

Chapitre II Béton à hautes performances

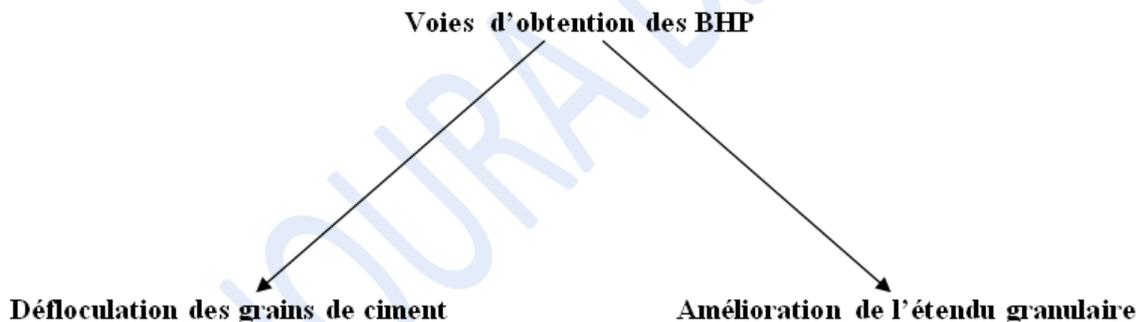
Introduction

- Les Bétons à Hautes Performances (BHP) ont d'abord été utilisés pour leur haute résistance. Cette caractéristique facilement mesurable a fait des progrès spectaculaires à partir des années quatre-vingt. Elle est passée de 30/35 MPa à plus de 100 MPa pour les bétons à très hautes performances, voire plus (150 à 200 MPa pour des bétons fibrés à ultra hautes performances, BFUP).

- Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons mais aussi plusieurs qualités sont bien améliorées en particulier leur microstructure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté

I-1 Les voies d'obtention des bétons à hautes performances

Dans les perspectives d'améliorer les propriétés constrictives du béton, différents chercheurs se sont attachés à explorer les voies visant à formuler un béton de très haute compacité grâce à l'utilisation des constituants de qualité et avec réduction maximale du dosage en eau deux voies de natures physico-chimique différentes se sont dégagées pour obtenir des hautes performances :



I-1-1 défloculation des grains de ciment obtenue grâce à l'utilisation de super plastifiants (formaldéhyde et mélamine sulfonates ou formaldéhyde naphthalène sulfonates) ce qui conduit à une réduction sensible de la quantité d'eau de gâchage.

. L'action des superplastifiants

L'effet de ces adjuvants est de rendre le béton nettement plus maniable, sans ajouter d'eau. La surface de chaque grain de ciment contient des charges électriques libres. Les charges opposées s'attirent mutuellement

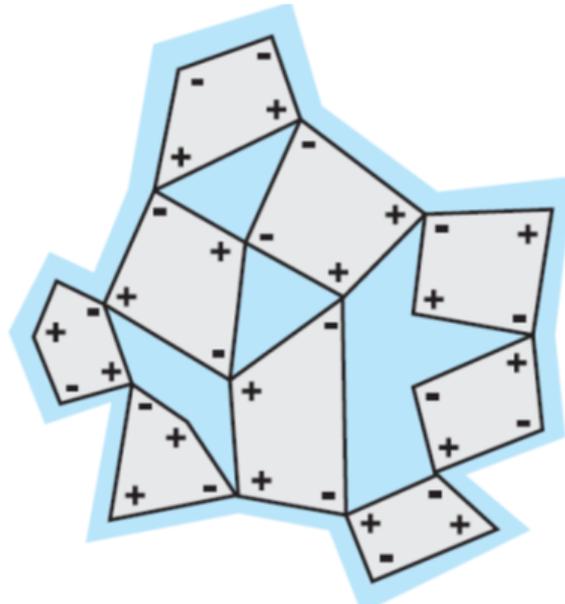


Fig.1 Des charges opposées sur la surface des grains de ciment provoquent la floculation

I-1-2 l'extension de l'étendu granulaire du mélange :

cette extension est obtenue par l'utilisation d'éléments ultra fin tel que la fumée de silice, fillers de laitier, cendre volante...etc., chimiquement réactifs dessinés à remplir les micros vides de l'empilement des grains en améliorant ainsi la compacité.

