

CHAPITRE 6

L'INFLUENCE DES GRANULATS NATURELS ET CEUX DU LAITIER SUR LES PROPRIETES DU BETON BASIQUE.

6.1 INTRODUCTION

Comme les trois quarts du volume d'un béton sont occupés par les granulats, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton mais selon leurs propriétés il affecteront la durabilité et les performances structurales du béton. (En fait on ne peut pas confectionner un béton résistant avec des granulats dont les propriétés sont médiocres).

En fait les granulats ne sont pas réellement inertes et leurs propriétés physiques, thermiques et dans certain cas chimiques influencent les performances du béton.

Les sables et gravillons naturels alluvionnaires obtenus par criblage, parfois avec concassage sont satisfaisants (silex, calcaires durs et les silico- calcaires). Même les roches éruptives ou sédimentaires concassées (granite , quartzites , ...) conviennent également pour la réalisation du béton.

Le recours au granulats artificiels légers (argile expansée, laitier bouletté) permet de formuler des bétons de densité réduite mais de coût élevé. (Chanvillard, 1999).

Les granulats provenant des sous produits industriels, et les granulats du béton recyclé présentant des matériaux dont la valorisation permet plusieurs avantages :

Economique , technologique et écologique.

Les granulats coûtent beaucoup moins cher que le ciment, il devient alors économique d'en inclure la plus grande quantité possible dans le béton, contrairement au ciment. Cependant l'aspect économique n'est pas l'unique raison qui explique l'utilisation des granulats. Car, ces derniers confèrent au béton une plus grande stabilité sur le plan volumétrique et une meilleure durabilité que la pâte de ciment. (Neville, 2000).

Afin d'étudier l'influence des granulats du laitier sur les propriétés du béton basique, il faut préciser la nature des granulats du laitier à incorporer dans le béton :

Le laitier granulé comme granulats fin où bien le laitier cristallisé comme gros granulats.

A cet effet nous suivrons les étapes suivantes :

- Le choix des granulats du laitier à utiliser.

- La formulation des bétons à étudier.
- Etude des propriétés des bétons frais.
- Etude des propriétés des bétons durcis : (résistance, déformabilité, durabilité).

6.2. CHOIX DES GRANULATS DU LAITIER A UTILISER : (LAITIER GRANULE, LAITIER CRISTALLISE)

Suivant le processus du refroidissement du laitier fondu on obtient deux produits différents :

- Le laitier granulé obtenu par refroidissement rapide dans l'eau.
- Le laitier cristallisé obtenu par refroidissement lent à l'air.

Selon (Aïctin, 1966) le laitier cristallisé de hauts fourneaux constitue un excellent agrégat à béton que l'on aura intérêt à utiliser sous forme de graviers plutôt sous forme de sable fin.

Par contre le laitier vitreux de hauts fourneaux constitue d'excellents sables correcteurs pour mortiers et bétons dont l'emploi est tout particulièrement recommandé pour réaliser des bétons très exposés aux intempéries.

Donc, le laitier granulé sert comme un sable silico -calcaire pour la réalisation des bétons, et le laitier cristallisé concassé, constitue un excellent granulat pour béton.

Afin d'apprécier la qualité de ces produits comme granulats fins et grossiers pour la réalisation des bétons. Les trois possibilités de leur utilisations sont étudiées :

- Substitution partielle et totale du sable naturel par du laitier granulé.
- Substitution partielle et totale de la pierre concassée naturel par le laitier cristallisé.
- Substitution partielle et totale du squelette granulaire (sable et pierre concassée) par les produits du laitier.

Nous abordons dans cette partie l'ouvrabilité du béton et sa résistance comme des critères caractérisant la qualité du béton.

L'ouvrabilité qui présente une caractéristique essentielle pour une fabrication réussie de l'ouvrage, elle dépend avant tout du dosage en eau. l'eau introduite dans l'empilement granulaire va dans un premier temps remplir la porosité résiduelle, puis écarte le squelette compact pour conférer aux grains une certaine mobilité.

La résistance mécanique qui présente un paramètre important dans la réalisation d'un béton, reflète la qualité du béton et sa durabilité

6.2.1 Substitution du sable naturel par le laitier granulé

Le laitier granulé, se présente sous la forme d'un sable vitrifié, très poreux, de teinte

jaune à brune, il ne contient aucune impureté, ne gonfle pas à l'humidité et il est insensible au gel.

Le laitier granulé après correction granulométrique par un broyage léger où une addition de fine peut être employé comme sable dans le béton.

Une étude comparative est menée sur plusieurs types de béton présentant de pourcentages croissants en laitier granulé (30 %, 50 %, 100 %) est un béton ordinaire afin d'estimer la qualité du laitier granulé comme sable (Zeghichi, 2004b) et (Zeghichi et al, 2005b).

Cette étude a traité l'effet de substitution au sable par du laitier sur le comportement du béton à l'état frais et durci.

L'affaissement du béton est déterminé pour chaque composition, les résultats obtenus sont représentés au tableau 6.1.

Tableau 6.1 : l'affaissement du béton en fonction du % du laitier granulé.

% du laitier	Béton de référence 0 %	30 %	50 %	100 %
Affaissement	8.5 cm	7.2 cm	6.0 cm	4.5 cm

En augmentant la teneur en laitier granulé le béton perd son ouvrabilité, une partie d'eau de gâchage est absorbée par le sable du laitier présentant un degré d'absorption assez élevé.

La résistance mécanique en compression des différents mélanges du béton présentant des teneurs croissantes en laitier est estimée à court et à long terme. Les résultats obtenus sont représentés à la figure 6.1.

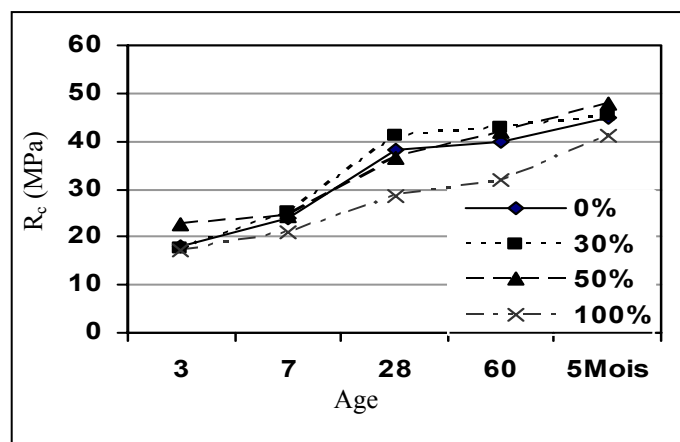


Figure 6.1: L'effet du remplacement de sable par le laitier granulé sur la résistance du béton.

La substitution partielle du sable par du laitier granulé de 30 % à 50 % améliore nettement les résistances mécaniques à court et à long terme, par contre une substitution totale affecte négativement la résistance à court terme, mais au bout de quelques mois elle s'est améliorée.

L'amélioration de la résistance des bétons de 30 % et 50 % du laitier granulé est liée aux facteurs suivants :

- Les éléments les plus fins du laitier (poudre) entrent en réaction avec le produit d'hydratation du clinker $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour former des CSH plus denses.
- La correction de la courbe granulométrique du sable fin par l'ajout du laitier granulé grossier de telle façon que le mélange ait une bonne stabilité mécanique, se qui est représenté à la figure 6.2.

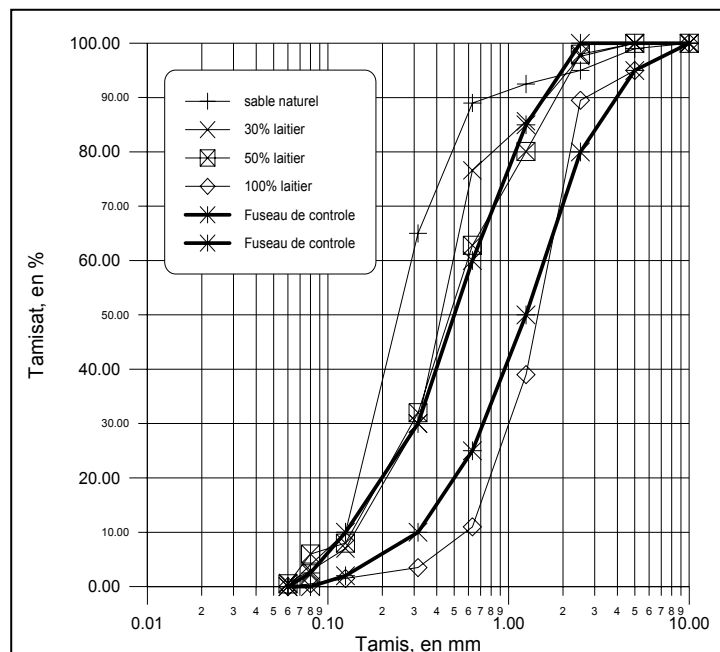


Figure 6.2 : correction de la courbe granulométrique du sable fin.

6.2.2 Substitution des pierres concassées naturelles par le laitier cristallisé

Le laitier cristallisé est une véritable roche silico calcaire, analogue au basalte, après concassage et criblage, il constitue un granulat normalisé classé suivant les mêmes classes granulaires que les granulats traditionnels, il est d'ailleurs assimilé en tant que granulat lourd, en ce qui concerne les essais de réception. C'est un granulat d'aspect anguleux, rugueux à structure micro -alvéolaire et de couleur grise, il est inattaquable par l'eau et sa porosité est inférieure à 10 %, sa teneur en SO_3 doit être inférieure à 10 %.

Afin d'étudier l'effet de l'utilisation des granulats du laitier cristallisé sur l'ouvrabilité et la résistance du béton, plusieurs mélanges de béton sont préparés présentant respectivement : 30 % du laitier cristallisé 50 % et 100 %. (Zeghichi, 2005b).

Les affaissements des différentes compositions sont représentés à la figure 6.3.

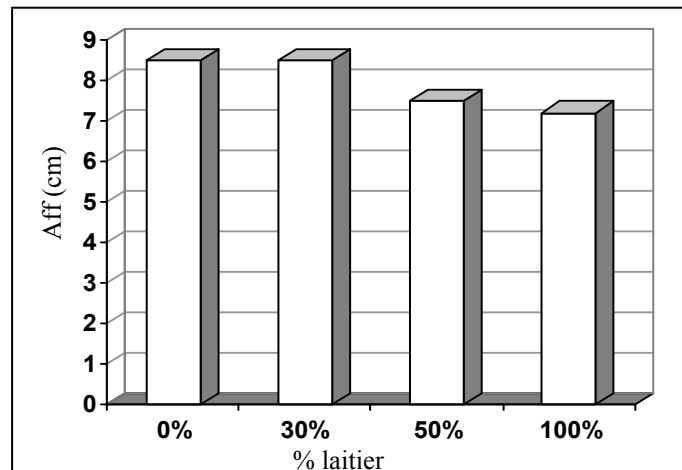


Figure 6.3 : affaissement en fonction du % du laitier cristallisé.

La perte d'affaissement n'est pas considérable en remplaçant partiellement les pierres concassées par le laitier cristallisé.

Le remplacement total des pierres concassées par le laitier concassé affecte l'affaissement du béton, ce qui est lié à la surface du granulat du laitier et à sa forme.

Les résultats des essais à la compression sont présentés à la figure 6.4.

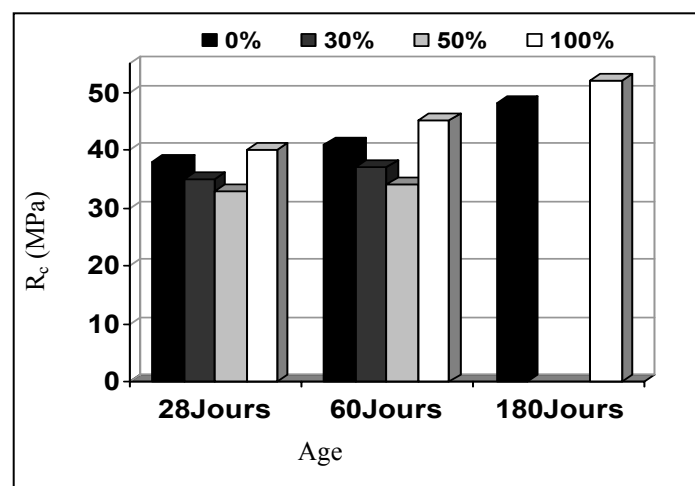


Figure 6.4 : L'effet de la substitution des granulats grossiers naturels par le laitier cristallisé sur la résistance.

Le remplacement total des granulats grossiers naturels par le laitier cristallisé améliore la résistance mécanique aux différents âges de durcissement ce qui est expliqué par la parfaite adhérence du granulat de laitier avec la pâte de ciment (ce qui sera détaillé par la suite dans ce chapitre), la substitution partielle affecte la résistance du fait de l'incompatibilité des granulats naturels et ceux du laitier (résistance, module d'élasticité, ...) différents. (Zeghichi et al, 2005d).

6.2.3 Substitution du squelette granulaire naturel par les produits du laitier

Les granulats naturels fins et grossiers sont substitués partiellement et en totalité par ceux du laitier (granulé et cristallisé).

L'effet de cette substitution sur l'ouvrabilité et la résistance du béton à la compression est représenté aux figures 6.5 et 6.6.

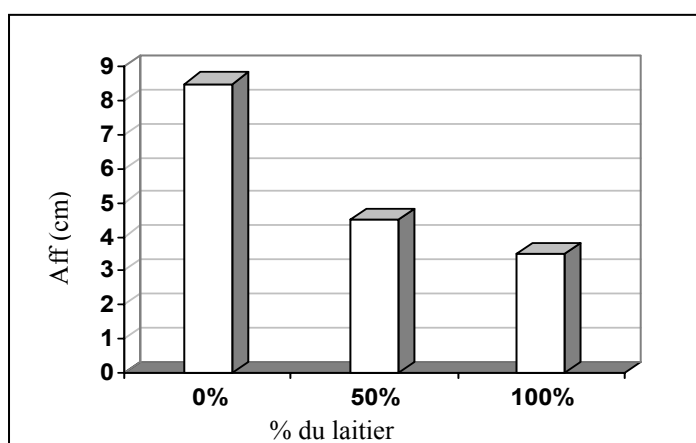


Figure 6.5 : l'affaissement en fonction du taux de remplacement des granulats naturels par ceux en laitier.

L'incorporation partielle d'un squelette artificiel (en laitier) dans le béton conduit à une perte d'affaissement équivalente à la moitié de l'affaissement mesuré pour un béton ordinaire, tandis que son incorporation totale conduit à une perte équivalente au deux tiers (2/3) de celui d'un béton ordinaire. La cause est connue : absorption d'eau forte par le laitier granulé, et la surface pleine d'aspérités du laitier cristallisé.

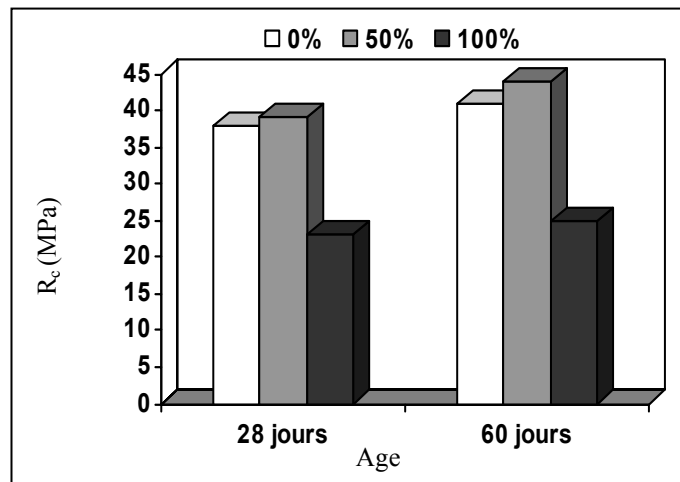


Figure 6.6 : L'effet de la substitution des granulats naturels par les produits de laitier sur la résistance à la compression.

Le remplacement partiel du squelette granulaire par celui du laitier améliore la résistance mécanique en compression par contre la substitution totale affecte négativement la résistance, cette dernière est diminuée presque de la moitié par rapport à celle du béton ordinaire ce qui peut être expliqué par la qualité du laitier granulé comme sable (module de finesse élevé, et degré d'absorption élevé).

Le choix des granulats du laitier à utiliser, (granulats fins : laitier granulé) où (granulats grossiers : laitier cristallisé) et leur pourcentages dépend de la composition du béton donnant des résistances en compression élevées, et des valeurs d'affaissement acceptables.

Le tableau 6.2 récapitule les résistances obtenues à 28 jours de durcissement pour chaque type de substitution, et les affaissements correspondants.

Tableau 6.2 : Les affaissements des différents bétons étudiés, et leurs résistance en compression après 28 jours de durcissement.

	Béton ordinaire	Substitution du sable			Substitution de la pierre concassé			Substitution des granulats	
		30%	50%	100%	30%	50%	100%	50%	100%
Affaissement (cm)	8.5	7.2	6.0	4.50	8.5	7.5	7.2	4.5	3.5
$R_c(28\text{jours})$ MPa	38.50	41	36.50	28.50	34.50	33	42.50	39.50	22

A partir des résultats obtenus, l'utilisation du laitier cristallisé en tant que granulats grossiers améliore la résistance mécanique à la compression. Donc on a un intérêt à utiliser le laitier cristallisé comme granulats grossiers pour la confection des bétons, et d'étudier leurs influence sur les propriétés physico mécaniques du béton ordinaire et du béton basique. Notons que l'ouvrabilité n'est pas considérablement affectée par cette substitution totale.

