi les résines mieux adaptées, on distingue :

- Les résines polyester : prévenant de l'industrie charbonnière.
- Les résines époxydes : issue de la chimie de pétrole.

Les bétons à base des résines peuvent présenter des résistances élevées en particulier en traction et elles sont atteintes en quelques jours, leur emploi est limité, restent dans le

domaine de laboratoire (petits éléments). Ils présentent aussi un module d'élasticité deux fois plus faible à ceux des bétons de ciment et un fluage du même ordre lorsque la température ne dépasse pas 20°C (huit fois plus important que le béton de ciment).

III 7.7 Béton de fibres

Il y a longtemps que l'on cherche à améliorer la résistance à la traction des béton de ciment (ou de mortier) en y incorporant des fibres résistantes : les plaques de «fibrociment» sont un exemple bien connu de mortier de ciment comprimé et armé de fibres d'amiante qui ont une forte résistance à la traction. Actuellement plusieurs natures de fibres sont utilisées, elles doivent présenter des qualités suivantes :

- Pouvoir adhérer parfaitement à la pâte de ciment ;
- Avoir une bonne résistance à la traction ;
- Ne risquer d'être attaqué par les milieux basiques du ciment ;
- Ne pas se dégrader dans le temps et conserver leurs qualités propres ;
- Ne présenter aucun danger pour la main d'œuvre qui les manipule ;
- Ne pas avoir d'incidence excessive sur le coût du béton.

Quelques fibres incorporées dans le béton :

- En acier, copeaux d'acier ;
- En fibre ductile, leur intérêt, outre une bonne adhérence, de ne pas être corrodables ;
- En fibres de Carbone (coût élevé) ;
- En verre dont la composition chimique est étudiée pour ne pas être attaqués par les alcalins du ciment.

Chapitre IV

Comportement du béton à base de la poudre de verre

IV.1 Première partie : la poudre du verre dans le béton

IV.1.1 Origines du verre recyclé

On distingue deux sources de verre usagé destiné, après traitement, au recyclage dans les fours de verrerie :

- *le verre ménager* issu des collectes sélectives (conteneur verre) et des collectes multi matériaux (poubelle verte) ; cette source représente 85 % du verre recyclé et se caractérise par une composition chimique assez homogène et stable, pour une région donnée, puisqu'il s'agit du mélange de tous les emballages en verre consommés sur un territoire bien défini; par contre ce verre est très pollué par des contaminants minéraux (cailloux, poteries, porcelaine...) et par des contaminants organiques (bois, papiers, plastiques, résidus alimentaires...). La photo ci-dessous montre l'état de ce verre collecté avant traitement.

- *le verre industriel* issu d'activités industrielles utilisant du verre plat ou du verre creux et produisant ponctuellement des rebuts importants, comme les brasseurs ou les entreprises de découpe et de façonnage de verre plat et de verres spéciaux ; ce gisement représente 15 % du verre recyclé, reconnu pour être de bonne qualité car peu contaminé mais de composition chimique variable [40].



Figure IV.1: Calcin brut avant traitement.

IV.1.2 Le verre dans le béton

Le verre subissant un léger concassage peut être utilisé comme granulat dans le béton. Ce traitement a l'avantage de présenter un faible coût. Cependant, l'utilisation de ce sable est susceptible de générer une réaction défavorable pour la structure. Qualifiée de « Cancer des bétons » [41], la réaction alcali-silice est le résultat de la réaction de la silice amorphe d'un granulat avec les ions hydroxyles et alcalins présents dans la solution interstitielle du béton. Cette réaction donne naissance à un gel gonflant provoquant la fissuration du béton et dans certains cas sa destruction. Cette réaction est fortement dépendante non seulement de la quantité et de la solubilité de la silice du granulat, mais également de la quantité d'alcalins potentiellement mobilisable. Or, les verres mixtes de recyclage contiennent environ 13% d'alcalins. Le devenir des alcalins du verre représente donc un problème supplémentaire qui doit être pris en compte car ils sont des activateurs de la réaction alcali-silice. Des études antérieures menées sur le verre ont conclu que le gonflement causé par celui-ci constitue le principal frein à sa valorisation dans les bétons.

Un broyage du verre à une plus grande finesse laisse envisager une utilisation de ce matériau en tant que liant. Dans ce cas, la silice du verre réagit avec la chaux produite par la réaction du ciment, créant ainsi des composés dotés de propriétés liantes : c'est la réaction pouzzolanique .

IV.1.2.1 Réaction pouzzolanique du verre

L'activité pouzzolanique du verre a été évaluée par diverses méthodes : les tests mécaniques sur éprouvettes de mortier et béton à base de ciment ou sur des mortiers à base de chaux, ou encore tests chimiques de consommation de chaux notamment par ; l'essai Chapelle, ATG, DRX.

La Figure IV.2 présente les résultats de quelques travaux effectués entre les années 2000 et 2008 qui traitent de l'activité pouzzolanique du verre. L'indice d'activité est défini comme étant le rapport de la résistance du mélange avec verre à la résistance du mélange témoin [42].

Il a été difficile, voire impossible, de rassembler des travaux tous faits dans des mêmes conditions. Toutefois les conclusions suivantes se dégagent nettement :

1. La taille des grains de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique du verre: plus les grains de verre sont fins, meilleure et son activité pouzzolanique ;
2. La résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leur teneur en verre augmente ;

année de cure, la résistance de ces bétons a pu égaler celle des mélanges confectionnés avec 10% de fumée de silice.

IV.1.2.3 La teneur en verre des mélanges

Excepte BATAYNEH et coll., [2007] [47] et NISHIKAWA et coll., [1995] [48] dont les études ont montré que la résistance augmenterait avec la teneur des mélanges en verre, la plupart des travaux, malgré la variation des conditions de travail, s'accordent à dire que la résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leur teneur en verre augmente. [KOJIMA et coll., 2000; PARK et coll., 2004 ; SHAO et coll., 2000; SHAYAN et coll., 2002 et 2004 ; DYER et coll., 2001 ; CORINALDESI et coll., 2005; SCHWARZ et coll., 2008, SOBOLEV et coll. 2007]. La divergence entre les conclusions des deux écoles doit fort probablement venir du fait que dans le cas du premier groupe, le premier auteur [BATAYNEH et coll., 2007] a travaillé sur des pâtes et le second [NISHIKAWA et coll., 1995] a fait une substitution de sable au lieu de ciment.

IV.1.2.4 La couleur du verre utilisé

Effectivement, différents auteurs ont pu montrer que la couleur du verre, autrement dit la composition chimique du verre, joue un rôle conséquent sur les propriétés mécaniques, notamment les résistances en compressions. Nous pouvons citer à titre d'exemple les travaux de KARAMBERI et coll., [2005] [49] tout comme les travaux de PARK et coll., [2004] [50] et ceux de SOBOLEV et coll. [2007] [51]. Ces auteurs ont travaillé sur deux couleurs de verre ; le verre vert et le verre brun. Leurs résultats ont montré que le verre vert présentait les meilleures performances mécaniques. En plus des deux couleurs précédentes, DYER et coll., [2001] [52] ont utilisé du verre blanc. Ils ont pu montrer que le verre blanc possède les meilleures résistances mécaniques, suivi du verre vert puis du verre brun. Ces auteurs lient cette tendance à la composition chimique des verres. En effet, bien que l'analyse chimique de verres colorés soit semblable, il existe une éminente différence dans leur structure selon le rôle de chaque élément, qu'il soit formateur ou modificateur de réseau.