- **l'amélioration de l'étendu granulaire**

A/ Rôle et importance des granulats dans le béton

dans le cas des BHP ou la pâte de ciment hydraté et la zone de transition sont suffisamment fortes, les granulats peuvent devenir le maillon faible du béton.

La forme des particules des gros granulats est aussi importante de point de vue rhéologique. Il faut essayer d'utiliser autant que possible des particules arrondies ou cubiques plutôt que des particules plates et allongées.

- Les granulats ont aussi une grande influence sur la compacité du béton qui est le facteur principale pour l'obtention des BHP.

B/Rôle et importance des additions minérales

L'ajout de particules extrêmement fines permet de combler les minuscules vides dans la zone de transition. La présence du superplastifiant est en outre essentielle pour éviter la formation de conglomérats. Parmi ces additions minérales, on trouve les cendres volantes, le filler calcaire, le quartz broyé, les laitiers de haut fourneau broyés et les fumées de silice. Les laitiers de haut fourneau broyés comme les fumées de silice disposent de propriétés pouzzolanique qui leur permet de se combiner avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment.

Leurs dimensions, plus faibles que les grains de ciment, contribuent à une baisse de porosité à l'interface pâte - granulat restituant ainsi une meilleure cohésion d'ensemble à la maturité et par la suite au développement de la résistance.

C/. Effet chimique ou pouzzolanique :

- La réaction pouzzolanique est une réaction chimique entre la silice et la portlandite. La silice, qui est généralement apportée par une addition minérale de type cendre volante, fumée de silice ou laitier de haut fourneau, réagit avec la portlandite formée lors de l'hydratation du ciment pour donner naissance au CSH secondaire. Les étapes de formation des CSH secondaires sont données ci-dessous : formation de la portlandite
- Portlandite + silice =
- $\text{SiO}_2 + x.\text{Ca}(\text{OH})_2 + y.\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{xCaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (\text{x} + \text{y})\text{H}_2\text{O}$