6.3 FORMULATION DES BETONS : ORDINAIRE ET BASIQUE

Formuler un béton consiste à déterminer un mélange optimal des granulats dont on dispose ainsi que le dosage en fines (ciment et additions) et en eau afin d'obtenir les qualités recherchées.

Un point commun à toutes les études de composition, consiste à rechercher conjointement deux qualités essentielles : l'ouvrabilité et la résistance.

La formulation d'un béton se résume en quatre étapes majeures :

- Détermination de la dimension maximale des granulats.
- Détermination de la courbe granulométrique optimale des granulats.
- Détermination du dosage en eau et en air, en fonction de l'objectif d'ouvrabilité.
- Détermination du dosage optimal des fines. (Dupain et al, 2000).

L'étude suivante consiste en premier lieu à confectionner un béton ordinaire dont les ingrédients sont connus : granulats, ciment et eau. Pour le formuler, la méthode choisie est facile à appliquer, elle a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantiers et ayant données satisfaction , c'est la méthode de Dreux Gorisse modifiée.

En second lieu, on propose d'appliquer cette méthode pour formuler le béton basique afin d'éviter d'autres méthodes mentionnées en (Mezghiche, 1989) qui sont un peu compliquées par rapports à celle de Dreux Gorisse.

6.3.1 Méthode de Dreux Gorisse modifiée

C'est une méthode simple d'utilisation, puisqu'elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés.

Les données sont :

- Dimension maximale des granulats $D = 25$ mm.
- Courbe de référence : $x=12,5$, $y=48$.
- Composition du mélange en granulats : (voir figure 6.7)
 - o Pierres concassées $16/25 = 37$ % , $8/16 = 19$ % et $3/8 = 10$ %

- Sable 0/3 = 34 %.

Les hypothèses de calcul :

- Résistance souhaitée : 27 MPa.
- Affaissement souhaité : 8 cm.

La vraie classe du ciment composé CPJ = 42,5 MPa, et celle d'un ciment au laitier activé par le carbonate de soude est 35 MPa.

Quatre mélanges de béton sont préparés :

1^{er} mélange : béton ordinaire à base de granulats naturels.

2^{ème} mélange : béton ordinaire à base de granulats de laitier cristallisé.

3^{ème} mélange : béton basique à base de granulats naturels.

4^{ème} mélange : béton basique à base de granulats de laitier cristallisé.

Les abréviations suivantes :

(B.O.G.N) : béton ordinaire à base de granulats naturels.

(B.O.G.L) : béton ordinaire à base de granulats de laitier.

(B.B.G.N) : béton basique à base de granulats naturels.

(B.B.G.L) : béton basique à base de granulats de laitier. Seront utilisées.

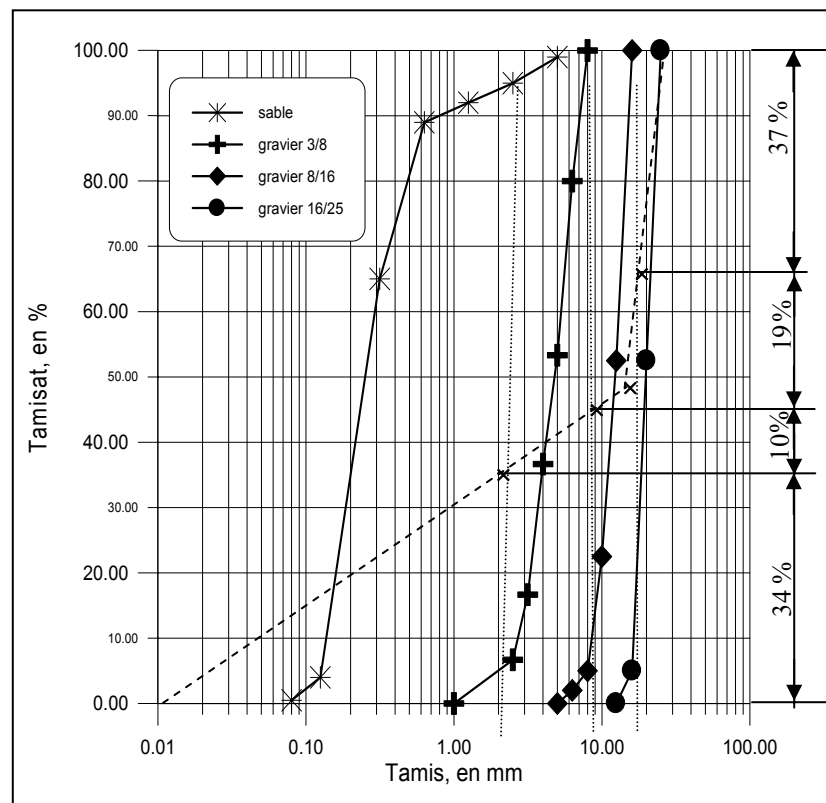


Figure 6.7 : La composition du mélange de béton en granulats (sable , pierres concassées).

Les quantités des composants des différents mélanges du béton obtenues par masse sont résumées dans le tableau suivant (6.3)

Tableau 6.3 : Les constituants des différents bétons en masse (Kg/m³).

Bétons	B.O.G.N	B.O.G.L	B.B.G.N	B.B.G.L
Constituants				
Ciment CPJ	355	355	-	-
Laitier	-	-	390	390
Granulats grossiers				
16/25	657	632	630	606
8/16	332	325	319	311
3/8	174	175	166	167
Sable	590	590	565	565
Eau	188L	188L	-	-
Solution basique	-	-	196	196
Masse volumique théorique (Kg/m³)	2296	2265	2266	2235
Rapport E/C	0,53	0,53	0,50	0,50

Les quantités obtenues en volume (%) sont représentés au tableau 6.4 :

Tableau 6.4 : Les constituants des différents bétons en volume (%)

Bétons	B.O.G.N	B.O.G.L	B.B.G.N	B.B.G.L
Constituants				
Ciment CPJ	0,114	0,114	-	-
Laitier	-	-	0,315	0,315
Granulats grossiers				
16/25	0,252	0,252	0,242	0,242
8/16	0,130	0,130	0,124	0,124
3/8	0,068	0,068	0,065	0,065
Sable	0,232	0,232	0,222	0,222
Solution basique	-	-	0,196	0,196
Eau	0,188	0,188	-	-
air	0,015	0,015	0,015	0,015
Volume total %	1,00	1,00	1,00	1,00

Les granulats grossiers représentent les granulats naturels et ceux du laitier cristallisé correspondant à chaque composition du béton.

6.4 PROGRAMME DES ESSAIS EFFECTUES

Afin de bien situer notre travail, donnons des précisions sur les points suivants :

- Conditions de préparation et de conservation des bétons que nous avons réalisés.
- Mesures que nous avons effectués sur ces derniers.

6.4.1 Confection des éprouvettes et conservation

Les éprouvettes ont été confectionnées conformément aux normes en vigueur (malaxage, mise en œuvre, serrage). Se sont de différentes géométries, selon le test a effectué. Elles sont conservées après démoulage à 24 h dans deux milieux :

- Sec ou laboratoire.
- Humide : dans l'eau à 20°C.

D'autre éprouvettes ont subit une accélération de durcissement par étuvage (80 % HR , T = 80°C) pendant un cycle (2 h + 16 h + 2 h).

Après ce cycle d'étuvage les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'au moment des essais. Ces éprouvettes sont de différentes géométries : cubiques de 10x10x10 cm prismatiques de 10x10x40 cm et cylindriques 16x32 cm.

6.4.2 Mesures effectuées sur les éprouvettes

6.4.2.1 Nature des essais

Pour caractériser l'effet de la substitution de l'agrégat de référence (naturel) par le laitier cristallisé nous avons choisi d'effectuer des essais sur le béton frais notamment : la consistance et la masse volumique; et des essais sur le béton durci, en mesurant les résistances mécaniques des différents bétons par des essais de rupture par : compression, flexion et traction par fendage.

De mesurer également la déformabilité des bétons.

D'autres essais sont mentionnées comme étant des essais visant la durabilité du béton, qu'on peut classer en :

- Absorption du béton.
- Porosité du béton.
- Perméabilité du béton.
- L'action du milieu agressif.
- L'action des hautes températures.
- L'examen de l'interface pâte-granulats.

6.4.2.2 Nombre de mesures

La moyenne arithmétique de trois essais est suffisante pour donner une valeur reproductible dans des limites acceptables.

6.4.2.3 Age des éprouvettes

- Nous avons réalisé les essais de rupture en compression sur des éprouvettes cubiques après 7 jours, 28 jours, 150 jours, 180 jours et après un an de conservation dans l'eau.
- Les essais de rupture en flexion et en traction par fendage sur des éprouvettes prismatiques et cylindriques respectivement après 28 jours et après un an de durcissement dans l'eau.
- Les essais de porosité et d'absorption effectués sur des éprouvettes cubiques après 28 jours et après un an de durcissement dans l'eau.
- Les essais de perméabilité effectués sur des éprouvettes cylindriques après 6 mois de conservation dans l'eau.
- L'action du milieu agressif est estimé par rupture en compression des éprouvettes cubiques immergées dans un milieu agressif (0,1 % HCL) dès l'âge de 28 jours pendant une période d'une année.
- L'action des hautes températures est estimée par rupture des éprouvettes cubiques exposées aux hautes températures après un an de durcissement dans l'eau.

6.5 PRESENTATION DES RESULTATS

6.5.1 Béton frais

L'eau est un ingrédient essentiel du béton, qui remplit deux fonctions de base : une fonction physique qui donne au béton les propriétés rhéologiques nécessaires et une fonction chimique qui permet le développement de la réaction d'hydratation.

Lors du malaxage, l'eau est l'élément qui va donner une capacité d'écoulement au squelette compact formé par l'empilement des grains solides. Ceci signifie que l'eau va venir desserrer le squelette compact afin de donner une mobilité aux grains suffisante pour permettre la mise en œuvre souhaitée.

Il est important de connaître les propriétés du béton à l'état frais avant prise et durcissement. Parmi ces propriétés, la consistance ou la maniabilité qui peut se définir comme étant la facilité de la mise en œuvre du béton. Elle est appréciée par différents essais qui permettent tous de situer le béton sur une échelle de fluidité.

6.5.1.1 Consistance du béton

Le choix de l'essai de caractérisation de la consistance et de la classe de consistance visée est en fonction de sa facilité de mise en œuvre sur chantier et au laboratoire ainsi que sa fiabilité.

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams, est actuellement en usage dans le monde entier il fournit des mesures fiables, de variabilité restreinte.

L'affaissement au cône d'Abrams est mesuré pour les quatre mélanges de bétons (BOGN), (BOGL), (BBGN), (BBGL) afin de connaître :

- L'effet du type des granulats sur l'affaissement.
- L'effet du type de liant sur l'affaissement.

Les résultats obtenus sont présentés à la figure 6.8.

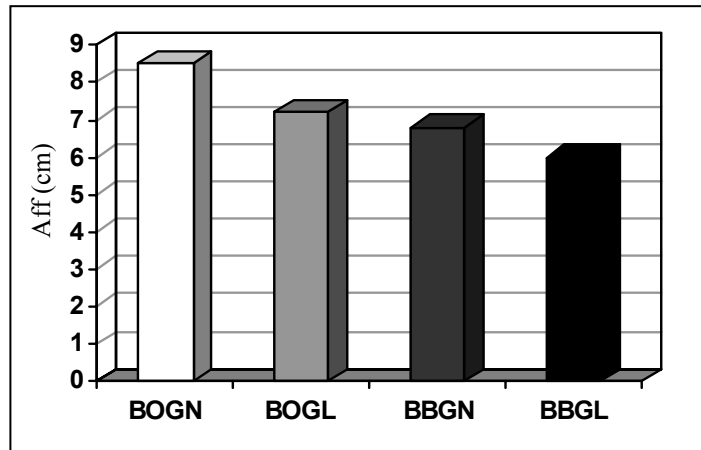


Figure 6.8 : L'affaissement des différents bétons.

En fonction des affaissements obtenus, la classe de consistance des différents bétons est plastique (l'affaissement varie de 5 cm à 9 cm).

Les bétons à base de granulats de laitier présentent une maniabilité inférieure à celle des bétons classiques. Cette baisse de consistance est à rattacher directement à la structure et à la forme des grains de laitier cristallisé :

- une importante quantité d'eau est nécessaire pour mouiller leur grande surface recouverte d'aspérités.

Par contre les bétons basiques sont fermes par rapport aux bétons ordinaires.

Certes le laitier granulé finement broyé améliore la maniabilité, et rend le béton plus plastique et assure une meilleure cohésion, du fait que les caractéristiques de la surface de ces grains sont plus lisses et absorbent un peu d'eau au cours de malaxage.

Mais la présence de l'activant influe sur ces caractéristiques : le carbonate de soude est un rigidifiant puissant, il diminue la plasticité du liant selon sa densité.

Il faut noter ici qu'une légère vibration du béton basique le rend très maniable se qui peut être expliqué par la formation d'un gel plus au moins réversible.

La structure peut alors se reformer après un remaniement avant que se produise la prise chimique, en vibrant le béton, en diminuant ainsi le frottement interne.

6.5.1.2 Masse volumique du béton

La masse volumique du béton à l'état frais est calculée selon la formule suivante :

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad \text{avec : } m_2 : \text{ la masse du moule cubique rempli du béton compacté.}$$

M_1 : la masse du moule vide.

V : le volume du moule cubique (10x10x10 cm).

Les résultats obtenus sont récapitulés à la figure 6.

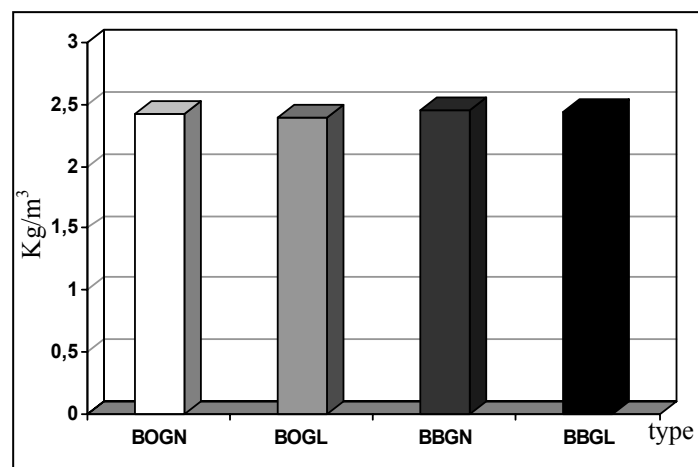


Figure 6.9 : masse volumique des différents bétons.

Le béton à base des granulats du laitier cristallisé présente une masse volumique inférieure à celui confectionné à partir des granulats naturels du fait que la masse volumique absolue du laitier cristallisé est inférieure à celle des pierres concassées naturelles.

Le béton basique présente des masses volumiques supérieures à celle du béton ordinaire, ce qui peut être expliqué par la présence de l'activant (Na_2CO_3) qui a pour rôle de défloculer les particules de ciment.

Les particules de ciment après leur broyage présentent de nombreuses charges électriques ou superficielles non saturées qui les amènent à flocculer quand elles sont mises en contact avec un liquide aussi polaire que l'eau, en flocculant les particules de ciment piègent une certaine quantité d'eau qui n'est plus alors disponible pour lubrifier le béton, ce phénomène est représenté à la figure 6.10

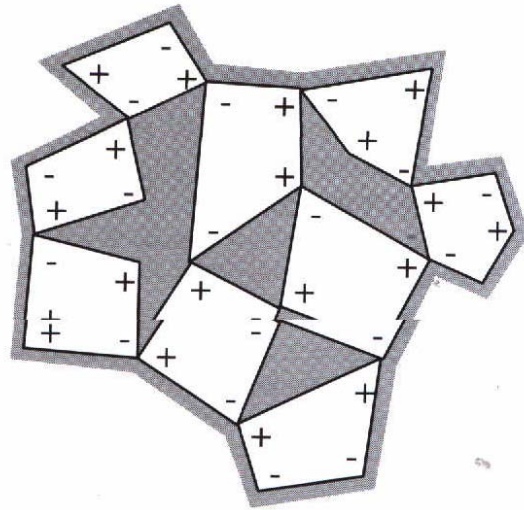


Figure 6.10 : Particules de ciment dans une structure flocculée. (Aïtcin, 2001).

L'effet de la solution basique utilisée (Na_2CO_3) peut se comparer donc à l'effet des réducteurs d'eau et des superplastifiants qui déflocculent les grains de ciment pour favoriser l'hydratation.

6.5.2 Béton durci

L'association ciment –eau génère par réactions chimiques des hydrates stables, dont la multiplication et l'enchevêtrement des microcristaux augmentent les résistances mécaniques : le béton se transforme alors en une véritable roche composite.

Le processus de durcissement, et les différentes phases de la vie du béton sont présentées à la figure 6.11.