IV.1.2.5 Utilisation du verre en tant que sable

Comme nous l'avons vu dans le second point, BATAYNEH et coll., [2007] et NISHIKAWA et coll. [1995] ont travaillé avec des substitutions de sable non celle de ciment. Leurs résultats montrent que ce remplacement est bénéfique pour les bétons étant donné le gain de résistance obtenu. Toutefois, ils proposent une étude plus approfondie concernant la réaction alcali-silice et la durabilité de ces bétons, vu la quantité d'alcalins présente dans le verre. SHAYAN et coll. [2002] ont montré que la substitution de 30% de sable par le verre fin donnait de meilleures résistances que des mélanges témoins sans verre ou avec 10% ou 20 et 30% de substitution de ciment par la fumée de silice et le verre respectivement.

IV.1.2.6 La température de cure et l'activation du verre

Comme dans le cas des autres matériaux pouzzolanique tels que la fumée de silice la cendre volante et les laitiers, la température joue un rôle important dans l'activation du verre. En effet, SHI et coll., [2005] ont étudié l'effet de ce paramètre sur l'activité pouzzolanique du verre et d'une cendre volante. Leurs résultats ont montré que l'activation du verre est très sensible à la température. En passant la cure de la température ambiante à 65°C, le gain en résistance en compression était de 80% contre 20% pour la cendre volante. La température de cure accélère l'activité pouzzolanique du verre et semble avoir plus d'influence sur la poudre de verre qu'elle ne l'a sur la cendre volante [KARAMBERI et coll., 2004].

IV.1.2.7 Comparaison de verre à d'autres pouzzolanes

La cinétique de la réaction du verre est plus rapide que celle des cendres volante qui ne réagissent qu'après une à plusieurs semaines, lorsque la concentration des alcalins dans la solution interstitielle est devenue suffisante: en effet, dans le cas du verre, celui apporte lui-même les alcalins nécessaire au déclenchement de la réaction. Par exemple, SHAO et coll., [2000] ont montré qu'avec 30% de remplacement les bétons ont affiché une meilleure résistance en compression que ceux confectionnés avec de la cendre volante.

Les travaux de SHI et coll., [2005], viennent confirmer également cette tendance. Ces auteurs ont montré qu'à 3 jours de cure, la résistance des mortiers comportant 20% de verre en remplacement de ciment est 70% plus importante que celle de mortiers confectionnés avec de la cendre volante. Cela pourrait s'expliquer notamment par les alcalins qui sont disponibles plus rapidement et en plus grand nombre dans le cas du verre qu'ils ne le sont dans celui de la cendre volante.

IV.1.2.8 L'utilisation simultanée de verre et de pouzzolanes

Concernant ce point, plusieurs études en laboratoire ont été conduites. L'utilisation simultanée d'un verre et d'une pouzzolane notamment la fumée de silice, la cendre volante ou même le metakaolin en remplacement d'une fraction du ciment pourrait conduire à des synergies intéressantes. Ainsi l'utilisation du verre serait plus intéressante que son emploi individuel [MEYER et coll., 1997; JIN et coll., 2000; SHAYAN et coll., 2004] [53].

IV.1.3 Propriétés physico-mécanique

Les déchets de verre contiennent une haute teneur en silice (SiO_2 , 72%). Ils sont utilisés comme poudre très fine (600 microns) qui réagit avec des alcalis dans le ciment (réaction pouzzolanique) et forment un produit cimentaire qui aide à contribuer au développement de la résistance et la durabilité. Ce qui manipule plusieurs chercheurs à faire des études expérimentales sur l'utilisation de poudre de verre pour remplacer partiellement le ciment pour déterminer les propriétés et le comportement du béton.

M. N. Bajad, C. D. Modhera et A. K. Desai [54] ont cherché sur la question. Ces derniers ont travaillé sur neuf mélanges différents (M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9) ont été préparés en utilisant du ciment remplacé par de la poudre verre à des pourcentages variant de 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 et 40%. En plus, pour connaître l'effet de l'eau, les échantillons ont été immergés dans une solution H_2O de 100% (de l'eau) pour 7, 28, et 90 jours. Aussi, pour connaître l'effet de l'attaque des sulfates [55], les échantillons ont été immergés dans une solution de sulfate de magnésium (MgSO_4 , cinq grammes de sulfate de magnésium dissous dans 100 ml de solution) 5% pour 7, 28 et 90 jours.

Les résultats des essais sont présentés graphiquement et sous formes de tableaux qu'ont été examinées sous différentes catégories.

IV.1.3.1 Maniabilité

Le tableau IV.1 et la figure IV.3 montrent les résultats de la maniabilité du béton avec remplacement du ciment par de la poudre de verre en différents pourcentages allant de 5% à 40% par incréments de 5% (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25 %, 30%, 35% et 40%). Il semble que la maniabilité du béton diminue à mesure que la teneur en verre augmente.

Désignation de mélanges	Pourcentage de remplacement du ciment par la poudre de verre	Slump (affaissement) (mm)	Pourcentage d'augmentation ou de diminution par rapport au mélange de référence
M1	0(Ref.mix)	100	-----
M2	05	94	-6
M3	10	91	-9
M4	15	88	-12
M5	20	82	-18
M6	25	76	-24
M7	30	73	-27
M8	35	72	-28
M9	40	66	-34

Tableau IV.1: Affaissement du béton avec remplacement du ciment par de la poudre de verre[54].

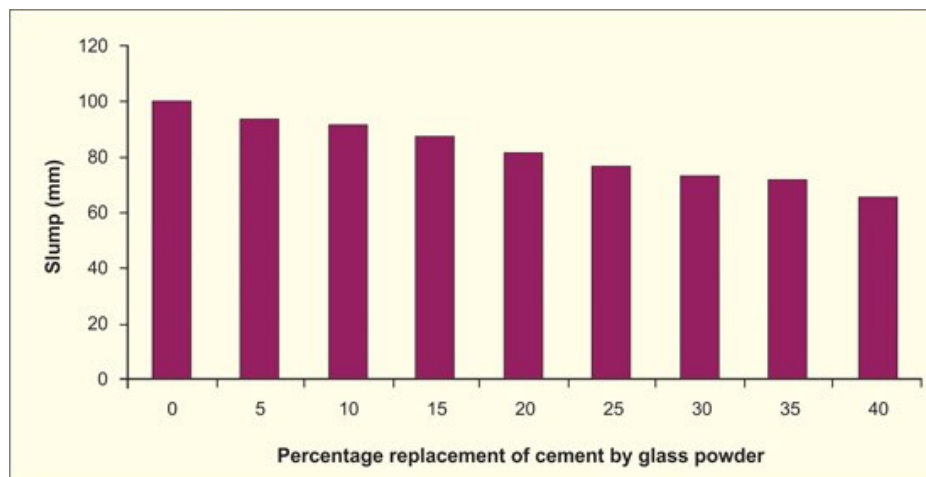


Figure IV.3 : Affaissement du béton avec remplacement du ciment par de la poudre de verre[54].

IV.1.3.2 Densité

Le tableau IV.2 et la figure IV.4 montrent les résultats de la densité du béton à 28 jours, avec remplacement du ciment par la poudre de verre en différents pourcentages. Il semble que l'unité de poids du béton diminue à mesure que la teneur en verre augmente.

Désignation de mélange	Pourcentage de remplacement du ciment par de la poudre de verre	Densité (à 28 jours en kg / m ³)	Diminution en pourcentage de la densité par rapport au mélange de référence
M1	0(Ref.Mix)	2408	-----
M2	05	2396	0.49
M3	10	2379	1.2
M4	15	2369	1.61
M5	20	2354	2.24
M6	25	2335	3.03
M7	30	2315	3.86
M8	35	2303	4.36
M9	40	2283	5.19

Tableau IV.2: Variation de la masse volumique du béton de ciment avec remplacement par de la poudre de verre[54].