I-2 Application des BHP

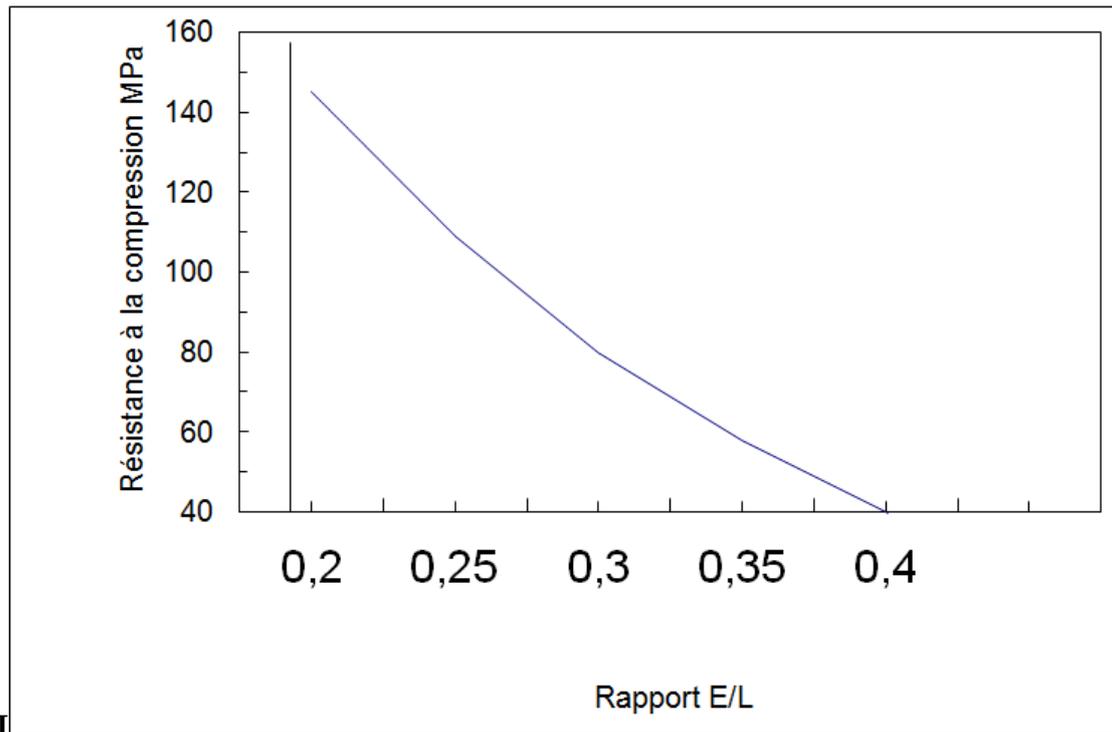
N°	Type d'ouvrage	Propriétés valorisées
1	Ponts	- résistance à court terme - ouvrabilité - durabilité - déformation différée - résistance
2	Offshore (Plate forme pétrolière ou autre)	- durabilité - compression et cisaillement - ouvrabilité - abrasion et chocs
3	Bâtiment de grande hauteur	- compression - cisaillement - ouvrabilité - résistance à court terme - confinement
4	Tunnels	- durabilité - compression - résistance au jeune âge
5	Chaussées	- abrasion - chocs - gel-dégel - durabilité - cisaillement - ouvrabilité
6	Préfabrication des composants (poutrelle préfabriquées, dalle préfabriquées)	- compression à court terme - cisaillement - ouvrabilité
7	Construction mixte Acier - Béton	- cisaillement - compression - ouvrabilité - confinement
8	Fondations spéciales Reprises-en sous ouvrages	- compression ouvrabilité - résistance à court terme - déformations différées

-3 Formulation et composition des BHP

La procédure de formulation commence par le choix de cinq caractéristiques particulières du BHP :

- Rapport eau / liant
- Dosage en super plastifiant
- Dosage en gros granulats
- Teneur en entraîneur d'air

1/ **Rapport Eau /liant** : on peut déterminer le rapport eau/liant on utilisant la figure2



2/ dosage en eau

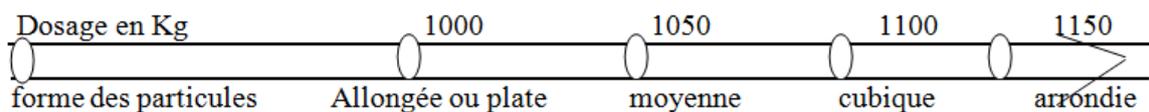
La figure présente une approche simplifiée basée sur le concept du point de saturation. Lorsque le point de saturation d'un SP n'est pas connu on suggère de commencer avec un dosage en eau de l'ordre de 145 l/m³.

Point de Saturation	0.6	0.8	1	1.2	1.4
Dosage en eau	120 125	125 135	135 145	145 155	155 165

Figure détermination du dosage en eau

3/ **Dosage en super plastifiant** : Le dosage en SP se déduit du dosage au point de saturation

4/ **Dosage en gros granulat** : le dosage en gros granulats peut être déterminé de la figure en fonction de la forme des granulats.



5/ Dosage en sable : est déterminer à partir de la formule de base

$$V_C + V_S + V_{GG} + V_E + V_{FS} + V_{SP} = 1000 \text{ L}$$

$$V_{\text{Sable}} = [1000 - (V_C + V_E + V_{GG} + V_{FS} + V_{SP})] \text{ L}$$

$$\text{masse sable : } S = V_{\text{Sable}} \times \rho_{\text{abs}}^{\text{S}} [\text{Kg}]$$

V : volume des constituants du béton en l

ρ_{abs} : masse volumique absolue en Kg/l

Autres méthodes de formulation

Méthode des coulis du LCPC : cette méthode est basée sur deux formule semi empirique.