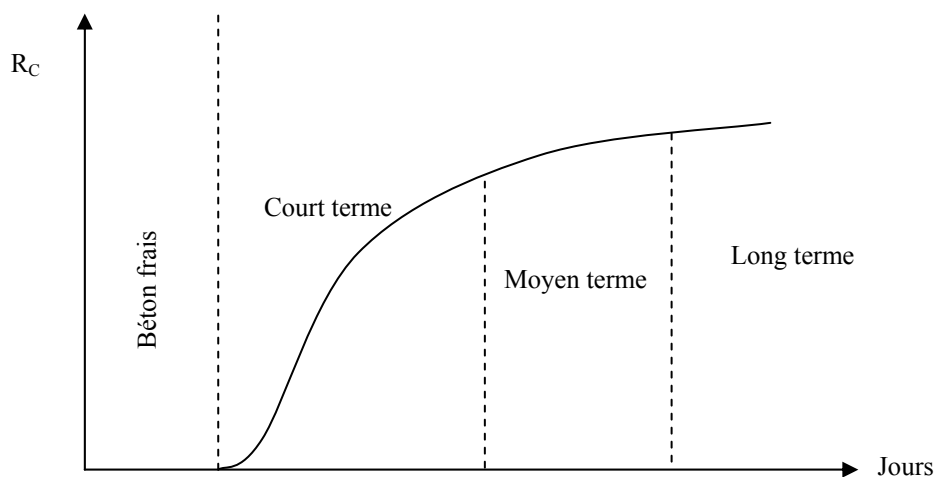


Figure 6.11 : processus du durcissement du béton.

La phase de durcissement peut durer plusieurs mois, voir plusieurs années.

6.5.2.1 La résistance mécanique à la compression

La résistance mécanique à la compression du béton est généralement considérée comme sa plus importante propriété, elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydratée, elle est estimée soit à court terme où à long terme.

Dans ce paragraphe, on examine le développement de la résistance (taux d'augmentation) des différents bétons étudiés, en fonction du type du ciment utilisé et le type des granulats utilisés.

Les conditions de mûrissement sont les mêmes pour les différents bétons.

L'évolution de la résistance mécanique à la compression en fonction du temps, et les différents types de bétons est représentée à la figure 6.12 :

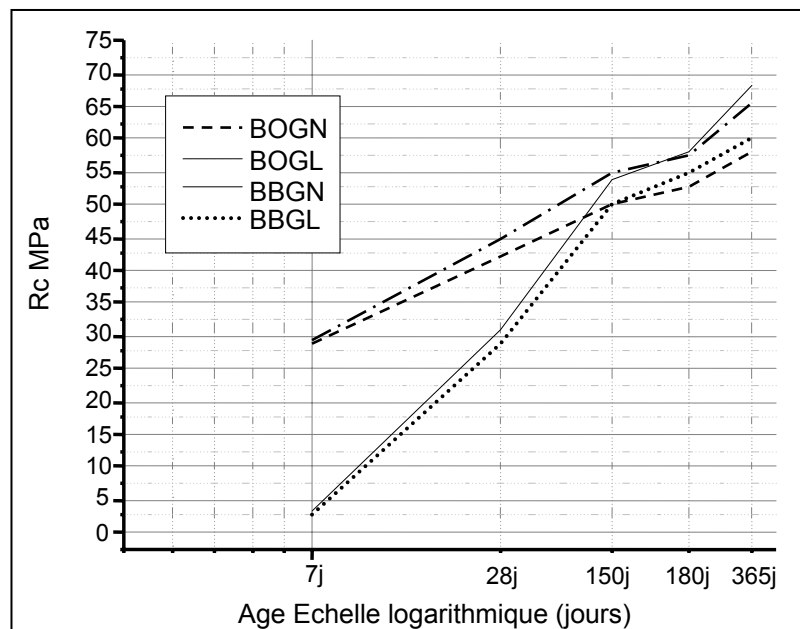


Figure 6.12 : L'évolution de résistance en fonction du temps et type de béton.

La résistance mécanique augmente en fonction de l'âge du béton.

Les bétons basiques développent des résistances à la compression très faibles à l'âge de 7 jours par rapport au béton ordinaire, ce qui est lié à l'hydratation lente du ciment de laitier.

A partir de 28 jours de durcissement, une amélioration de la résistance est signalée, mais reste inférieure à celle obtenue pour un béton ordinaire, au-delà de 28 jours la résistance mécanique est comparable à celle du béton ordinaire, et la dépasse après 6 mois et 12 mois de durcissement.

Des sections sont faites dans le béton basique à granulats naturels et à granulats de laitier durcis, et dans un béton ordinaire pour examiner l'état du fond (l'échelle macroscopique) après une année de durcissement en milieu humide.

Les photos prises sont représentées aux figures suivantes 6.13, 6.14, 6.15 et 6.16.



Figure 6.13 : Béton ordinaire (à base de granulats naturels)

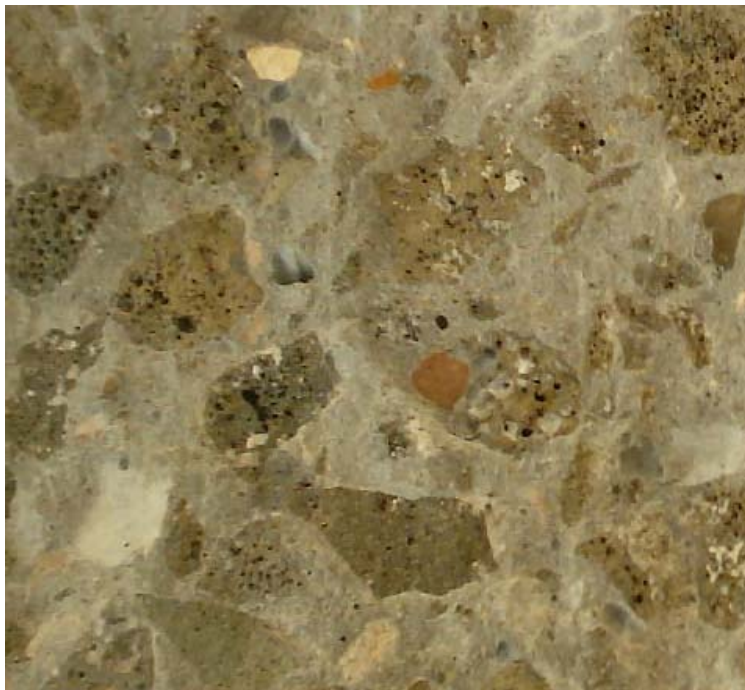


Figure 6.14 : Béton ordinaire (à base de granulats de laitier)



Figure 6.15 : béton basique à base de granulats naturels .



Figure 6.16 : béton basique à base de granulats de laitier.

On remarque que le fond du béton ordinaire est de la même couleur que celui des endroits proches des surfaces, par contre dans le béton basique, on remarque une différence de couleur entre le fond et les côtés.

Au fond elle est foncée, elle semble être humide par contre au côtés elle est claire ce qui peut être expliqué par la continuité des réactions d'hydratation au fond du béton, ce qui influe par suite positivement sur l'augmentation de la résistance mécanique.

L'utilisation des granulats de laitier améliore la résistance à la compression du béton ordinaire aux différents âges de durcissement, légèrement à court et à moyen terme (7 j et 28 j), et considérablement à long terme (6 mois et 12 mois). Ce phénomène est lié au facteurs suivants :

- La texture et la rugosité du granulat du laitier (voir la figure 6.17).
- L'eau absorbée lors du malaxage par les granulats du laitier cristallisé devient disponible pour hydrater le ciment plus tard.

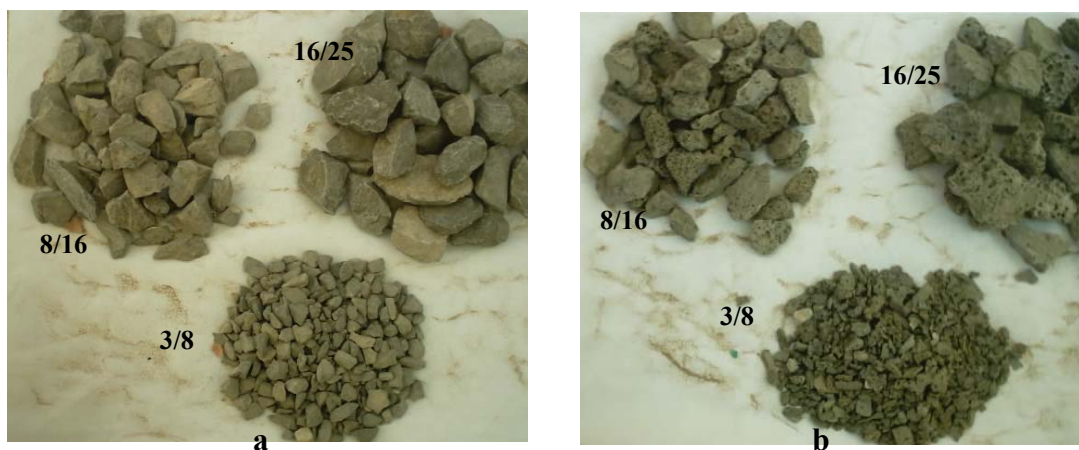


Figure 6.17 : Texture des granulats naturels (a) et ceux du laitier (b).

L'accroissement de la résistance mécanique à la compression dans l'intervalle de 7 jours à 28 jours pour les différents types de bétons est très différent :

Il est de l'ordre de 33,70 % pour un béton ordinaire, et de 88,70 % pour un béton basique (si on considère que la résistance à la compression à 28 jours représente 100 %) se qui est représenté à la figure 6.18.

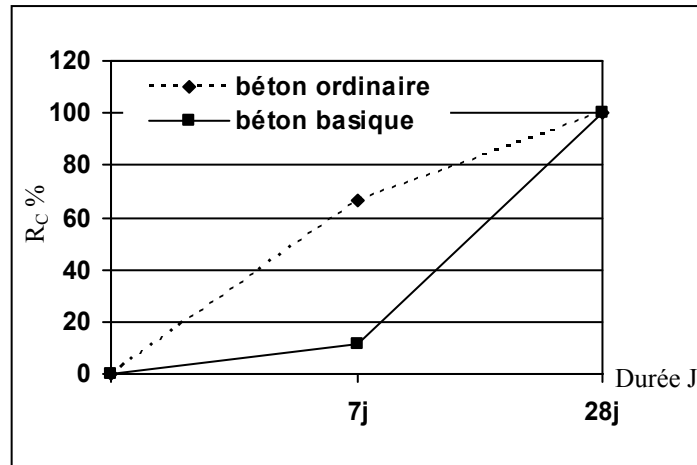


Figure 6.18 : taux d'accroissement de la résistance.

Cette représentation est spécifique pour un béton basique activé par le carbonate de soude (cas de notre étude). Dans le cas où le béton basique est activé par le verre soluble (Na_2SiO_3) la résistance augmente considérablement dès le premier jour de durcissement.

On estime grossièrement que l'accroissement de la résistance des ciments portlands suit une loi logarithmique, par contre l'accroissement de la résistance des ciments basiques suit approximativement une loi sous la forme : $f(x) = Ax$ dans l'intervalle 7 jours à 28 jours. Au-delà de cette intervalle, la variation de la résistance peut se comparer à celle du béton ordinaire se qui peut être représenté sur la figure 6.19.

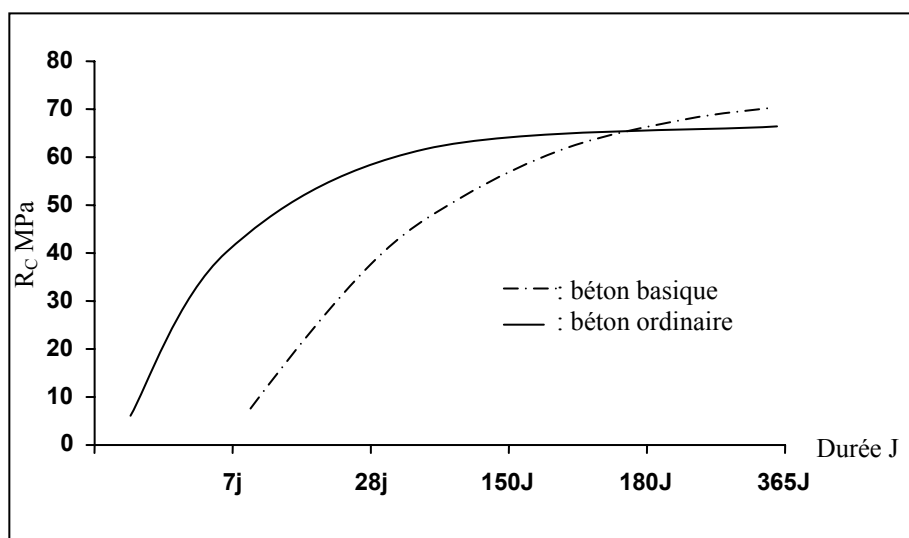


Figure 6.19 : L'accroissement de la résistance en fonction de l'âge du béton.

6.5.2.1.1 L'influence de l'accélération du durcissement sur la résistance mécanique à la compression

Généralement, les ciments au laitier supportent bien l'étuvage. Selon (Zeghichi, 2005a), la combinaison de l'activation du laitier et l'étuvage améliore les résistances au jeune âge.

Pour étudier l'influence du type de granulats sur la résistance du béton étuvé, les compositions du béton précédentes ont subi une accélération de durcissement par étuvage à 80°C et 90 % d'humidité selon le cycle suivant (2 h + 12 h + 2 h) : 2 heures avant l'étuvage (montée de la température), 12 heures d'étuvage (palier), 2 heures après l'étuvage (descente de la température).

Après ce cycle, les éprouvettes sont démoulées et conservées dans l'eau jusqu'à l'épreuve de rupture en compression.

Les essais sont effectués sur des éprouvettes cubiques après un jour d'étuvage et après 28 jours de durcissement des éprouvettes étuvées.

Les résultats obtenus sont représentés à la figure 6.20.

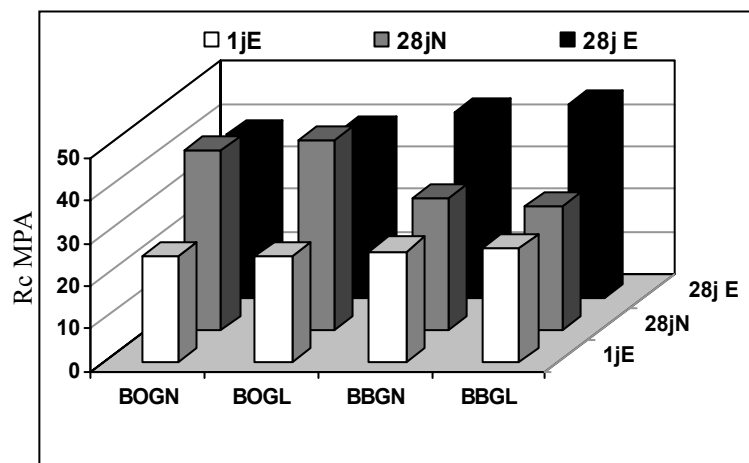


Figure 6.20 : L'influence de l'étuvage sur la résistance mécanique en compression en fonction des types de béton.

La résistance atteinte après un jour de durcissement par étuvage représente 57 % de la résistance obtenue à 28 jours pour un durcissement normal, cela pour un béton de CPJ (ordinaire), par contre elle représente 83 % de la résistance obtenue à 28 jours pour un béton basique.

Le type des granulats n'a pas présenté d'influence significative sur la résistance du béton, ce qui peut être expliqué par la durée courte de durcissement.

En fait l'étuvage accélère les réactions d'hydratation du ciment, et ne présente aucune influence sur les granulats.

L'évolution des résistances à 28 jours du béton basique étuvé est signalée d'un taux d'accroissement égale à 50 % par rapport à un béton non étuvé.

A partir des résultats obtenus on confirme la contribution de l'étuvage à l'amélioration des résistances mécaniques du béton basique.

6.5.2.1.2 L'influence du mode de conservation sur la résistance mécanique du béton

La résistance mécanique augmente dans le milieu humide, du fait que ce dernier empêche l'évaporation de l'eau du béton durant son durcissement, et permet la continuité des réactions d'hydratation et par suite le développement de la résistance mécanique.

Le milieu humide est favorable pour le béton à ciment portland. Par contre le béton basique et dans un âge précoce, il ne se prête pas à se conserver dans l'eau.

Les résultats des essais à la rupture en compression à 28 jours de durcissement des éprouvettes conservées dans l'eau et d'autres conservées sèches sont représentés à la figure 6.21.

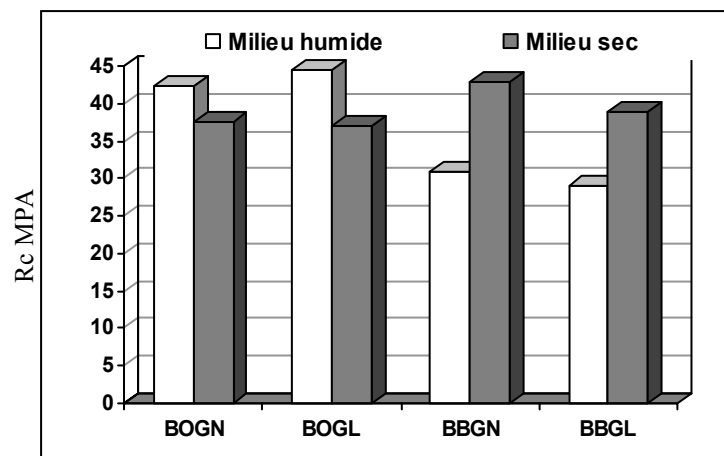


Figure 6.21 : La résistance en compression après 28 jours de durcissement
En fonction du mode de conservation.

Le béton basique conservé à l'air développe des résistances supérieures à celles du béton humide, ce qui peut être expliqué par l'évolution des réactions d'hydratation activées par la température ambiante assez élevée par rapport à celle d'eau.