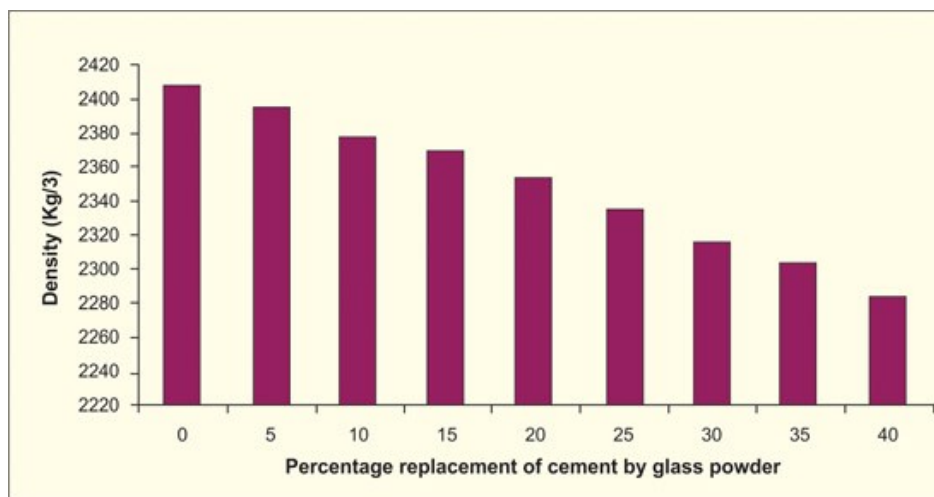


Figure IV.4: Variation de la masse volumique du béton de ciment avec remplacement par de la poudre de verre[54].

IV.1.3.3 Résistance à la compression

Comme prévu, la résistance à la compression augmente avec la durée de durcissement, comme indiqué dans les tableaux IV.3, 4 et les figures IV.5, 6. Ainsi que, ils montrent les résultats de résistance à la compression avec et sans soumettre aux attaques des sulfates avec remplacement du ciment par la poudre de verre pour 7 jours, 28 jours et 90 jours [56].

Âge(jours)	Résistance à la compression, MPa								
	0% GP	5% GP	10% GP	15% GP	20% GP	25% GP	30% GP	35% GP	40% GP
7	21.05	22.28	23.27	24.86	27.30	23.72	17.62	16.04	12.93
28	27.05	28.58	29.77	31.56	33.50	30.52	24.22	22.44	19.03
90	27.33	28.87	30.08	31.85	33.86	30.82	24.44	22.72	19.25

Tableau IV.3: Résultats globaux de développement de résistance à la compression dans le béton sans le soumettre à l'attaque du sulfate avec l'âge[54].

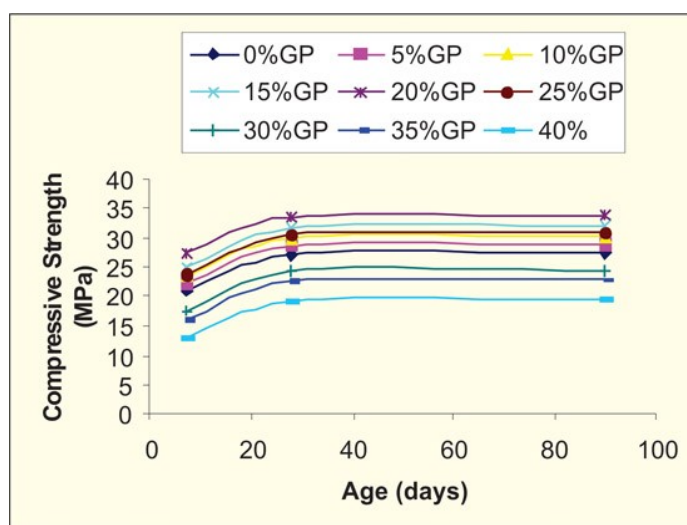


Figure IV.5: Variation du développement de la résistance à la compression dans le béton sans soumettre à l'attaque du chlorure avec l'âge[54].

Âge(jours)	Résistance à la compression, MPa								
	0% GP	5% GP	10% GP	15% GP	20% GP	25% GP	30% GP	35% GP	40% GP
7	20.62	21.83	22.57	24.36	26.75	23.00	17.09	15.71	12.67
28	25.45	27.15	28.10	30.00	31.85	29.01	23.20	21.55	18.25
90	22.80	24.22	25.65	27.18	28.86	26.30	21.60	19.70	16.88

Tableau IV.4: Résultats globaux de développement de résistance à la compression du béton soumis aux attaques des sulfates avec l'âge[54].

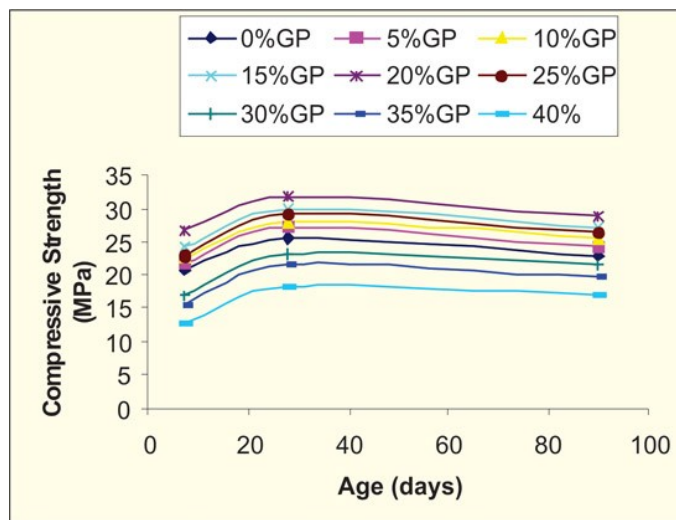


Figure IV.6: Variation du développement de la résistance à la compression du béton soumis aux attaques des sulfates avec l'âge[54].

Remarque :

L'attaque du sulfate réduit la résistance à la compression du béton entre 2 à 4% en 7 jours, 3 à 6% en 28 jours et 11 à 17% en 90 jours. La résistance à la compression du béton avec 20% de remplacement du ciment par la poudre de verre dans l'essai d'attaque de sulfate montre une valeur supérieure de 30%, 25%, 27% par rapport au témoin béton pendant 7 jours, 28 jours et 90 jours respectivement.

IV.1.3.4 Résistance à la flexion

Les résultats montrent une variation de résistance à la flexion du béton avec remplacement du ciment par la poudre de verre à 7, 28 et 90 jours. Il apparaît que la résistance à la flexion du béton avec 20% de remplacement du ciment par la poudre de verre a montré une valeur supérieure de 22%, 20%, 17% par rapport au béton contrôlé pendant 7 jours, 28 jours et 90 jours respectivement [57].