- La première concerne la résistance de compression à 28 jours.

$$f_c = (K_g \times R_c) / [1 + (3.1 \times E/C) / (1.4 - 0.4^{(11S/C)})]$$

f_c : Résistance du béton à 28jours MPa

E, C, S : dosage massique en eau, ciment et fumée de silice en Kg

K_g : coefficient qui dépend du type de granulats

R_c : résistance vraie du ciment en MPa.

- La deuxième concerne la maniabilité de ce béton qui est reliée à la viscosité du mélange qui est calculée d'après un modèle Farris.

Dans un béton qui contient 'n' classe granulaire mono dispersés de dimension tel que $d_i > d_{i+1}$ la viscosité de la suspension est égale à

$$\eta = \eta_0 H(\Phi_1 / (\Phi_1 + L\Phi_n + \Phi_0)) H(\Phi_2 / (\Phi_2 + L\Phi_n + \Phi_0)) LH((\Phi_1 / (\Phi_n + \Phi_0))).$$

Φ_1 : volume occupé par l'énème classe dans un volume unitaire du mélange

Φ_0 : volume d'eau,

η_0 : viscosité d'eau.

H : fonction qui représente la variation de la viscosité relative à la suspension mono dispersé comme une fonction de la concentration solide.

I-4 Propriétés rhéologique des BHP :

I-4-1. Maniabilité (Affaissement au cône)

Du point de vue rhéologique, l'affaissement dépend essentiellement de deux facteurs : le squelette granulaire (composition granulométrique) et la quantité et la fluidité de la pâte. Certain recherches ont étudiées le comportement rhéologique complexe des BHP selon une approche qui vise la détermination du seuil de cisaillement et la détermination de la viscosité du béton. Ces techniques sont complexe et leurs utilisation est actuellement limité aux Laboratoires de recherche.

Facteurs influençant l'affaissement au cône

- Quantité des granulats et rapport Gros granulat/ granulats fin
- Composition granulométrique
- Forme des granulats
- Rapport Eau/ Liant et dosage en super plastifiants

I-4-2. Masse volumique

Généralement la masse volumique d'un BHP est légèrement supérieure à celle d'un béton ordinaire. Ceci est dû à la meilleure compacité des BHP.

$\rho_{\text{app}} = 2400$ à 2500 pour les BHP

$\rho_{\text{app}} = 2350$ à 2400 pour BO

Cette masse volumique est variable suivant le dosage en entraîneur d'air.

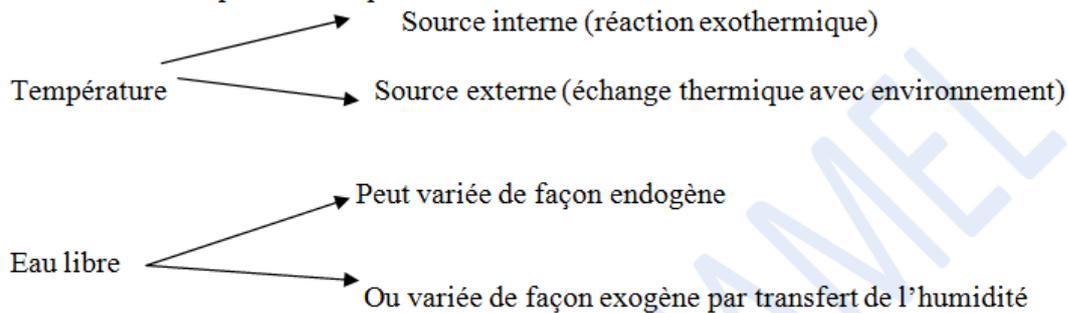
I-4-3. Température et prise : Deux facteurs agissent sur la prise des BHP

- l'effet secondaire d'un fort dosage en super plastifiant qui retard la prise du ciment
- la température idéale pour la mise en place des BHP se situe entre 15 et 20 °c. Pour une température < à 10°C un retard de prise est enregistré et il est préférable de chauffer le béton au dessus de 25°C pour accélérer le durcissement.