Au-delà de 28 jours le milieu humide est indispensable pour augmenter les résistances.

La figure 6.22 présente la résistance en compression après un an de durcissement dans les deux milieux sec et humide.

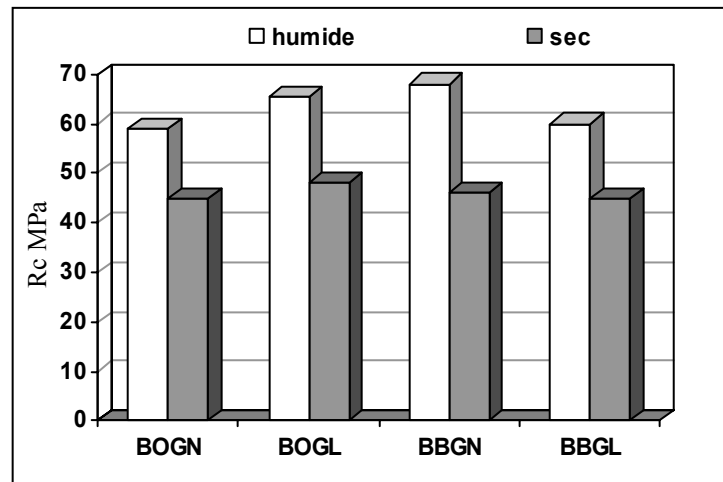


Figure 6.22 : La résistance en compression après un an de durcissement en fonction du mode de conservation.

La résistance obtenue après un an de durcissement en milieu sec reste presque du même ordre que celle obtenue à 28 jours de durcissement ce qui est lié à la limitation des réactions d'hydratation par l'évaporation de l'eau contenue dans le béton, ce qui a été confirmé par (Abib et al 2005) à partir de la figure suivante :

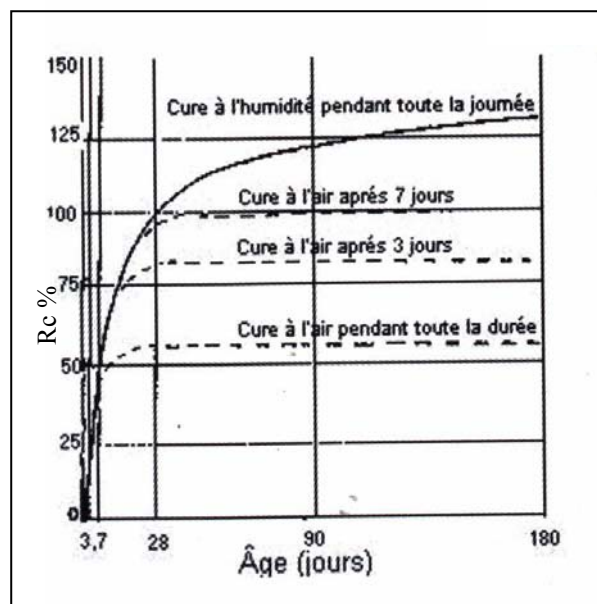


Figure 6.23 : pourcentage de résistance à la compression d'un béton par comparaison à un béton soumis à l'humidité pendant 28 jours. (Abib et al 2005).

6.5.2.2 La résistance mécanique à la traction par fendage

Cet essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse, l'éprouvette se rompt suivant un plan diamétral sous l'influence des contraintes de traction qui se développent normalement à la direction de compression.

La résistance à la traction par fendage est calculée après 28 jours de durcissement et à long terme (après un an de durcissement). L'essai est effectué sur des éprouvettes cylindriques conservées dans l'eau, présentant les différents types de béton.

Les résultats obtenus sont présentés à la figure 6.24

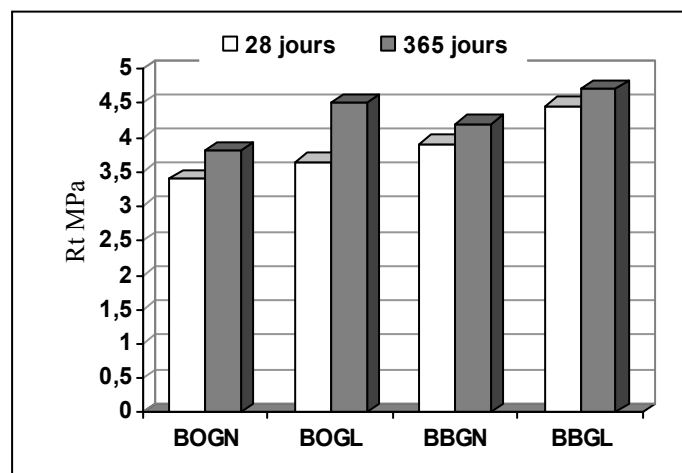


Figure 6.24 : Résistance à la traction par fendage en fonction du type de béton après 28 jours et un an de durcissement.

Le type de granulats utilisé dans le béton influence sa résistance à la traction.

Le laitier cristallisé favorise l'adhérence pâte hydratée-granulat, sa rugosité, son état de surface, présentent des facteurs contribuant à l'amélioration de la résistance.

(Aïtcin, 1966) a également signalé l'effet positif de l'utilisation du laitier cristallisé comme granulat grossier dans le béton, il s'agit (selon Aïtcin) en plus des nombreuses aspérités de surface des grains de laitier, créant une topographie particulièrement propice à l'excellente adhérence par effet de tenaille. Les accolements epitaxiaux paraissent possibles entre les cristaux de mélikite du laitier et ceux de portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) libérés lors de l'hydratation du ciment portland présentant une autre cause.

En effet la mélikite présente un plan de clivage imparfait au niveau d'un doublet de plan d'atomes de calcium. (Wyckoff 1960) et (Roubault 1963).

Les figure (6.25, 6.26) présentent la structure de la mélite, et celle de la portlandite.

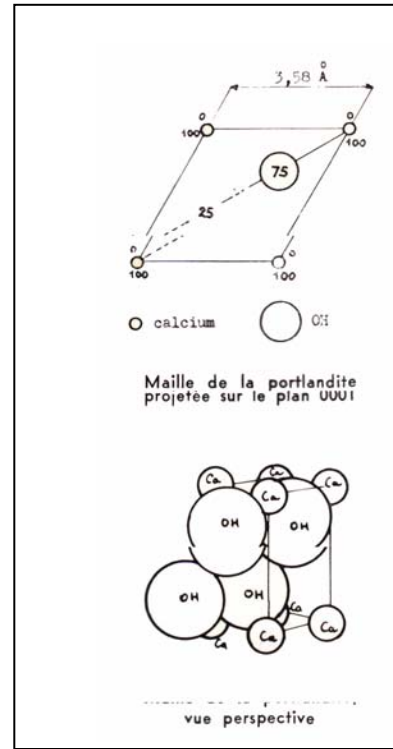
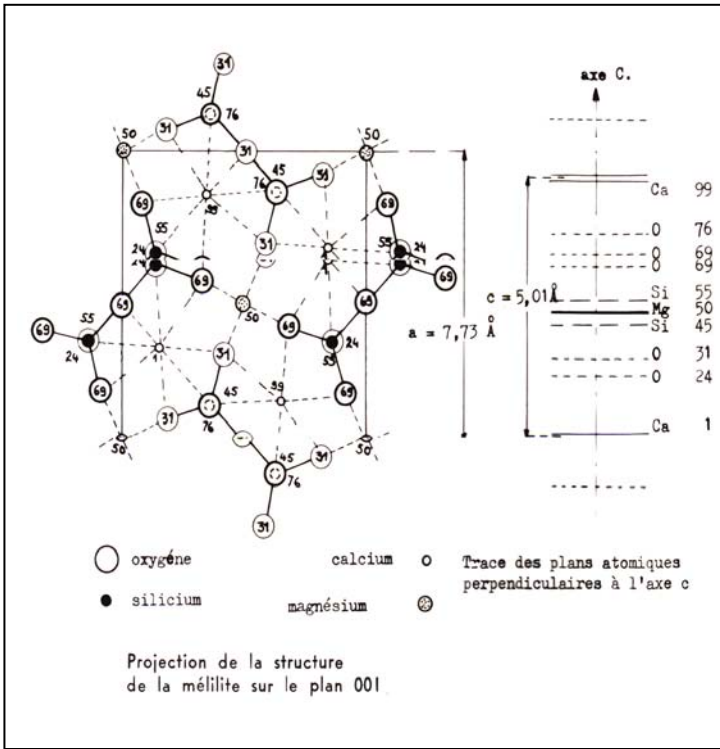


Figure 6.25: structure de la mélite

Figure 6.26 : structure de la portlandite

Par contre la figure (6.27-a) présente la disposition des atomes de calcium dans la mélite dans le plan 001 et la figure (6.27-b) présente la disposition des atomes de calcium dans la portlandite dans le plan 0001.

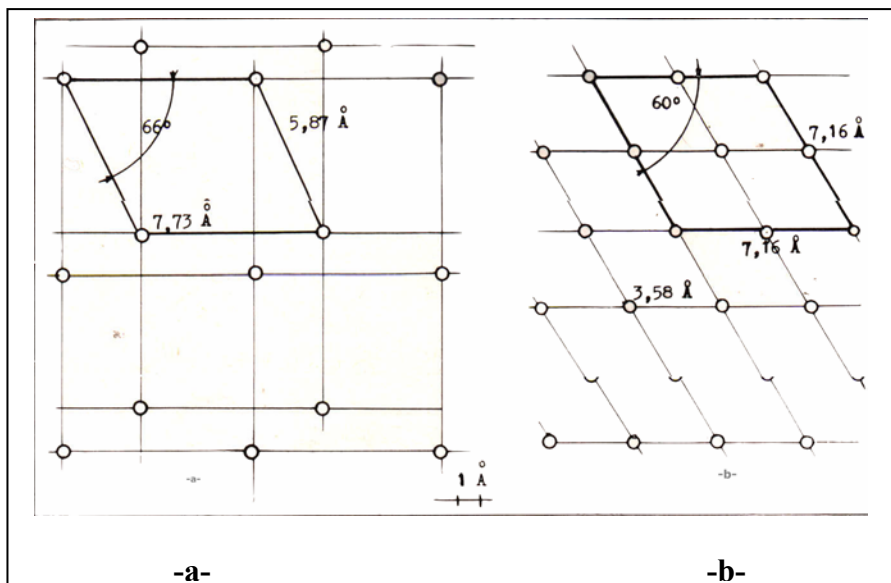


Figure 6.27 : Disposition des atomes de calcium dans la mélite et la portlandite (Aïtcin, 1966).

La maille multiple de la portlandite et le parallélogramme de la mélilite, ont des dimensions voisines comme il est indiqué à la figure 6.28.

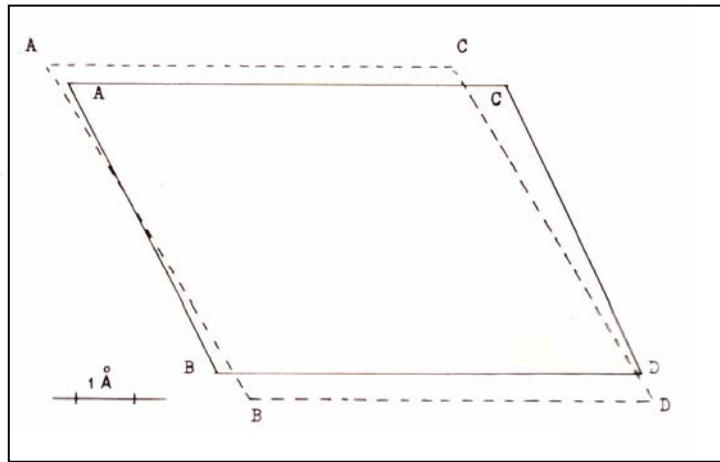


Figure 6.28 : Superposition des deux mailles montrant la possibilité d'épitaxie (magnan, 1961).

Les différences qui existent entre ces éléments correspondant restent dans un domaine encore tolérable pour permettre un accolement épitaxique après quelques distorsions de réseaux. (magnan, 1961) .

La figure 6.29 présente l'adhérence du laitier cristallisé au ciment portland.

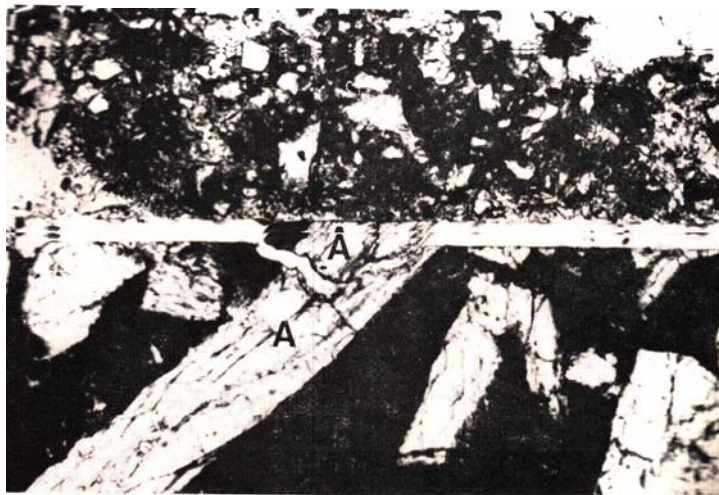


Figure 6.29 : L'adhérence du laitier cristallisé au ciment. (Aïtcin, 1966)

A : cristal de la mélilite.

Le type du ciment utilisé, a une légère influence au moyen terme (28 jours de durcissement). On note une augmentation de la résistance à la traction du béton basique à base granulats naturels de l'ordre de 12 % par rapport au béton ordinaire. Et une augmentation de

5.3 % de la résistance du béton basique à base de granulats de laitier par rapport à un béton à ciment portland et à base de granulats de laitier.

A long terme (un an de durcissement), le type de liant n'exerce pas d'influence considérable, par contre le type de granulat s'avère exerçant une grande influence.

Le ciment portland compense sa faible résistance à la traction par sa meilleure adhérence au granulat du laitier en comparaison avec le ciment au laitier, d'où l'obtention d'une résistance équivalente après un an de durcissement au béton basique.

6.5.2.3 La résistance mécanique à la traction par flexion

Cet essai consiste à rompre une éprouvette prismatique de côté a et de longueur $4a$ par application d'un moment de flexion dont $\frac{F.L}{4}$ (flexion à 3 points).

Lorsque l'on augmente progressivement la charge, on constate que la rupture se produit dans la zone du moment max, suivant un plan normal à l'axe longitudinal de ce prisme.

Les contraintes de traction sont représentés à la figure 6.30 mesurées après 28 jours et après un an du durcissement en milieu humide.

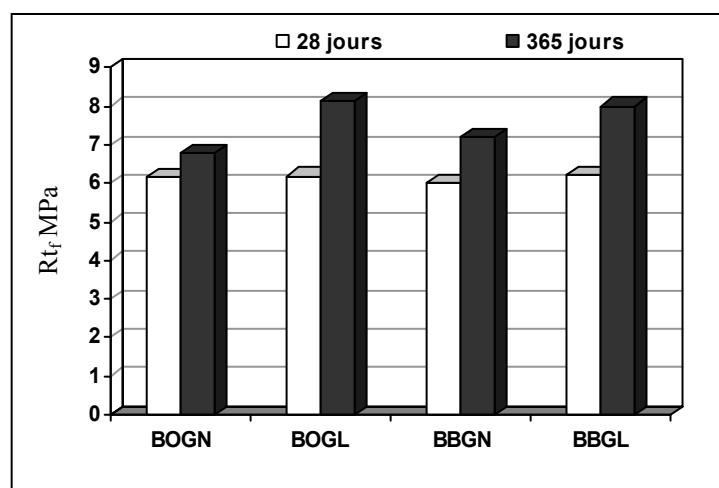


Figure 6.30 : Résistance à la traction par flexion en fonction des types des bétons.

En comparant les résistances obtenues en traction par flexion avec celles mesurées en traction par fendage, on s'aperçoit que ces dernières sont en général et en moyenne inférieure de 40 % environ par rapport aux premières.

Les remarques faites dans le cas de la traction par fendage restent les mêmes pour ce type de traction.

6.5.2.4 La déformabilité : (déformation des bétons)

Sous l'effet du chargement qui lui est appliquée, l'éprouvette de béton se déforme, il y a approximativement une proportionnalité entre la contrainte σ_c et la déformation ε_c , Soit E_c ce coefficient de proportionnalité : $\sigma_c = \varepsilon_c \cdot E_c$.

E_c : est appelé module d'élasticité.

Soit P_c la charge de rupture du béton étudié. Il s'agit d'appliquer des contraintes croissantes à une éprouvette de ce béton et de mesurer les déformations correspondantes jusqu'à une valeur $\sigma_c = 0,3 P_c$.

Il est alors possible de tracer la courbe $\sigma = P_c(\varepsilon_c)$ pour σ_c variant de 0 à $0,3 P_c$.

Dans cette partie d'étude, on détermine :

- l'évolution des déformations relatives totales.
- l'évolution des déformations relatives instantanées, avec l'augmentation de la contrainte relative.
- le module d'élasticité initial des bétons, et la variation du module de déformation avec l'augmentation de la contrainte relative.

Pour étudier l'effet du granulat du laitier sur la déformabilité du béton ordinaire et sur celle du béton basique, on a confectionné une série de prismes de 10x10x40 cm pour les différents types du béton chaque série comporte 3 échantillons.