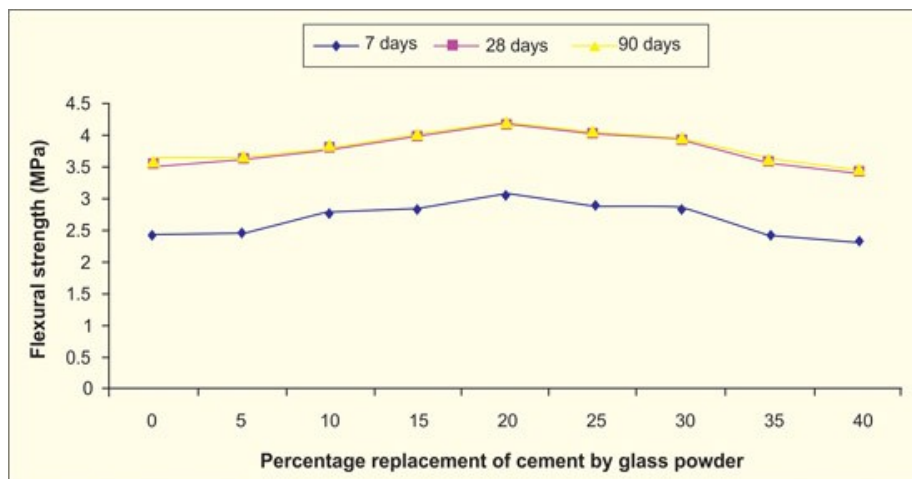


Figure IV.7: variation de résistance à la flexion du béton avec remplacement du ciment par la poudre de verre pour 7, 28 et 90 jours[54].

Age (jours)	Résistance à la flexion, MPa									
	0% GP	5% GP	10% GP	15% GP	20% GP	25% GP	30% GP	35% GP	40% GP	
7	2.40	2.45	2.78	2.85	3.05	2.90	2.82	2.42	2.32	
28	3.50	3.62	3.78	3.95	4.17	4.00	3.90	3.57	3.41	
90	3.60	3.64	3.82	4.00	4.21	4.05	3.92	3.60	3.45	

Tableau IV.5: Les résultats globaux de développement de résistance à la flexion dans le béton avec l'âge [54].

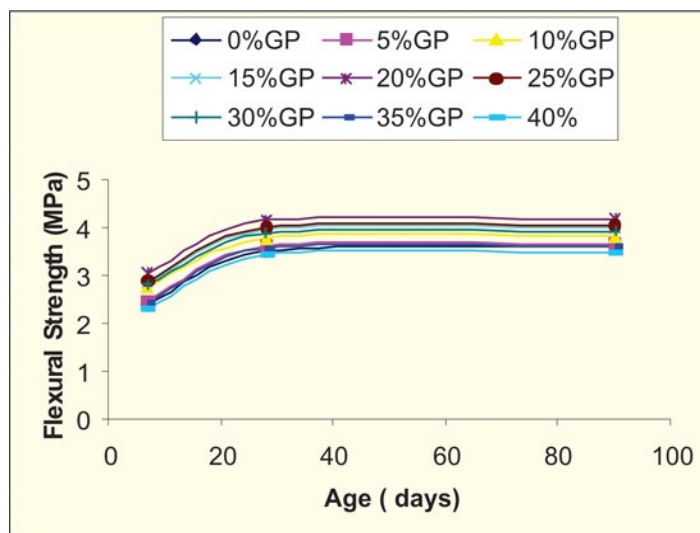


Figure IV.8: Variation de développement de la résistance à la flexion dans le béton avec l'âge[54].

Remarques et interprétations

Ouvrabilité diminue à mesure que la teneur en verre augmente (c'est à dire la teneur en ciment est diminuée) en raison de la réduction du module de finesse d'un matériau au ciment, moins la quantité de pâte de ciment est disponible pour fournir effet lubrifiant (diminuer le frottement) par unité de surface de l'agrégat, et par conséquent la mobilité de l'agrégat est retenue [58].

Poids unitaire de béton (densité) sans poudre de verre est supérieur à cette dernière. Une telle différence est attributive au fait que la densité des déchets de verre-à-dire 2,58 est nettement inférieure à la gravité spécifique de 3,15 à savoir ciment.

Une tendance à l'augmentation de la résistance a été observée avec l'augmentation de remplacement du ciment en poudre de verre jusqu'à 20%. La plus forte augmentation en pourcentage de la résistance à la compression environ 30% et la résistance à la flexion était d'environ 22% au niveau de remplacement de 20%. Lorsque le niveau de remplacement du ciment a été augmenté au-delà de 20%, la résistance à la compression réduite.

L'augmentation de la résistance jusqu'à 20% de remplacement du ciment par la poudre de verre peut être due à la réaction pouzzolanique de cette dernière [55]. Les déchets de verre sont en une poudre très fine, ce qu'implique que la silice (SiO_2) réagit chimiquement avec des alcalis dans le ciment et forment un produit cimentaire qui aide à contribuer au développement de la force. En outre, il peut être dû à la poudre de verre, remplissant efficacement les vides et donnant lieu à une microstructure dense au béton, par la suite la poudre de déchets de verre offre une résistance contre les forces d'expansion causée par la pénétration de sulfates et les ions de sulfates dans la masse de béton[59]. Cependant, au-delà de 20%, l'effet de dilution prend le dessus et la force commence à baisser. Ainsi, on peut conclure que 20% a été le niveau optimal pour le remplacement du ciment avec de la poudre de verre.

L'amélioration de la résistance à un âge précoce de durcissement a été lente en raison de l'effet de remplissage des pores. La poudre de verre des déchets (PV) initialement agit comme un bouche-pores et seulement plus tard, après 7-10 jours, son hydratation, dégage suffisamment de chaux pour le démarrage de la réaction secondaire. La réaction pouzzolanique forme plus de quantité de gel C-S-H [60].

IV.2 Deuxième partie : La poudre de verre dans le béton armé

L'introduction de la poudre de verre dans le béton est plutôt nouvelle dans le domaine de la recherche et il y a peu d'essais effectués sur l'élément structural directement. **Arame Niang, Nathalie Roy, Arezki Tagnit-Hamou et Karim Bengougam** ont menés des recherches sur l'incorporation de la poudre de verre dans la fabrication du béton pour la confection d'éléments structuraux tels que les poteaux en béton armé [6].

Le but de cette étude réalisée par ces auteurs est de s'assurer que ces bétons rencontrent les critères de performance requis pour les applications structurales. Trois séries de six poteaux ont été testés sous compression uniaxiale. Les variables de l'étude sont la géométrie (section circulaire et carré), la configuration des étriers, les quantités d'armature longitudinale et transversale et le type de béton. Une série de six poteaux confectionnés avec les bétons de rapport $E/L = 0,40$ ont été testés à 28 jours. Les deux autres séries de six poteaux confectionnés avec les bétons de rapport $E/L = 0,55$ ont été testés à 28 et 91 jours respectivement. Pour chaque série, trois poteaux sont fabriqués de béton contenant 20% de PV en remplacement de la masse du ciment et les trois autres de béton contenant 0% de PV.

IV.2.1 Résumé de l'expérience

Les essais de compression sur poteau ont été effectués à l'aide d'une presse hydraulique rigide d'une capacité 11414 kN. Les déformations axiales des poteaux sont mesurées à l'aide de potentiomètres sur des longueurs de mesure de 400 et 600 mm (voir figure 1). Les déformations des barres d'acier sont mesurées à l'aide des jauges de déformation placées au niveau des barres longitudinales à mi-hauteur, des étriers intérieurs et extérieurs situés à égale distance de part et d'autre du centre du poteau. Pour chaque étrier, les jauges sont collées sur deux côtés consécutifs.

Durant les essais, le déplacement axial et la déformation transversale des colonnes ont été les paramètres de base à mesurer. Pour assurer une rupture au centre du poteau, les poteaux ont été élargis au niveau des extrémités où des collets métalliques ont été installés afin de représenter le confinement à la connexion poteau-poutre d'une construction réelle [6].



Figure IV.9: Dispositif expérimental des essais sur poteaux [6].