I-5 Déformation des BHP

I-5-1. Les déformations libres du béton (retrait ou gonflement)

Sont des propriétés de premières importances pour le constructeur. la construction d'un ouvrage durable passe donc par la maîtrise des déformation libres. La température et le teneur en eau sont deux paramètres qui contrôlent les déformations libres



I-5-2. Différents types de retrait

- Avant prise : retrait plastique

C'est le retrait observé après la mise en œuvre et qui est dû à une perte d'eau par évaporation. La présence de la fumée de silice rend les mouvements d'eau dans le béton frais plus difficile. Ceci réduit le retrait plastique.

Ce retrait peut provoquer une fissuration très importante (juste 1h après le coulage)

- pendant la prise et le durcissement : retrait endogène

Le retrait endogène, lié à l'auto dessiccation est généralement plus élevé dans le cas des BHP. Cela est dû au rapport E/C qui généralement très faible est inférieure à 0.4

I-5-3. Long terme : retrait de séchage ou de dessiccation

Après le démoulage est lorsque l'humidité ambiante est inférieure à celle qui règne dans la porosité du béton des migrations de H₂O se produisent de l'intérieur vers l'extérieur de la structure, d'où le retrait d'ensemble est produit.

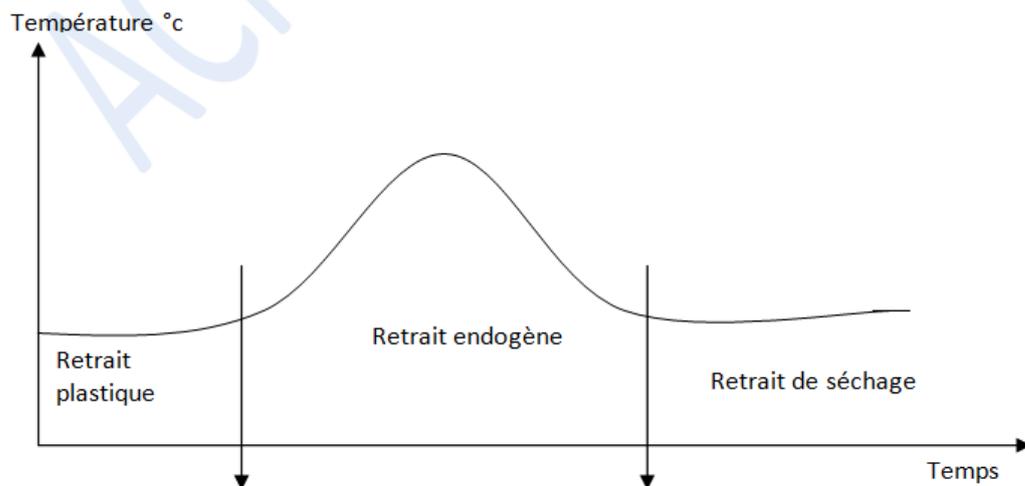


Figure différents types de retrait

I-5-4. Fluage des bétons à hautes performances

Si on maintient le chargement d'une éprouvette constant dans le temps (essais de fluage), sa déformation double ou triple avec l'âge. Le fluage dépend essentiellement de :

- la charge appliquée
- la nature du béton
- les conditions ambiantes :

I-6. Propriétés mécaniques des BHP

I-6-1. Résistance à la compression

C'est caractéristique souvent utilisée pour classer les bétons à haute performances. C'est ainsi que les spécialistes distinguent les BHP par rapport au BO. Le tableau suivant donne les différents types de béton selon la résistance caractéristique à la compression

Classe ou type	résistance caractéristique à la compression à 28 jours en MPa
Béton ordinaire	20 à 40 (50)
Béton à hautes performances	50 (60) à 100
Béton à très hautes P	100 à 150
Bétons exceptionnels	> à 150

Les gains de résistance se manifestent dès le jeune âge. un béton de 60 MPa à 28j peut dépasser 15 MPa à 24 heures et 40 MPa à 7 jours on l'absence de caractéristique particulières on adapte comme contrainte de calcul f_{28} la valeur déduite de la formule retenue pour les bétons usuels par les règles BAEL .