Les essais en compression sont effectués après 6 mois de durcissement naturel (ces éprouvettes étant conservées dans l'eau), à l'aide d'une presse, suivant la méthode exposée par (Diceskie, 1976).

Les principales caractéristiques de déformation des bétons basiques sont fonction de :

- La composition du laitier.
- Le composant basique.
- Les conditions de durcissement.

Ces caractéristiques se situent essentiellement dans les limites propres du béton de ciment portland.

*. Description de l'équipement nécessaire

L'appareillage permettant de mesurer les déformations de l'éprouvette n'est pas normalisé, il en existe plusieurs types (Dupain et al, 2000). L'un d'entre eux est présenté sur la figure 6.32 et décrit ci-dessous :



Figure 6.31 : Préparation des éprouvettes



Figure 6.32 : l'emplacement des cadres et cadrans sur l'éprouvette.

L'éprouvette prismatique est équipée de deux cadres fixés par 4 pointeaux, qui sont installés sur une surface de 200 mm dans le sens longitudinal et de 10 mm dans le sens transversal.

La déformation est mesurée au moyen d'indicateurs à cadran ayant la valeur d'une division de 0,01 mm qui sont installés sur les cadres.

Une fois, sont fixés les cadres et leurs cadrans sur l'éprouvette, cette dernière sera centrée sur les plateaux de la presse comme pour un essai de rupture à la compression, voir la figure 6.33



Figure 6.33 : Les déformations mesurées pendant
La compression .



Figure 6.34 : éprouvette brisée par
Compression.

Selon les résultats des essais des prismes on va construire des graphiques présentant l'évolution de la relation entre le module de déformation du béton à la compression, les

déformations elasto–instantanées et relatives totales, du béton avec l'augmentation de la contrainte relative.

Au cours de l'étude en question, on a déterminé les valeurs du module de déformabilité des bétons pour des contraintes relatives différentes, la dépendance de ce module vis-à-vis de la contrainte relative est représentée à la figure 6.35.

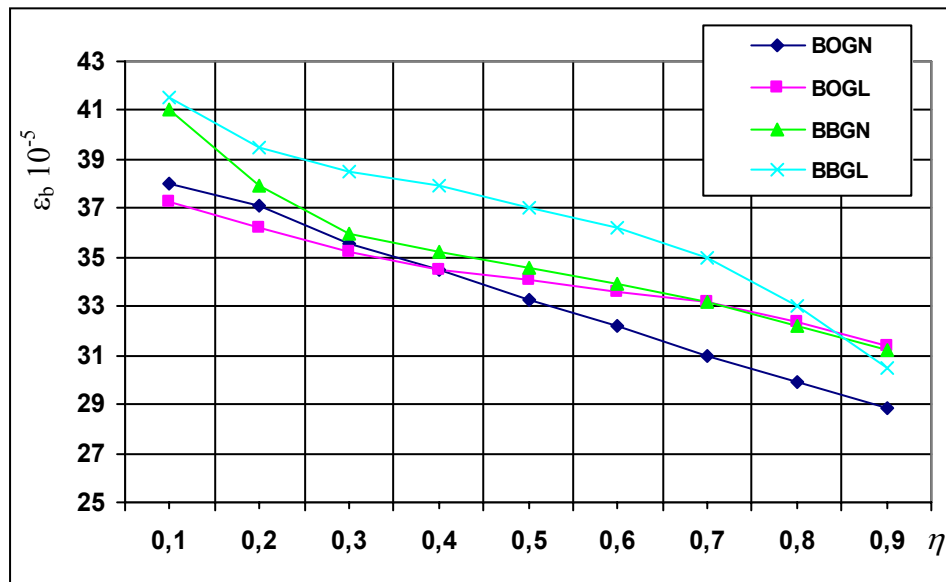


Figure 6.35 : Module de déformabilité du béton en fonction des contraintes relatives pour les séries de prismes BOGN, BOGL, BBGL, BBGN.

A partir de cette figure on remarque que le module de déformation diminue avec l'augmentation de la contrainte relative.

Le module de déformation du béton basique à base de granulats de laitier a été le plus élevé, et celui du béton ordinaire a été le plus bas.

Par contre celui du béton ordinaire à base de granulats naturels et celui du béton basique à granulats naturels sont limités par les modules de déformation des bétons précédents.

D'une manière générale, les bétons basiques présentent des modules de déformations plus élevés que ceux des bétons ordinaires, ce qui peut être expliqué par la compacité de ces bétons.

Le module de déformation du béton ordinaire à base des granulats du laitier, change d'allure en comparaison avec les autres types de bétons.

Dans l'intervalle des contraintes relatives (0,1 – 0,3) le module présente une diminution comparable à celle des autres types de béton, dans l'intervalle (0,3 – 0,6) Le

module de déformation ne varie pas considérablement avec l'augmentation des contraintes relatives. Au-delà de cet intervalle il est comparable aux autres types de béton.

Quand les contraintes de compression normales auront atteint leurs valeurs maximales, la destruction de l'éprouvette du béton porte un caractère fragile.

Les déformations élasto- instantanées longitudinales des différents types de béton (ε_{1el}) en fonction des contraintes relatives sont représentées à la figure 6.36.

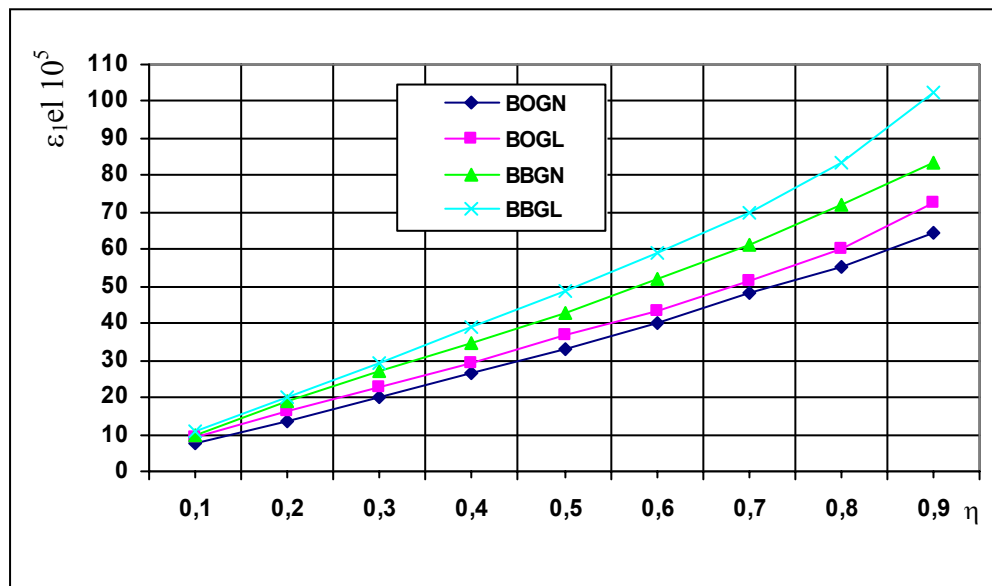


Figure 6.36 : Déformations élasto-instantanées longitudinales du béton ε_{1el} en fonction des contraintes relatives η pour les séries des prismes BOGN, BOGL, BBGN, BBGL.

A partir de la figure précédente, on voit que la nature du liant exerce une influence notable sur l'évolution des déformations élasto -instantanées pour une sollicitation de courte durée.

Les bétons basiques présentent des déformations élasto –instantanées plus élevées que celles déterminées pour les bétons ordinaires (à granulats naturels ou artificiels).

La nature des granulats (naturels ou artificiels) influe peu sur ces déformations.

Les déformations élasto – instantanées totales longitudinales (ε_{1t}) des différents bétons en fonction des contraintes relatives sont déterminées à la figure 6.37.

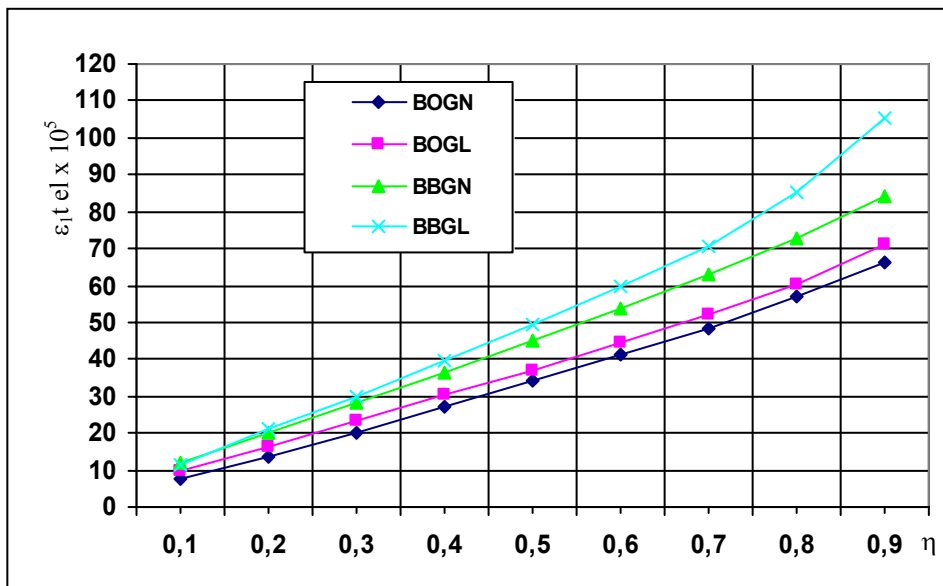


Figure 6.37 : Déformation élasto-instantanée totale longitudinale du béton ε_{el} en fonction des contraintes relatives η pour les séries des prismes BOGN, BOGL, BBGN, BBGL.

Les mêmes remarques précédentes restent valables.

A partir des deux figures précédentes, les déformations longitudinales les plus petites sont caractéristiques des bétons : BOGN, BOGL, BBGN et BBGL.

A partir des résultats obtenus, on détermine le module d'élasticité initial à la

compression à partir de la formule : $E = \frac{\sum \Delta \sigma}{\sum \Delta \varepsilon}$.

$\sum \Delta \sigma$: somme d'accroissement de la contrainte à chaque degré de 0,05 à 0,3P_c.

$\sum \Delta \varepsilon$: somme d'accroissement de la déformation élasto-instantanée longitudinale relative à chaque degré de la même gamme.

La figure 6.38 présente le module d'élasticité des différents bétons (BOGN, BOGL, BBGN et BBGL).

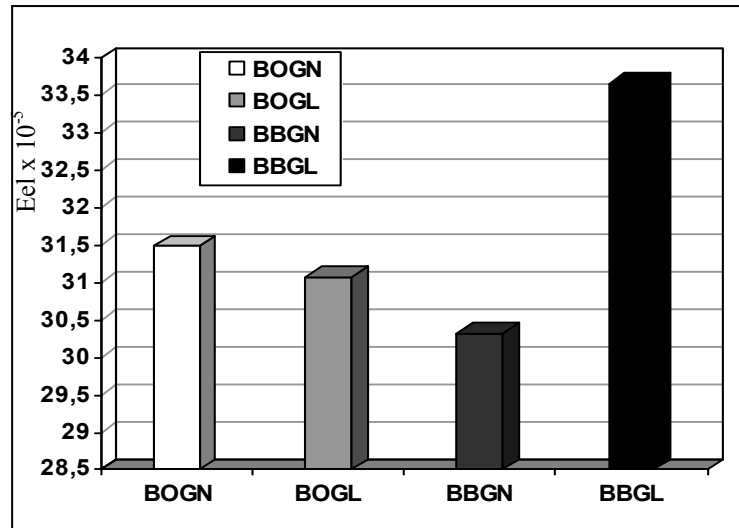


Figure 6.38 : Module d'élasticité des bétons BOGN, BOGL, BBGN et BBGL.

D'après (Mezghiche, 1989) le module d'élasticité du béton basique dépend essentiellement de la quantité du liant dans le béton.

Pour des dosages en liant de 250 Kg/m^3 la structure macrographique du matériau à un caractère discret. Pour un dosage de 340 à 350 kg/m^3 la structure macrographique représente un conglomérat broyé bien lié à l'agrégat avec des grains d'agrégats repartis régulièrement. La structure grossière des bétons avec une quantité élevée de liant par unité de volume ne diffère pas des deux cas précédents, sauf que les grains d'agrégats, malgré leur liaison excellente avec le liant hydraté se situent à une distance considérable les uns par rapport aux autres le liant occupe la plus grande partie du volume, d'où les caractéristiques de déformation seront affectées.

La figure 6.38 montre que le béton basique à base des granulats de laitier présente un module d'élasticité plus élevé par rapport aux autres types de béton, le béton ordinaire à base des granulats naturels ou artificiels présente presque le même module d'élasticité. Par contre le béton basique BBGN présente le plus bas module d'élasticité.

Revenant aux déformations élasto – instantanées transversales (ϵ_{2el}) et les déformations élasto – instantanées totales transversales ($\epsilon_{2t}el$) des différents bétons. Les résultats sont représentés au figures 6.39 et 6.40 respectivement.

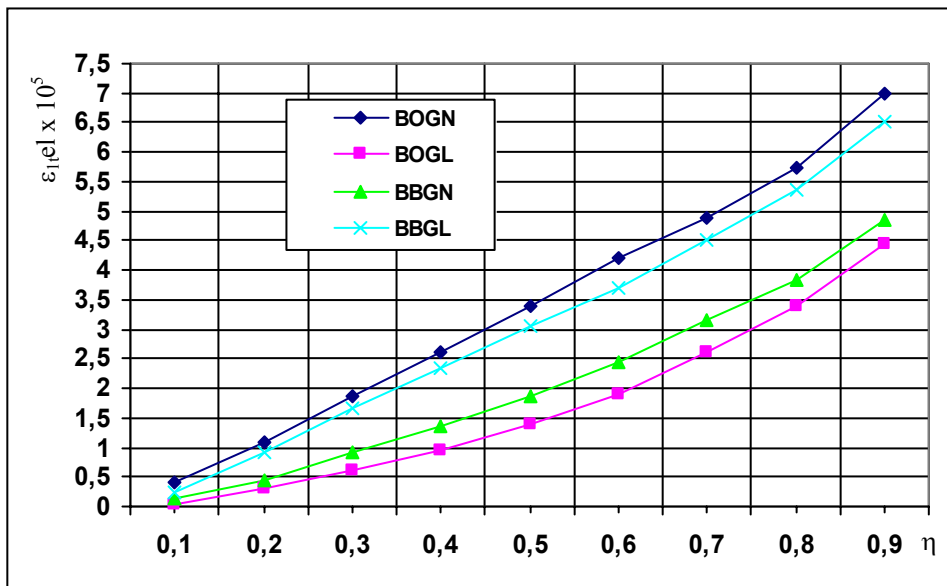


Figure 6.39 : Déformation élasto-instantanées transversales du béton $\varepsilon_{2t,el}$ en fonction des contraintes relatives η pour les séries des prismes BOGN, BOGL, BBGN, BBGL

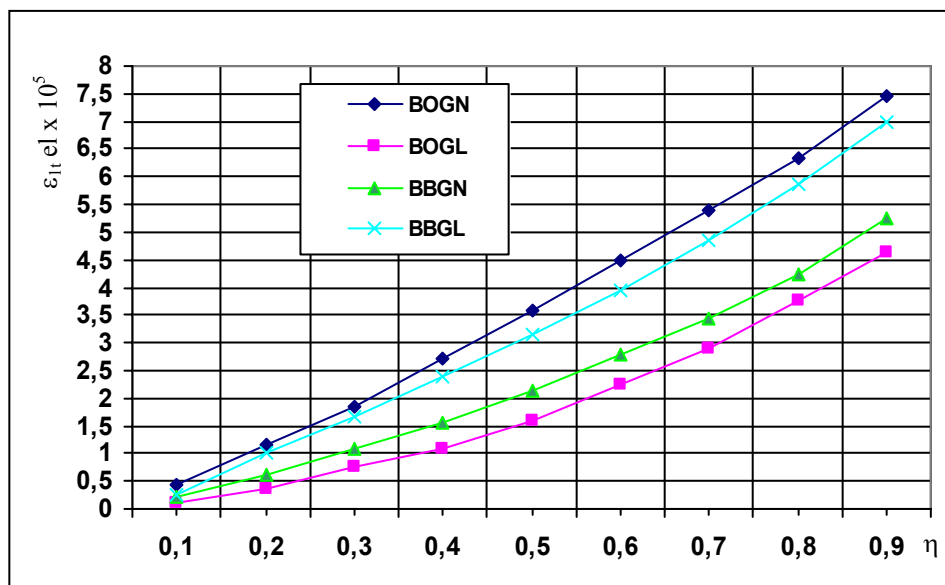


Figure 6.39 : Déformation élasto-instantanées totales transversales du béton $\varepsilon_{2t,el}$ en fonction des contraintes relatives η pour les séries des prismes BOGN, BOGL, BBGN, BBGL

A partir des deux figures précédentes, on remarque que le béton ordinaire (BOGN) a présenté des déformations transversales ($\varepsilon_{2t,el}$) et ($\varepsilon_{1t,el}$) plus élevées que les celles des autres types du béton contrairement aux déformations longitudinales ($\varepsilon_{1l,el}$) et ($\varepsilon_{2l,el}$) où il a présenté les plus basses déformations.

Les bétons basiques BBGN et BBGL ont gardé le même comportement (les déformations transversales présentent la même allure que celles longitudinales).