IV.2.2 Les résultats

IV.2.2.1 Résistance en compression

✓ **Cure en chambre humide :** les résultats (voir Figure 2) des essais de compression des différents bétons utilisés dans ce projet. Ces essais ont été effectués sur des cylindres de béton mûris dans la chambre de mûrissement (humidité relative de 100% avec une température de 23°C). Les résultats montrent que, pour un même rapport $E/L = 0,40$ et $E/L = 0,55$, le béton avec 0 % de poudre de verre présente une meilleure résistance à la compression que le béton avec 20 % à jeune âge jusqu'à 28 jours. Entre 28 et 91 jours, on note une augmentation progressive de la résistance du béton avec 20 % de poudre de verre qui devient supérieure ou presque égale à celle des bétons avec 0 %. La faible valeur de la résistance en compression à jeune âge des bétons avec poudre de verre est, comme pour les autres ajouts cimentaires, due à la lenteur de la réaction pouzzolanique[6].

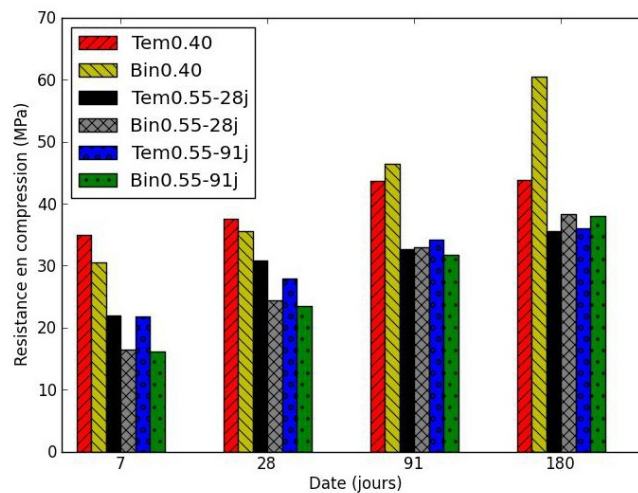


Figure IV.10: La résistance en compression des différents bétons utilisés (Cure en chambre humide) [6].

✓ **7 jours de cure sous jute humide et puis à l'air jusqu'au jour de l'essai :**
Pour les mêmes conditions de cure que les poteaux, la résistance en compression des bétons est quasi la même soit 42,2 MPa pour le béton avec 0 % de PV et 41,8 MPa pour le béton avec 20 % de PV avec un $E/L = 0,40$. Contrairement aux bétons de rapport $E/L = 0,40$, la résistance en compression du béton avec PV, pour un rapport $E/L = 0,55$ ayant servi à la confection des poteaux testé à 28 j, qui est égale à 27 MPa est plus faible que celle du béton témoin qui est de 31,2 MPa. Pour les bétons de rapport $E/L = 0,55$ ayant servi à la confection des poteaux testé à 91 j, la résistance en compression des bétons est de 34,1 MPa pour le béton témoin et 27,4 MPa pour le béton fabriqué avec de la PV en remplacement de la masse du ciment. Dans des conditions de mûrissement parfaites (*mûrissement dans la chambre humide*), la résistance en compression à 91 jours est de 34,2 MPa pour le béton témoin et 31,7 MPa pour le béton avec PV.

Tagnit-Hamou et al (2012), Shayan et al (2006), Schwarz et al (2007) ont remarqué que l'ajout de PV entraîne une perte de la résistance à jeune âge, mais augmente progressivement jusqu'à dépasser son témoin équivalent à des âges plus avancés.

IV.2.2.2 Perméabilité aux ions chlore

Les résultats obtenus montrent que l'ajout de la poudre de verre en remplacement de la masse du ciment réduit de manière significative la perméabilité aux ions chlore du béton. Le béton avec PV présente une meilleure résistance à la pénétration des ions chlorures que son témoin équivalent.

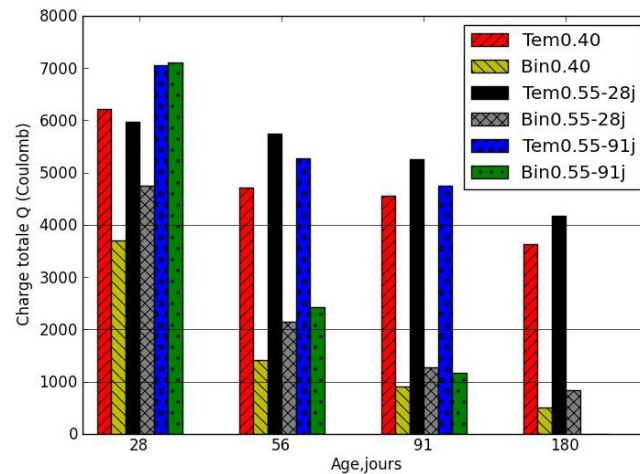


Figure IV.11: Perméabilité aux ions chlore des différents bétons [6].

IV.2.3 Comportement des poteaux et analyse des résultats

Ces travaux de recherche menés par **Arezki Tagnit-Hamou** et son équipe ont permis de mettre en évidence structural des bétons incorporant 20% de poudre du verre pour le rapport $E/L=0,40$ testés à 28 jours et pour $E/L=0,55$ testés à 28 jours ainsi qu'à 91 [6].

D'après les résultats obtenus et recueillis par le potentiomètre de longueur de mesure 400 et 600 mm (figure IV.12a, IV.12b, IV.13) ils ont montré que :

- L'écart entre les courbes au niveau du pic et à la partie descendante pourrait s'expliquer par une différence de propagation des fissures dans les bétons ainsi que la différence de perte de l'enrobage.
- L'écart entre les charges à la première perte de l'enrobage plus élevé au niveau des poteaux de figure IV.12, configuration C, pourrait être dû à un problème de mise en place du béton.
- En comparant les résultats obtenus avec les poteaux pour un rapport $E/L = 0,55$, une diminution de l'écart entre les charges axiales est notée selon la date d'essai mais les bétons avec 0% de PV demeure plus performants. Cette amélioration de la performance des bétons pourrait être due à l'hydratation progressive de la PV avec le temps.
- Pour le béton avec 0 % de PV les résistances sont plus élevées à jeune âge jusqu'à 28 jours que celles du béton avec 20 % de PV. Au delà de 28 jours, une augmentation graduelle des résistances du béton avec 20 % de PV est notée. À 91 jours, pour les spécimens ayant subi la