6.5.3 Validation de la méthode de Dreux Gorisse pour la formulation d'un béton basique

L'utilisation de la méthode de Dreux Gorisse pour déterminer la composition du béton à portland ne pose pas de problème, par contre son utilisation pour formuler un béton basique reste à valider.

Si on considère que la résistance mécanique à 28 jours de durcissement est le critère à valider, la méthode de formulation de béton basique exposée par (Mezghiche, 1989) permet d'avoir des résistances à la compression mesurées à partir de la rupture des éprouvettes cubiques (10x10x10 cm) de l'ordre de 29 MPa.

La méthode de Dreux Gorisse utilisée pour formuler le béton basique faisant l'objet de cette étude a donné une résistance à la compression égale à : 31 MPa à 28 jours de durcissement.

Nous remarquons que la résistance est presque du même ordre, donc la méthode de Dreux Gorisse peut être utilisée pour formuler de tels bétons.

6.5.4 La durabilité du béton durci

La durabilité des ouvrages en béton n'est pas une caractéristique mesurable, dont la maîtrise réglerait une durée d'utilisation. Pour connaître expérimentalement la durabilité du béton, il faut étudier comment il résiste vis-à-vis d'un certain nombre de mécanismes susceptibles de le dégrader.

Pour caractériser la qualité du béton, le premier critère à adapter est la résistance à la compression, qui est directement gouvernée par la porosité.

Cette partie d'étude traite divers aspects de la durabilité du béton notamment : son absorption, sa porosité, sa perméabilité à l'eau, l'action du milieu agressif et enfin l'action des hautes températures.

6.5.4.1 L'absorption du béton

L'absorption se mesure habituellement en faisant sécher une éprouvette de béton à masse constante, en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de masse exprimée en pourcentage de la masse sèche.

Pour les quatre types de béton, l'absorption est mesurée sur des éprouvettes cubiques de 10x10x10 cm.

Les résultats obtenus sont représentés à la figure 6.40.

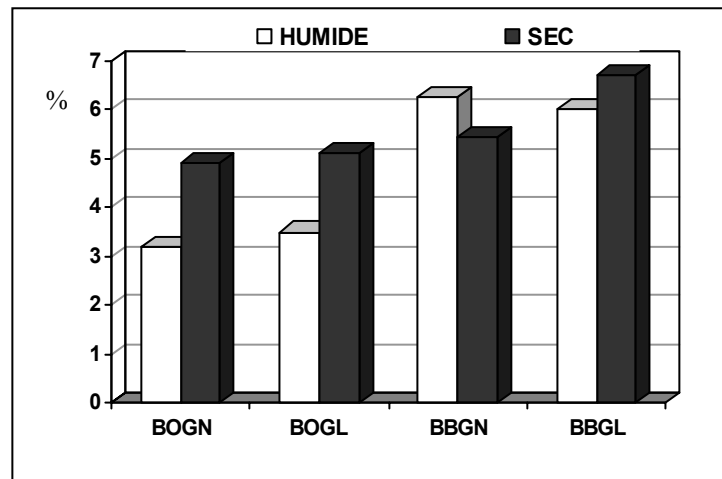


Figure 6.40: L'absorption des différents bétons en milieu humide et sec après 28 jours de durcissement.

L'absorption des bétons à ciment portland conservés à l'air est plus grande que celle du béton conservé dans l'eau.

Par contre dans les bétons basiques elle est presque du même ordre mais restant toujours inférieure à 10 % en masse (ce qui caractérise la bonne qualité des bétons). Au-delà de 28 jours de durcissement l'absorption des bétons basiques gardés humides a diminué considérablement ce qui est lié au développement de structure interne de ce type de béton.

La figure 6.41 présente l'absorption après un an de durcissement.

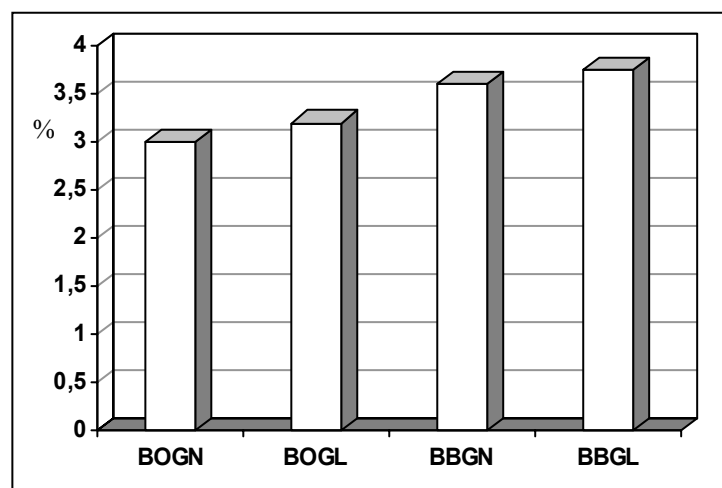


Figure 6.41 : L'absorption après un an de durcissement en milieu humide.

Peu d'influence est exercée par le type de granulat sur l'absorption, du béton, mais il reste à signaler que les bétons à portland présentent une absorption inférieure à celle des bétons basiques.

6.5.4.2 La porosité du béton

Le béton est constitué par les différents granulats fins et gros et le ciment hydraté avec des proportions bien déterminées. Le volume total des pores est la somme des porosités des gros granulats, du sable, de la pâte de ciment ainsi que le volume d'air entraîné dans le béton. Quand les silicates anhydres des grains de ciment entrent en contact avec l'eau, leur hydratation commence toujours par une mise en solution. En d'autres termes, la phase liquide se sature avec différents ions qui se combinent pour former les différents produits d'hydratation qui commencent à occuper une partie de l'espace originalement occupé par l'eau, au fur et à mesure que l'hydratation se développe et que la taille des pores capillaires diminue, les mouvements de l'eau dans le système deviennent de plus en plus difficiles. En n'importe quel temps durant la réaction d'hydratation, les espaces non remplis par les produits solides (hydrates et particules de ciment anhydre) pourront être considérés comme des vides ou des prés capillaires.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour estimer la porosité : l'intrusion du mercure, où par la méthode de déplacement du méthanol où l'hélium (Mellas, 2003).

La méthode utilisée dans ce test est celle établie par ASTM désignation C642. (Bencheikh, 2003)

La méthode consiste à faire sécher les éprouvettes dans une étuve à 105°C pendant au moins 24 heures jusqu'à obtention d'une masse constante. Il faut ensuite procéder à une immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures. En dernier lieu il faut faire chauffer l'échantillon jusqu'à ébullition pendant 5 heures. Les éprouvettes sont retirées pour être pesées à l'air et dans l'eau (pesée hydrostatique).

La porosité est déterminée par :

$$V_p = \frac{C - A}{C - D} \times 100$$

où : A : poids de l'échantillon sec (après étuvage).

C : poids à l'air après immersion et ébullition.

D : poids à l'eau après immersion et ébullition.

La porosité est mesurée sur des éprouvettes cubiques (10x10x10)cm après 28 jours de durcissement. Les résultats sont représentés à la figure 6.42.

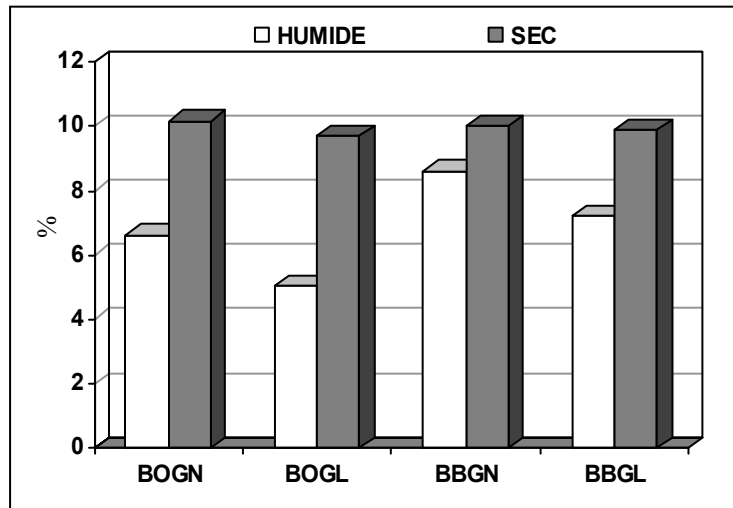


Figure 6.42 : porosité des différents bétons après 28 jours de durcissement humide et sec.

Dans le béton à portland, la porosité des éprouvettes conservées à l'air est plus grande de 45 % que celle du béton humide du fait que le béton conservé à l'air est plus sensible à la création des pores et des pores connectés.

Le béton à base de granulats de laitier cristallisé présente moins de pores qu'un béton ordinaire (à base de granulats naturels) ce qui est expliqué par la qualité élevée de l'interface pâte –granulats (en général la porosité du béton courant est plus élevée à l'interface pâte –granulats). (laarbi,1993). La figure 6.43 présente cette zone de transition (interface pâte-granulat).

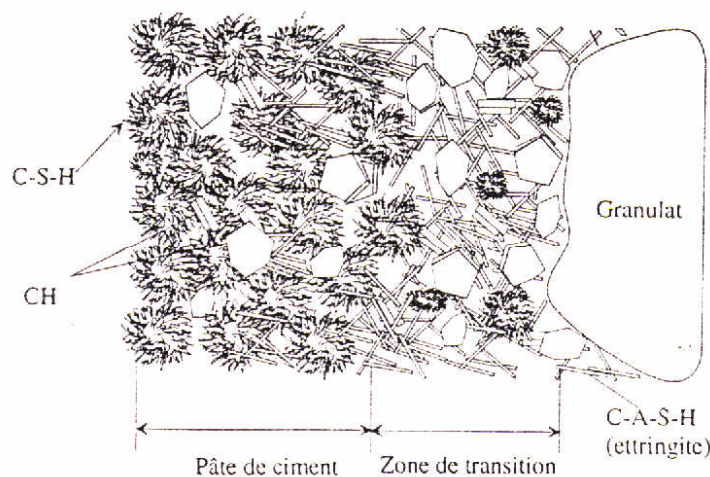


Figure 6.43 : Zone de transition (Chanvillard, 2000)

Le béton basique présente une porosité peu différente à 28 jours de durcissement dans les deux milieux (sec et humide), ce qui est lié aux causes présentées précédemment.

Par contre après un an de durcissement, la porosité diminue considérablement pour atteindre les valeurs représentées à la figure 6.44.

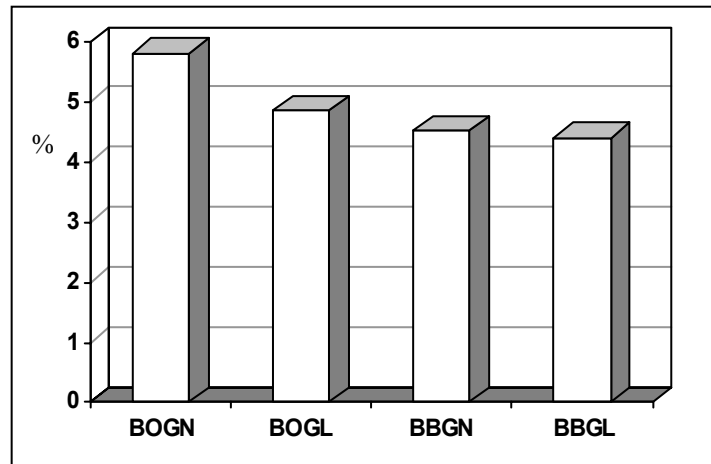


Figure 6.44 : porosité des différents bétons après un an de durcissement humide.

Les bétons basiques améliorent leur porosité à long terme (un an de durcissement) se qui confirme la continuité des réactions d'hydratation, conduisant ainsi au développement de la structure interne de ces bétons par la production de nouveaux produits d'hydratation qui précipitent pour fermer les vides et les pores déjà existant dans la structure.

Les deux photos suivantes présentent l'état de structure interne, des bétons basique et ordinaire elles étaient prises lors de l'essai de flexion effectué sur des éprouvettes prismatiques après un an de durcissement.

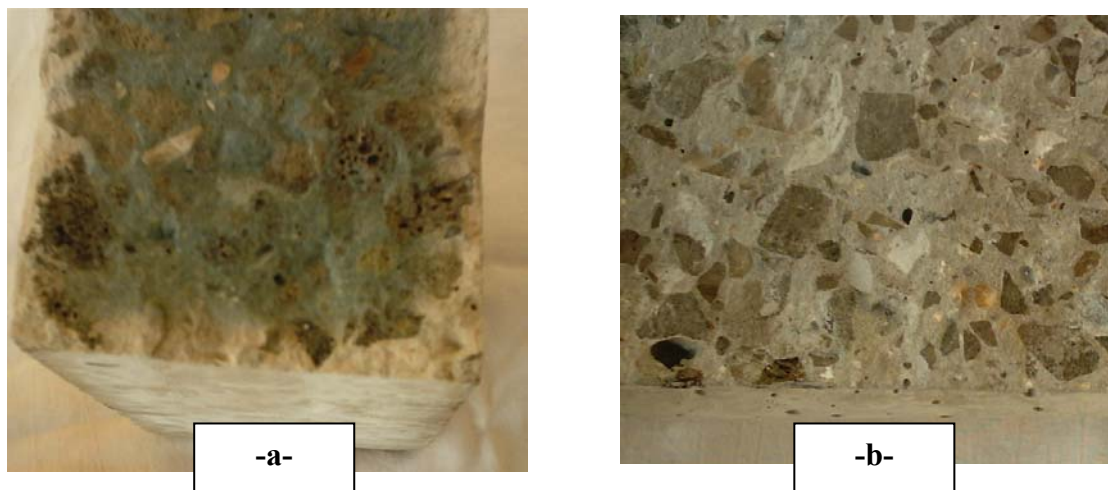


Figure 6.45 : La couleur du fond des différents bétons. (a : béton basique, b : béton ordinaire).

La différence de la couleur du fond est très nette, celle du béton basique est foncée, se qui traduit la continuité des réactions d'hydratation.

6.5.4.3 La perméabilité du béton

Généralement, la perméabilité de la pâte durcie qui exerce la plus grande influence sur la perméabilité du béton.

Les granulats peuvent contenir des pores, mais habituellement ceux-ci ne sont pas interconnectés, de plus les granulats sont enrobés par la pâte de ciment de sorte que les pores des granulats ne participent pas à la perméabilité du béton. (Neville, 2000)

La perméabilité est calculée par application de la loi de Darcy : $Q=A.K.i$

Q : étant le débit volumique.

A : section traversée par l'eau.

i : gradient hydraulique à travers l'échantillon.

k : coefficient de perméabilité.

Le coefficient de perméabilité est une caractéristique intrinsèque du matériau dans la mesure où un certain nombre de condition sont remplies :

- Le matériau doit être saturé par de l'eau désaérée.
- La température de l'eau doit être constante.
- Il n'existe pas d'interactions physiques où chimiques entre l'eau et les composants du béton.

La perméabilité est mesurée sur des éprouvettes cylindriques (16x16 cm) après 6 mois de durcissement en milieu humide.

Les résultats obtenus sont représentés à la figure 6.46.

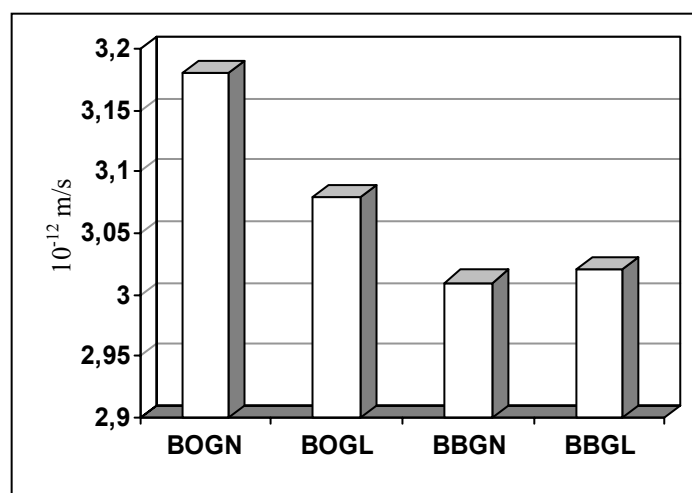


Figure 6.46: La perméabilité des différents bétons après 6 mois de durcissement.

Les résultats obtenus sont presque du même ordre, une légère amélioration est obtenue pour les bétons à base de granulats de laitier ce qui est lié à la qualité élevée de

l'interface pâte –granulats, qui empêche l'écoulement autour des granulats. (Zeghichi, 2005c).

6.5.4.4 Action du milieu agressif

A partir de l'étude de la pâte de ciment, le milieu le plus agressif au ciment était le HCL (0,1 %).

Les éprouvettes cubiques représentant les différents types des bétons sont immergées dans une solution renfermant 0,1 % de HCl pendant une durée d'un an.

Les éprouvettes sont immergées dès l'âge de 28 jours de durcissement en milieu humide.

Les critères à vérifier sont la perte de masse et la perte de résistance.

Après un an d'exposition au milieu agressif, les éprouvettes ont changé de couleur, celles du laitier étaient de couleur bleues sont devenues verdâtres, celles du ciment portland sont devenues claires (presque blanchâtres).

a. L'influence du milieu agressif sur la masse du béton

Dans l'intervalle du temps présentant le premier jours de l'immersion dans le milieu agressif à l'âge d'un an d'immersion, les éprouvettes sont pesées au différentes échéances, 45 jours d'immersion, 150, 180 jours, et 365 jours d'immersion.

Les figures (6.38, 6.39, 6.40 et 6.41) présentent l'évolution de la masse des différents types de béton dans cet intervalle de temps.

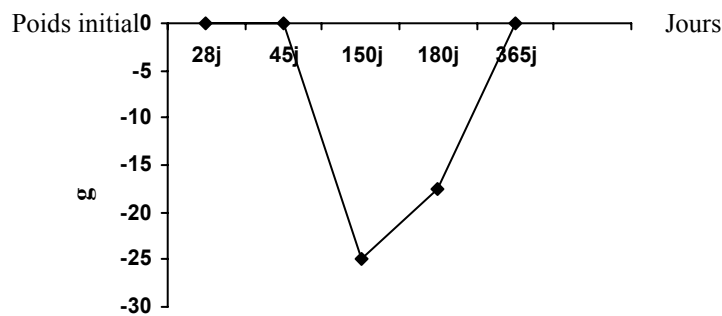


Figure 6.47 : Variation de la masse d'un béton ordinaire. (BOGN)

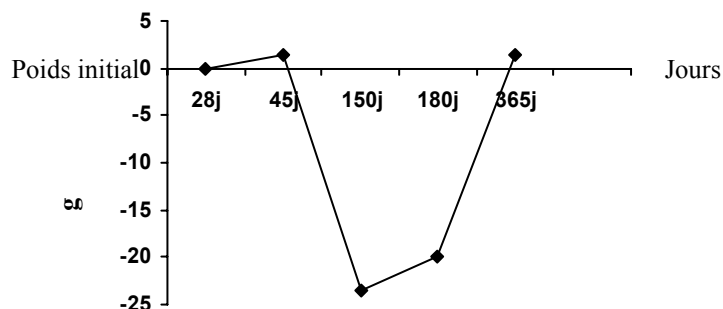


Figure 6.48 : Variation de la masse d'un béton ordinaire à base de granulats de laitier. (BOGL)

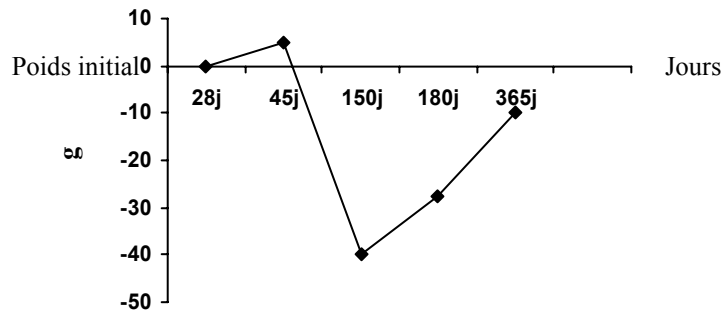


Figure 6.49 : Variation de la masse d'un béton basique à base de granulats naturels. BBGN.

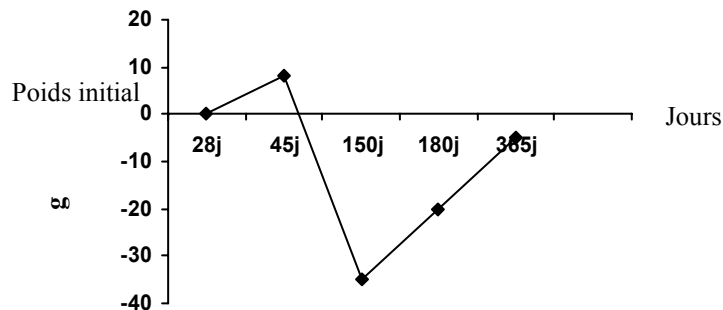


Figure 6.50 : Variation de la masse d'un béton basique à base de granulats de laitier. BBGL.

A partir des figures présentées, la variation de la masse est de la même allure pour les différents types des bétons, une légère augmentation après leur immersion dans le milieu agressif jusqu'à une durée de 45 jours, une forte perte de masse est signalée après 5 mois d'immersion, vers une année d'immersion la masse augmente pour récupérer sa masse initiale. La perte de masse est plus élevée dans les bétons basiques que ceux à ciment portland composé.

b. L'influence du milieu agressif sur la résistance du béton

Après un an d'immersion dans un milieu (0,1 % HCl) les éprouvettes sont séchées puis écrasés en compression.

Les résultats obtenus sont illustrés à la figure 6.51 :

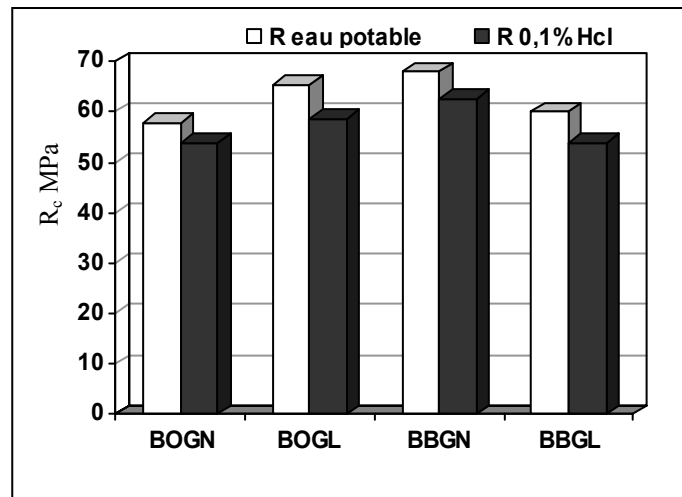


Figure 6.51 : résistance des différents bétons au milieu agressif.

Le milieu agressif (0,1 % HCl) influence les différents types du béton (ordinaire ou basique), toute une légère différence est remarquée concernant la nature des granulats utilisés : le milieu agressif affecte légèrement les bétons à base de granulats de laitier cristallisé. La perte de résistance des différents bétons est représentée sur le tableau 6.5.

Tableau 6.5 : perte de résistance (en %) dans les différents types de bétons.

Types des bétons	BOGN	BOGL	BBGN	BBGL
Résistance (eau potable) MPa	58	65.5	68	60
Résistance (milieu agressif) MPa	54	58.5	62.5	54
Perte de résistance, %	7	10.50	8	10

6.5.4.5 Action des fortes températures

Le comportement aux fortes températures varie avec la nature des granulats, leur coefficient de dilatation, leur porosité et leur teneur en eau (dans le cas des granulats poreux). Les granulats calcaires commencent à se décomposer à 600°C. la réaction bien connue est la suivante :



Les granulats siliceux qui contiennent du quartz se transforment en augmentant de volume.

En effet vers 575°C, le quartz change de structure cristalline en passant de la forme α à la forme β .

Certains granulats des roches ignées (basalte, pouzzolane) résistent bien à des températures modérées et jusqu'à 300°C et parfois 900°C.

Il est de même avec les granulats artificiels suivants : laitier vitreux granulé du haut fourneau, laitier cristallisé concassé, morceaux concassés de briques. (Léa, 1971)

Lors de l'élévation de la température, les résistances en compression du béton croissent d'abord légèrement de 100° à 200°C. à partir de 200°C environ la baisse de résistance est proportionnelle à l'élévation de la température. Corrélativement, le module de déformation se baisse.

Afin d'étudier l'effet des hautes températures sur les différents types de béton qu'on a confectionné, nous avons exposé des éprouvettes cubiques (10x10x10 cm) à des températures de l'ordre de 600°C, 900°C et 1000°C respectivement pendant 2 heures, (on note ici que la montée de la température à 600°C est atteinte dans un délai d'une demi heure et celles à 900°C et à 1000°C sont atteintes après 1heure d'exposition), ce qui est lié à la conductivité thermique du béton qui est faible de l'ordre de 1,4 k.cal/m.h.°C. Cet essai est effectué dans un four électrique représenté à la figure 6.52.



Figure 6.52 : Le four électrique.

Les températures sont réglables (la durée, la température désirée), la température maximale est de l'ordre de 1500°C.

a. L'influence des hautes températures sur la masse du béton

Les éprouvettes cubiques conservées dans l'eau pendant un an de durcissement, ont été pesées d'abord, ensuite elles sont exposées aux fortes températures 600°C et 900°C. Le taux de la diminution de la masse des éprouvettes est représenté sur la figure 6.53.

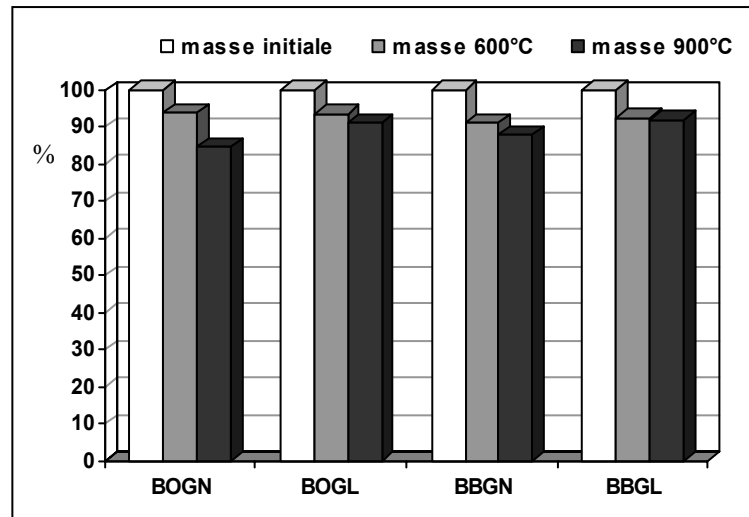


Figure 6.53 : le taux de diminution de la masse des différents bétons à 600°C et 900°C.

On considère en pratique que, jusqu'à une température de 350°C environ (sans choc thermique) les modifications des propriétés des bétons sont minimales. La pâte pure de ciment se déshydrate, prend du retrait, les granulats s'expansent.

La perte de poids est liée à la déshydratation du ciment, à 600°C cette perte est du même ordre pour les différents types de béton estimée à 6 % de la masse initiale. Par contre à une température de 900°C, la perte de masse reste du même ordre que celle mesurée à 600°C pour les bétons à base de granulats de laitier (béton ordinaire, béton basique). Par contre la perte est de 15,3 % pour un béton ordinaire (à base de granulats naturels) et de 13,2 % pour un béton basique à granulats naturels, ce qui est lié à la décomposition des granulats naturels.

La figure 6.54 présente des coupes dans les bétons ordinaires (BOGN et BOGL) et les bétons basiques (BBGN et BBGL) chauffés à 900°C.

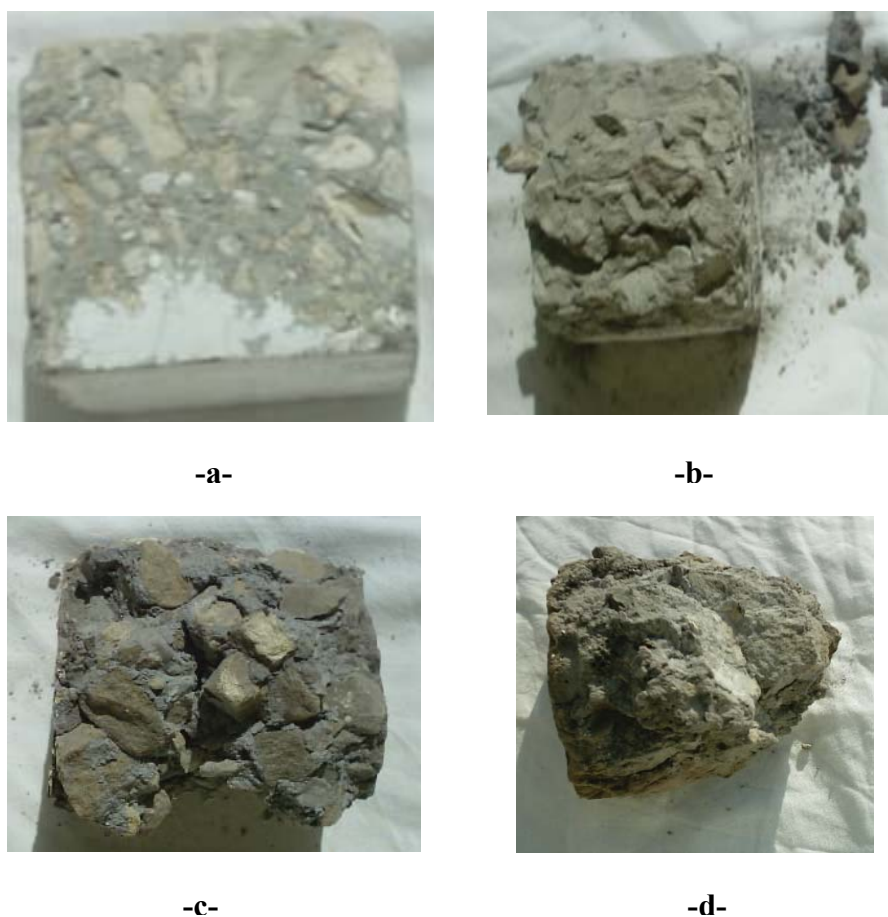


Figure 6.54 : état des granulats des bétons chauffés.

a : béton ordinaire (BOGN).

b : béton ordinaire (BOGL).

c : béton basique (BBGN).

d : béton basique (BBGL).

A partir de ces figures on remarque le changement de la teinte (couleur) des granulats naturels du gris au jaune ceux du laitier n'ont pas changé de couleur. Par contre le ciment du laitier activé a changé de couleur du noir vers le violet.

La couleur du ciment portland c'est transformée du gris foncé au gris clair.

b. L'influence des hautes températures sur la résistance du béton

La résistance mécanique en compression du béton exposé aux fortes températures (600°C et 900°C) est mesurée par rupture en comparaison des éprouvettes cubiques chauffées. Avant de présenter les résultats obtenus, la figure 6.55 illustre l'aspect des éprouvettes traitées à hautes températures 1000°C.

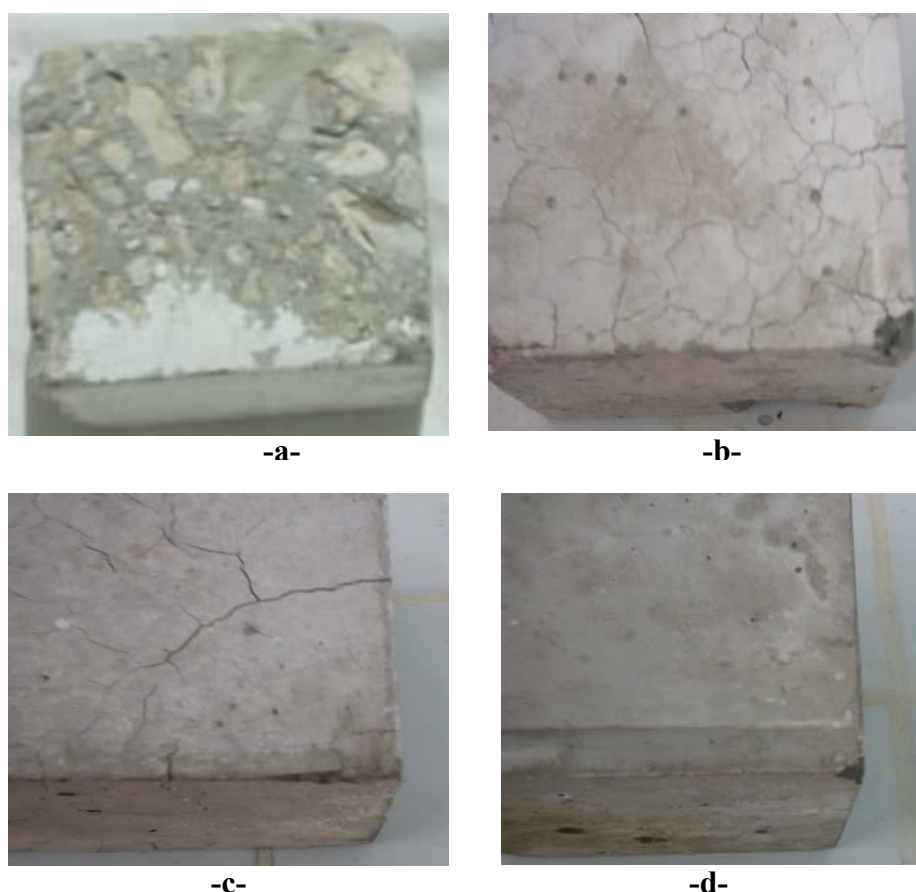


Figure 6.55 : état de surfaces des éprouvettes des bétons chauffés

a : béton ordinaire (BOGN).

b : béton ordinaire (BOGL).

c : béton basique (BBGN).

d : béton basique (BBGL).

Dans le béton à base de granulats naturels, la partie superficielle est détruite complètement, par contre le béton à base de granulats de laitier présente des fissures superficielles horizontales (à cause des contraintes internes), ces fissures s'agrandissent au refroidissement.

Le béton basique à base de granulats naturels présente une fissure superficielle profonde en comparaison avec le béton à ciment portland composé (BOGL).

Tandis que le béton basique à granulats du laitier (BBGL) garde son état de surface intact.

En comparant l'état des bétons étudiés chauffés au béton à base d'un liant à la fumée de silice étudié par (Jaknoun, 2005) qui est représenté à la figure 6.56, on remarque l'effet néfaste des hautes températures sur ces types de bétons classés comme bétons à haute performance.



Figure 6.56 : Etat d'un béton chauffé (900°C) à base d'un liant à la fumée de silice. (Jaknoun, 2005).