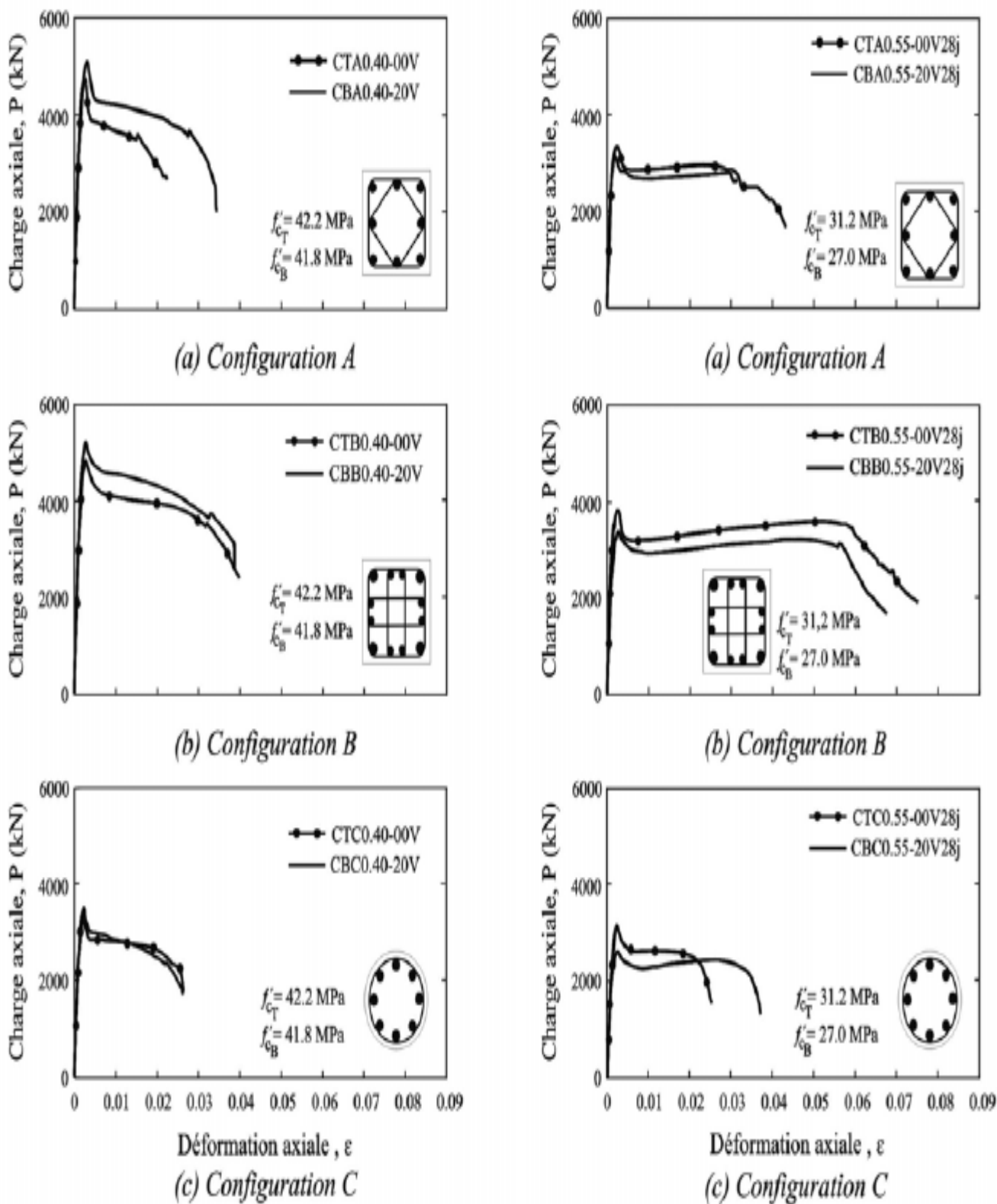
cure en chambre humide, le même rapport $E/L = 0,40$ ou $0,55$, la résistance en compression du béton avec 20 % de PV en remplacement de la masse du ciment est plus élevée que celle du béton avec 0 % de PV pour $E/L = 0,40$ tandis qu'elles sont quasi identiques pour les bétons de $E/L = 0,55$.

- Pour $E/L = 0,40$, les cylindres avec et sans PV, ayant subi la même cure que les poteaux, montrent relativement la même résistance en compression à la date d'essais des poteaux (28 jours). Pour $E/L = 0,55$, la résistance en compression des cylindres incorporant la PV, ayant subi la même cure que les poteaux, est inférieure à celle des cylindres avec 0% de PV. La faible valeur de la résistance en compression des cylindres avec PV peut être attribuée à l'augmentation du rapport eau/ciment (E/C) qui résulte à une baisse de la quantité d'éléments réactifs.

-Par ailleurs, les bétons qui ont servi à la confection des poteaux testés à 28 j pour $E/L = 0,55$, la différence entre les résistances mesurées sur les cylindres ayant subi la même cure que les poteaux pour tous les rapports E/L peut être en partie attribuée à l'influence de la cure.

- Les poteaux confectionnés avec le béton contenant 20% de PV en remplacement du ciment de $E/L = 0,40$ restent plus performants que les poteaux fabriqués avec le béton incorporant 0% de PV. La capacité est plus élevée au niveau des poteaux dont le béton contient 20% de PV selon les configurations A, B et C respectivement. L'apparition des premières fissures et la première perte d'enrobage surviennent plus tardivement au niveau des poteaux dont le béton contient de la PV. La résistance en compression des poteaux étant quasi les mêmes, alors pour une même configuration des étriers cette différence de performance pourrait être attribué à la densité de la pâte du béton incorporant la poudre de verre.

- Les résultats obtenus montrent que le béton avec poudre de verre présente un bon comportement structural. Les bétons avec PV présente une ductilité supérieure où quasi semblable à ceux sans PV pour $E/L = 0,40$. Pour $E/L = 0,55$, la ductilité des bétons avec PV est quasi semblable où inférieure à ceux des bétons avec 0% de PV. Cependant, l'influence de la cure sur ces bétons devrait être étudiée.



(a)

(b)

Figure IV.12 : Courbe charge axiale sur poteau en fonction de la déformation axiale : (a) ($E/L = 0,40$, testés à 28 j), (b) ($E/L = 0,55$, testés à 28 j) [6].