Selon (Pakker, 1959) et (Léa, 1971), des études faites sur le comportement des bétons de laitier cristallisé au feu, montrent leur remarquables résistance au feu, se qui est confirmé par les résultats obtenus à partir de notre étude, et qui sont représentés à la figure 6.57.

La figure 6.57 illustre la résistance à la compression des différents bétons chauffés.

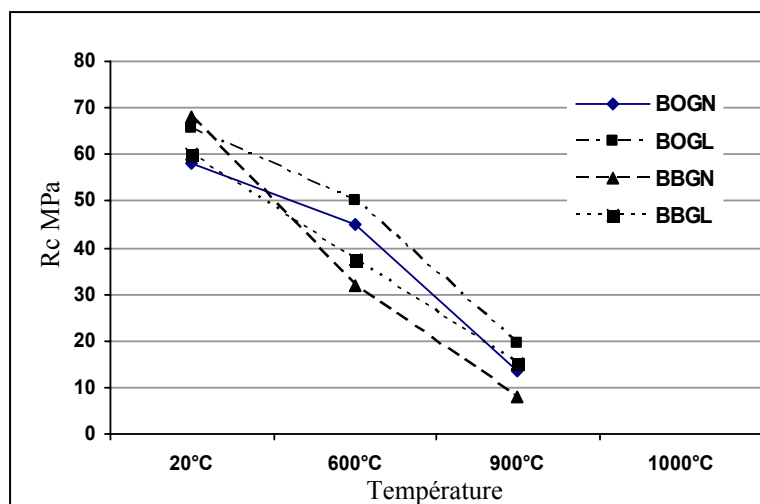


Figure 6.57: Résistance à la compression des bétons chauffés.

La baisse de la résistance est proportionnelle à l'élévation de la température.

Le tableau 6.6 illustre la perte de résistance des bétons chauffés par rapport à leur résistance mesurée à 20°C (on considère que cette résistance présente 100 %).

Tableau 6.6 : Perte de résistance des bétons chauffés.

Températures	BOGN	BOGL	BBGN	BBGL
20°C	100 %	100 %	100 %	100 %
600°C	23,66 %	22,5 %	52 %	37,5 %
900°C	76,50 %	70 %	88 %	75 %

La perte de la résistance à 600°C est estimée à 25 % pour le béton à portland, par contre elle est de l'ordre 52 % pour un béton basique à base de granulats naturels, et de 37,5 % pour un béton basique à base de granulats de laitier. Ce qui est expliqué par la destruction des constituants hydratés du ciment au laitier activé. L'utilisation des granulats de laitier compense la fragilité du ciment au laitier aux fortes températures.

A 900°C, le béton confectionné à partir des granulats de laitier perd 70 % à 75 % de sa résistance par rapport à sa résistance à 20°C, ce qui est lié à la qualité des granulats de laitier, par contre le béton basique à base de granulats naturels perd presque 90 % de sa résistance.

Au-delà de 900°C, les éprouvettes sont endommagées.

On note aussi que la dégradation des bétons basiques est remarquée dès que la température atteint les 600°C, mais ils restent capables de supporter des températures de plus en plus élevées, jusqu'à ce qu'ils atteignent le même taux de perte de résistance que les bétons ordinaires, ce qui nous permet de conclure que les bétons basiques sont ductiles face aux hautes températures.

6.5.5 L'interface pâte- granulat

Lorsque l'on examine à l'œil nu la surface de rupture d'une éprouvette de béton usuel soumise à un effort de compression uni axiale, on s'aperçoit que la rupture se développe soit dans le mortier où le long de l'interface entre le mortier et les gros granulats (cette zone qui constitue le point faible d'un béton usuel) où encore si le béton contient des granulats faibles, les plans de rupture se propagent à travers ces granulats.

Il faut porter une attention particulière à l'interface pâte – granulat, en effet, au voisinage de cette interface les mécanismes d'hydratation sont modifiés dès le début des réactions à cause de la présence d'un excès d'eau, il en résulte une augmentation locale du volume des pores.

Ces modifications microstructurales peuvent se traduire par une augmentation de la perméabilité à l'eau.

Pour examiner l'état de l'interface mortier granulat des différents bétons étudiés, nous avons procédé à un agrandissement (x 200 fois) des échantillons à partir d'un microscope électronique.

Les photos obtenues sont illustrées aux figures 6.58 à 6.63.

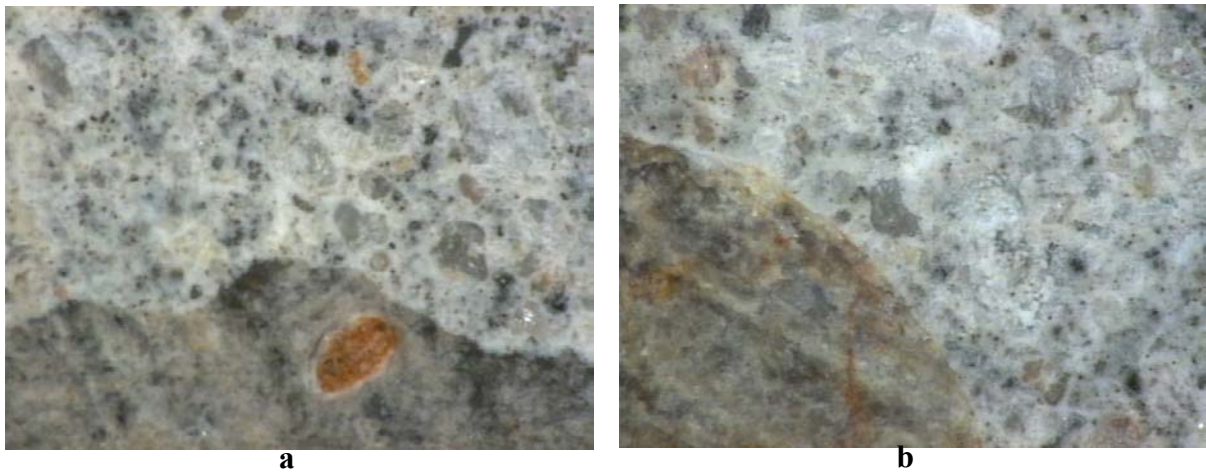


Figure 6.58 : Etat de l'interface mortier – granulat d'un béton ordinaire à granulat naturel (BOGN). (a et b)



Figure 6.59 : L'interface mortier – granulat d'un béton à portland au laitier cristallisé (BOGL).

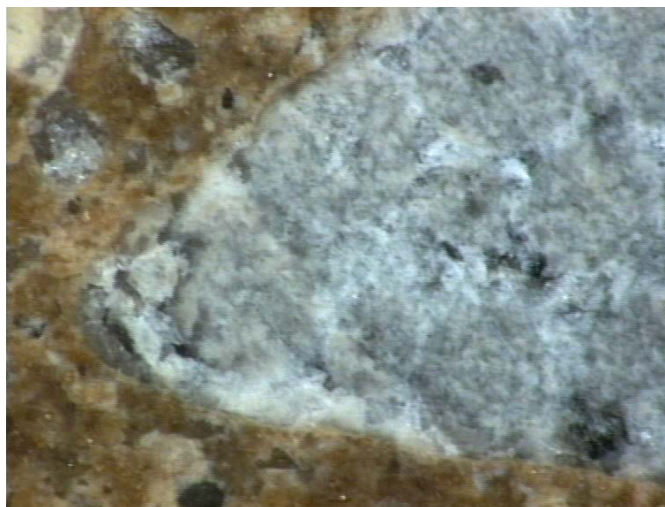


Figure 6.60 : Interface mortier – granulat d'un béton basique à granulat naturel (BBGN)

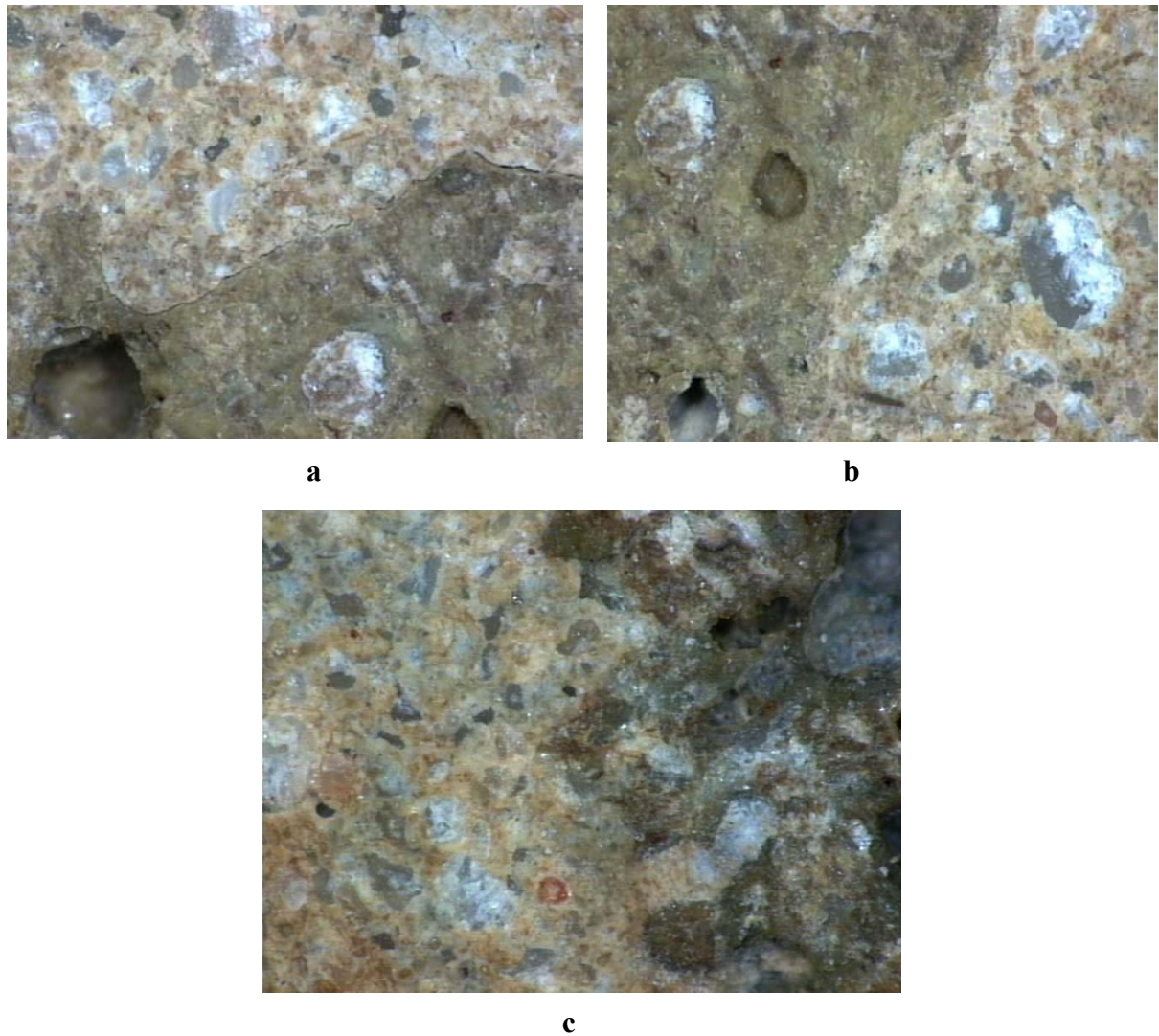


Figure 6.61 : Etat de l'interface mortier – granulat d'un béton basique au laitier Cristallisé (BBGN). (a – b – c)

A partir des figures précédentes, nous remarquons l'effet de l'activation alcaline sur les bétons au laitiers, les particules du sable sont brillantes, la pâte de ciment est de couleur très foncée. Tandis que dans les bétons ordinaires ils ont gardés leurs couleurs d'origine.

Grâce au aspérités du laitier cristallisé, et sa forme, une meilleure adhérence entre le mortier et le granulat est assurée dans les deux bétons (ordinaire où basique).

La liaison entre le mortier et les granulats dans les deux types de bétons basique et ordinaire est représentée à la figure 6.62.



Béton Basique

Béton ordinaire

Figure 6.62 : L'interface mortier – et deux granulat des différents bétons.

Dans le béton basique les particules de sable et les grains du laitier cristallisé brillent à cause de la formation de la silice sur la surface, ce qui est illustré à la figure 6.63



Figure 6.63 : Un grain du laitier cristallisé dans un béton basique.

6.6 CONCLUSION

Nous avons étudié dans cette partie l'influence des différents types de granulats sur les propriétés du béton basique à l'état frais (ouvrabilité) et à l'état durci (résistance et durabilité). En fait, il s'agit d'une étude comparative entre une variété de bétons qu'on a formulé :

- Un béton ordinaire à portland servant comme un béton de référence (témoin).
- Un béton basique au laitier activé faisant l'objet de cette étude.

Pour étudier l'influence des différents granulats sur le comportement des deux types de béton, on a utilisé pour leur confection des granulats silico- calcaires, et des granulats artificiels (ceux du laitier cristallisé).

Nous avons étudié également l'influence du remplacement des granulats naturels fins par du laitier granulé sur l'ouvrabilité et la résistance du béton, de même l'influence du remplacement des granulats naturels grossiers par du laitier cristallisé.

Nous avons montré qu'on a un intérêt à utiliser le laitier cristallisé au remplacement des granulats naturels grossiers que de remplacer les granulats fins par du laitier granulé. L'utilisation des granulats de laitier cristallisé pour la confection des bétons ordinaires présentent plusieurs avantages (économiques, écologiques et techniques).

Certes le coté économique et écologique seront bénéficiaires de notre étude, mais nous montrons les avantages portés sur le coté technique seulement :

- La plasticité des bétons était diminuée par l'introduction du laitier cristallisé, nous avons montré comment ce phénomène pouvait être lié à la structure macroscopique des grains.
- Les résistances à la traction étaient d'autant plus élevées que celles du béton contenant les granulats naturels. Nous avons montré que cet accroissement de la valeur de la résistance à la traction pouvait s'expliquer surtout par l'excellent accrochage mécanique entre les grains de laitier et la pâte de ciment hydratée et aussi partiellement par les accolements epitaxiques entre les cristaux de portlandite libérée lors de l'hydratation du ciment.
- Les résistances à la compression étaient d'autant plus élevées que l'âge des éprouvettes augmente ce qui peut s'expliquer par l'excellente adhérence entre la pâte et les granulats du laitier.
- Un module d'élasticité comparable à celui d'un béton ordinaire (BOGN), et un module de déformabilité assez élevé dans l'intervalle des contraintes croissantes (0.3 – 0.9) par rapport à celui du béton ordinaire (BOGN).
- Des déformations élasto – instantanées longitudinales et transversales un peu inférieures à celles déterminées dans un béton ordinaire (BOGN).
- Une porosité et une imperméabilité meilleures en comparaison avec celles du béton ordinaire, ce qui peut être expliqué par la qualité élevée de l'interface pâte- granulats.
- Un peu plus d'influence du milieu agressif est remarquée sur la résistance des bétons ordinaires à base du laitier cristallisé en comparaison avec ceux à granulats naturels.
- Une résistance considérable vis-à-vis des hautes températures (600°C à 900°C) en comparaison avec le béton ordinaire. (BOGN).

Pour formuler le béton basique, nous avons proposé la méthode simplifiée dite méthode de Dreux Gorisse modifiée, en gardant toutes les données concernant la formulation du béton ordinaire (sauf que l'activité de ciment n'étant pas la même).

L'influence des granulats du laitier cristallisé sur le comportement rhéologique et mécanique du béton basique est évidente d'une manière assez comparable à leur effet sur le béton ordinaire.

En effet, composé de plus de 90 % d'oxydes de calcium, de silicium, d'aluminium, de magnésium et étant légèrement basique, il a une affinité marquée pour les liants hydrauliques qui se manifeste tout spécialement pour les liants hydrauliques et pour le laitier granulé de même composition chimique. La basicité du laitier cristallisé facilite par ailleurs, la prise du laitier avec lequel il est mélangé. Son effet se combine aux effets de l'activation alcaline du laitier finement broyé, pour améliorer certains propriétés du béton basique notamment :

- La résistance mécanique en compression à court terme en comparaison avec un béton basique à granulats naturels (BBGN).
- La résistance mécanique en compression, dans le cas de l'accélération du durcissement par étuvage après un jour et 28 jours de durcissement.
- La résistance mécanique en traction (notant ici le rôle de la forme et de la texture des granulats du laitier cristallisé sur l'adhérence entre la pâte hydratée et le granulat).
- Le module d'élasticité assez élevé en comparaison avec les autres types de bétons (BOGN, BOGL et BBGN) il présente une augmentation de 10 % par rapport au béton basique à granulats naturels et de 6.30 % par rapport du béton ordinaire, le module de déformabilité présente des valeurs très élevés en comparaison avec les autres types de béton. Les déformations élasto – instantanées (longitudinales et transversales) restent du même ordre.
- La porosité est nettement améliorée après un an de durcissement, ce qui peut s'expliquer par l'hydratation du laitier qui continue dans le temps. Les nouveaux produits d'hydratation vont remplir les pores existant déjà dans la pâte.
- Une surface qui reste intacte, et un comportement ductile est remarqué face aux hautes températures en comparaison avec les autres types de bétons (BOGN, BOGL et BBGN).
- Une structure qui diffère des autres types de béton caractérisée par la précipitation d'une silice brillante sur le granulat du laitier cristallisé.
- Le laitier cristallisé à El Hadjar présente donc des caractéristiques nécessaires pour être un excellent granulat à mortier et à béton (ordinaire et basique).