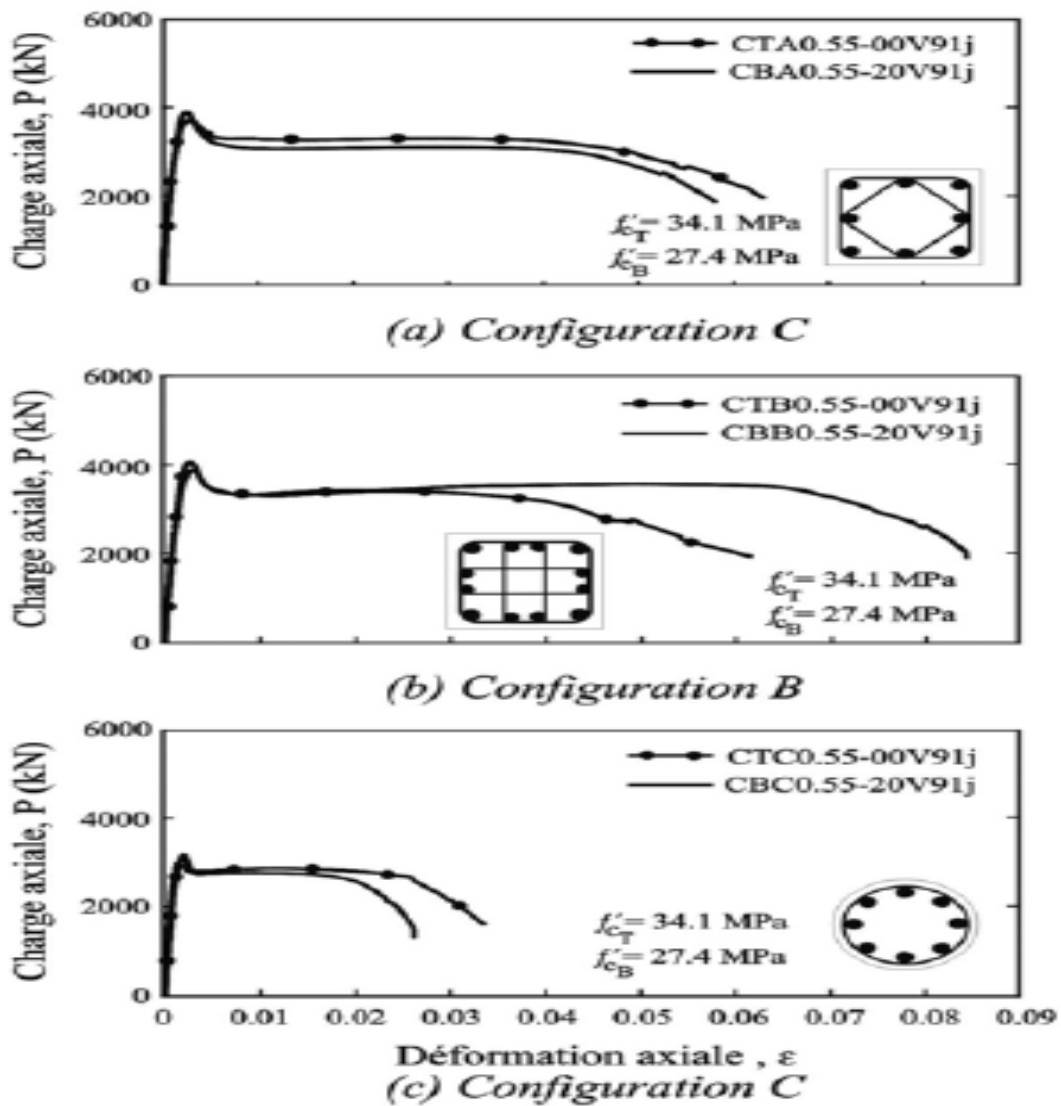


Figure IV.13 : Courbe de la charge axiale sur poteau en fonction de la déformation axiale : (E/L= 0,55, testés à 91 j) [6].

L'ajout de la poudre de verre améliore de manière significative les propriétés du béton. La résistance du béton avec la poudre de verre augmente progressivement jusqu'à égaler ou même dépasser celle de son témoin équivalent. La faible valeur de la résistance en compression à jeune âge des bétons avec la poudre de verre est, comme pour les autres ajouts cimentaires, due à la lenteur de la réaction pouzzolanique.

Les valeurs de la perméabilité de ce béton diminuent rapidement et sont de loin plus faible que celles de leur témoin équivalent.

Les bétons avec la poudre de verre présentent un bon comportement structural. Pour une même configuration des étriers et une même géométrie des poteaux, les bétons avec la poudre de verre présentent le même comportement élastique et une ductilité quasi semblable à celui de son témoin. Les bétons avec 20% de remplacement de ciment par la poudre de verre pour un rapport $E/L=0,40$ pourrait éventuellement être utilisé dans la confection d'ouvrage d'art. Ces bétons présentent une meilleure performance comparés à leur témoin équivalent et une très bonne imperméabilité aux ions chlorures.

Bibliographie

- [1]. **ZAROUB HAMID** ; valoresation du verre dans l'élaboration de béton durable "Approche expérimentale" 15-02-2012, université M'hamed Bouguera, Boumerdés.
- [2]. **RACHIDA IDIR, Martin CYR Arezki TAGNIT-HAMOU Formulation**, Peut-on valoriser massivement le verre dans les bétons?. Etude des propriétés des bétons de verre. vol.16 n°5/6 • Décembre 2010.
- [3]. **SEKA SIMPLICE KOUASSI** ; "Etude de la dissolution d'un réseau silicaté en présence d'une solution alcaline", Thèse N° 102 – 2010, UNIVERSITE DE COCODY-ABIDJAN, Le 20 janvier 2011.
- [4]. **PIKE, R.G., HUBBARD, D. et NEWMAN, E.S.** Binary silicate glasses in the study of alkali-aggregate reaction, Highway Research Board Bulletin, n°275, 1960.
- [5]. **M BEHIM ET T ALI BOUCETTA**, Effet des additions micronisées sur l'écoulement des bétons autoplaçants (laitier de haut fourneau, filler calcaire et poudre de verre, October 12-14, 2009.
- [6]. **ARAME NIANG, NATHALIE ROY, AREZKI TAGNIT-HAMOU et KARIM BENGOUGAM**, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, comportement en compression de poteaux en béton armé incorporant de la poudre de verre.
- [7]. **Dr. GHOMARI Fouad** ; Université Aboubekr Belkaid ; Faculté Des Sciences de L'ingénieur Département de Génie Civil ; Science des Matériaux de Construction.
- [8]. **ZACHARIASEN, W. H.**, Journal of Am. Chem. Soc., 54, 3841 (1932).
- [9]. **ASHBY, M.F. et JONES, M.F.** (1996). Matériaux- propriétés et applications, Paris, 2e édition, Dunod, p.47.
- [10]. **ZARZYCKI, J.** (1962). A direct electron microscope study of the structure of glass, Physics and chemistry of Glasses, vol.3, p.163-166
- [11]. **SCHOLZE, H.** (1980). Le verre, nature, structure et propriétés ; institut du verre, Paris 1980.

- [12]. **R.K. Iler**, in: The Chemistry of Silica, edited by John Wiley and Sons, New York, 1979.
- [13]. **Rachida IDIR** ; ‘‘Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique’’, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, p.58-59. Le 10 juillet 2009.
- [14]. **VARGIN, V.V et YAKOVLEVA, K.A.** (1961). Effects of water and acid on vitreous sodium alumino-silicates, Journal of applied chemistry, vol. 34, p. 446-447
- [15]. **WIKIPEDIA**, Verre, [en ligne], <http://fr.wikipedia.org/wiki/Verre>.
- [16]. **A. Paul**, "Chemistry of Glasses". Ed. Chapman and Hall, New York, (1982).
- [17]. **J. Zarzycki**, "Les verres et l'état vitreux", edition masson, 1982.
- [18]. **G.W MacLellan, E.B. Shand**, Glass engineering handbook, Mc Graw-Hill, New york, 1984.
- [19]. **C. Cailleteau**, On the effect of glass composition in the dissolution of glasses by water, Journal of Non-Crystalline Solids, 354, 2008, p. 117-123.
- [20]. **A.A. Ahmed et I.M. Yousof**, attack on soda-lime-silica glass bottles by acetic, citric and oxalic acids, Glastech. Ber. Glass Sci. Technol., 70, 1997, p. 76-85.
- [21]. **J. Barton et C. Guillemet**, LE VERRE, science et technologie, EDP sciences, juin 2005.
- [22]. **K. G. Nickel et S. Merkel**, Mechanisms and kinetics of silica-rich binary Na₂O-SiO₂ glass corrosion in 100°C water at pH=7, Key Engineering Materials, 336-338, 2007, p 1823-1826.
- [23]. **B. M. J. Smets**, On the mechanism of the corrosion of glass by water, Philips Tech. Rev., 42, 1985, p. 59-64.
- [24]. **Y. Niibori, M. Kunita**, Dissolution rate of amorphous silica in high alkaline solution, Journal of Nuclear Science and Technology, 37, 2000, p. 349-357.
- [25]. **H. Mori**, « Extraction of silicon dioxide from waste colored glasses by alkali fusion using sodium hydroxyde » J. Cer. Soc. Jap., 111, 2003, p.376-381.
- [26]. **A. Satoh**, Water glass bonding, Sensors and Actuators A, 72, 1999, p.160-168.
- [27]. **WIKIPEDIA**, béton, [en ligne], <http://fr.wikipedia.org/wiki/béton>.

- [28]. **Gunning.J.G**, "concret technology :level 4" Longman technician série ; const & civil, england, p 293,1983.
- [29]. **George Dreux et Jean Festa**, "Nouveau guide du béton et de ses constituant" ; édition Eyrolle 2002.
- [30]. **Emile Olivier**, "technologie des materiaux de construction" ; techniciens de la construction (tome 1) ; entreprise moderne d'édition, 1978.
- [31]. **M.Rissel Khelifa**, "effet de l'attaque sulfacique externe sur la durabilité des béton auto-plaçans", these de doctorat,2009.
- [32]. **P.C.Aitcin**, "l'emploi des fluidifiants dans les BHP, les béton à ultr haut performance", presse de l'ENPC.
- [33]. **A .M.Paillerie**, "les adjuvants", le béton hydraulique presse de ENPC 1982.
- [34]. **D.L.Contro**, "influence des superes plastifiants réducteurs d'eau sur les propriétés de la pate de ciment-un slump test miniature", cement and concrete aggregate,vol.2,pp 95-102,1980.
- [35]. **A.R . Kara**, "influence des addition minirales sur le besoin en eau et les resistances mécaniques des milanges cimentaires ",ThD,U Cergy Ponitoise ,décembre 2002.
- [36]. **A.M.Nevile**, "Propriétés des bétons, Edition Eyrolle 2000".
- [37]. **George dreux**, "composition des béton" techniques de l'ingeneieur : 10 Mai 1982.
- [38]. **Jean Perchate**, "Traité béton de béton armé selon l'Eurocode 2" :2^e édition, juillet 2013.
- [39]. **Agence Universitaire De La Francophonie** ; Cours en ligne: Matériaux de Construction : Chapitre 6: Le béton.
- [40]. **Gérard Pajean** ; Recyclage du verre ; Verre VOL.14 N°1 • FÉVRIER 2008.
- [41]. **M. N. Bajad**, Research Scholar, S.V.N.I.T, Surat, **C. D. Modhera**, Professor, S.V.N.I.T, Surat and **A. K. Desai**, Associate Professor, S.V.N.I.T, Surat." Resistance of Concrete Containing Waste Glass Powder Against M_gSO_4 Attack".
- [42]. **Rachida IDIR** ; "Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique", UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, p.34-35. Le 10 juillet 2009.

- [43]. **SHAO, Y., LEFORT, T., MORAS, et S. RODRIGUEZ, D. (2000)**: Studies on concrete containing ground waste glass, *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n° 1, p. 9100.
- [44]. **CHEN, C.H., HUANG, R. WU, J.K et YANG, C.C. (2006)**. Waste E-glass particles used in cementitious mixtures, *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n°3, p.449-456.
- [45]. **SHI, C., WU, Y. et RIEFLERB, C. et WANG, H. (2005)**. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, *Cement and Concrete Research*, vol.35, n° 5, p. 987- 993.
- [46]. **SHAYAN, A. et XU, A. (2002)**. Value-added utilisation of waste glass in concrete, IABSE symposium, Melbourne, p.1-11.
- [47]. **BATAYNEH, M., MARIE, I. et ASI, I. (2007)**. Use of selected waste materials in concrete mixes, *Waste Management*, vol. 27, n°.12, p.1870-1876.
- [48]. **NISHIKAWA, T., TAKATSU, M. et DAIMON, M. (1995)**. Fracture behavior of hardened cement paste incorporating mineral additions, *Cement and concrete research*, vol.25, n°6, p.1218-1224.
- [49]. **KARAMBERI, A., KERINIS, M. et MOUTSATSOU, A. (2004)**. Innovative reuse of glass cullet in cement products, A. Source: *Proceedings of the International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling: Glass Waste*, p.133-140.
- [50]. **PARK, S. B., LEE, B. C. et KIM J H. (2004)**. Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate, *Cement and Concrete Research* vol. 34, n° 12, p. 2181–2189.
- [51]. **SOBOLEV, K., TURKER, P., SOBOLEVA, S. et ISCIOGLU, G. (2007)**. Utilization of waste glass in ECO-cement: Strength properties and microstructural observations, *Waste Management*, vol. 27, p.971-976.
- [52]. **DYER, T. D. et DHIR, R. K. (2001)**. Chemical reactions of glass cullet used as cement component, *journal of materials in civil engineering* , novembre/decembre, p.412-417.
- [53]. **MEYER, C. et BAXTER, S. (1997)**. Use of Recycled Glass for Concrete Masonry Blocks Final Report 97-15, Albany, New York: New York State Energy Research and Development Authority.
- [54]. **M. N. Bajad**, Research Scholar, S.V.N.I.T, Surat, **C. D. Modhera**, Professor, S.V.N.I.T, Surat and **A. K. Desai**, Associate Professor, S.V.N.I.T, Surat.” Resistance of Concrete Containing Waste Glass Powder Against M_gSO_4 Attack.
- [55]. **Guerrero A.,Hernandez M.S. and Goni,S, (2000)** "The role of the fly ash pozzolanic activity in Simulated Sulphate radioactive liquid waste." *Waste Management*, 20, pp51-58.
- [56]. Method of making, curing and determining compressive strength cures concrete test specimens, IS 9013:1978, Bureau of Indian Standards, New Delhi.

- [57]. Specification for apparatus for flexural testing of concrete, IS 9399: 1979, Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- [58]. **Her-Yung Wang**, (2009), "A Study of the effects of LCD glass sand on the properties of concrete," *Waste Management*, 29, pp335-341.
- [59]. **Nathan Schwarz, Hieu cam and Narayanan Neithallath**, (2008), "Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash," *Cement and Concrete Composites*, 30, pp486-496.
- [60]. **Rachida Idir, Martin Cyr and Arezki Tagnit-Hamou.**, (2010), "Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars," *Construction and Building Materials*, 24, pp1309-131.
- [61]. **Encyclopedia Universalis**; <http://brindescience.pagesperso-orange.fr/beton.htm>: le béton le 15/4/2015

Résumé

L'utilisation du verre broyé en substitution partielle du ciment dans le béton est relativement récente. La finesse de la poudre de verre revêt une importance capitale dans son comportement et susceptible d'influencer ses effets sur les principales propriétés du béton. Cet ouvrage démontre l'optimisation de la finesse de la poudre de verre ainsi que son taux d'incorporation dans les systèmes cimentaires. Et fait voir l'étude bien élaborée qui s'attarde sur le comportement de la poudre de verre dans des systèmes cimentaires binaires tels que les coulis, les mortiers et les bétons tout en rapportant ses effets sur les principales propriétés à l'état frais, durci et la durabilité de ces systèmes. La poudre de verre de finesse similaire à celle du ciment portland améliore l'ouvrabilité des bétons et les propriétés mécaniques à long terme, recèle un potentiel pouzzolanique intéressant, atténue l'expansion due à la Réaction alcali-silice, réduit de façon spectaculaire la pénétrabilité des ions chlore des bétons et corrélativement il s'en suit une amélioration de leurs résistances à la pénétration des agents extérieurs potentiellement agressifs. En outre, il montre l'étude innovatrice portant sur le comportement en compression de poteaux en béton armé incorporant de la poudre de verre pour s'assurer que ces bétons rencontrent les critères de performance requis pour les applications structurales.

Abstract

The use of ground glass in partial replacement of cement in concrete is relatively recent. The thinness of the glass powder is paramount in his behavior and may influence its effects on the main properties of concrete. This book demonstrates the optimization of the smoothness of the glass powder and its incorporation rate in cementitious systems. And shows the well-developed study that focuses on the behavior of the glass powder in binary systems such as cementitious grouts, mortars and concretes while reporting its effects on the main properties in the fresh state, hardened and sustainability of these systems. The glass powder fineness similar to that of Portland cement improves the workability of concrete and long-term mechanical properties, contains an interesting pozzolanic potential, reduces the expansion provoked by alkali-silica reaction, spectacularly reduces the penetration of chlorine ions of concretes and correspondingly it follows an improvement in their resistance to the penetration of potentially aggressive external agents. In addition, it shows the innovative study on the compression behavior of reinforced concrete columns incorporating the glass powder to ensure that these concretes meet the performance criteria required for structural application.