$$f_{c28} = 0.85 f_{CK} / j_b$$

j_b : coefficient de sécurité généralement pris égale à 1.5 sera probablement réduit dans le cas des BHP les contraintes de traction de calcul f_{tj} se déduit de la contrainte de compression f_{cj} Selon la formule

$$f_{tj} = 0.6 + 0.06 f_{cj} \text{ MPa.}$$

On peut donner aussi quelque relation pour la résistance à la traction par fendage

$$f_{ff} = 0.61 f_c^{0.5} \text{ MPa. Ou } f_{ff} = 1.03 f_c^{1/2} \text{ MPa.}$$

La résistance à la compression est variable en fonction du rapport Eau / liant et afin d'augmenter d'avantage la résistance de compression il faut utiliser des granulats de qualité et de résistance plus meilleure.

Eau /Liant	Variation de la résistance à la compression axiale
0.4 – 0.34	50 à 75 MPa
0.35 – 0.3	75 0 100 MPa
0.3 – 0.25	100 à 125 MPa
0.25 – 0.2	> à 125 MPa

I-6-2. Module d'élasticité

La déformation élastique du béton à hautes performances est particulièrement intéressante du faite que le module d'élasticité d'une pâte de ciment durci est très important .le comportement du béton à haute performance est plus monolithique est la résistance à l'interface granulats-

matrice est plus élevée. La rupture ultérieure s'observe autant dans les gros granulats que dans la matrice. En raison de la forte adhérence entre les gros granulats et la matrice cimentaire, les propriétés élastiques ont une influence considérable sur le module d'élasticité du béton. L'abaque (figure) montre l'influence du module d'élasticité des granulats sur le module d'élasticité du béton.

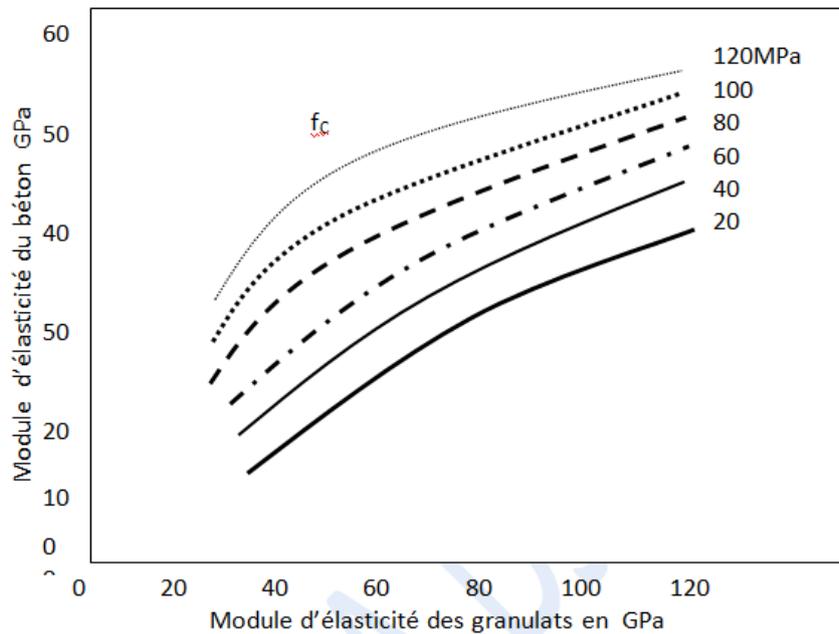


Figure Abaque précisant la valeur du module d'élasticité du béton selon la valeur du module d'élasticité des gros granulats et la résistance de compression du béton.

Le module d'élasticité des granulats se diffère selon nature physique, chimique et minéralogique de la roche d'origine. Cela renforce l'importance de la sélection de bon granulat dans la fabrication des BHP.

Plusieurs relations entre le module d'élasticité du béton et résistance à la compression f_c à 28 jours sont proposées :

$$E_c = 3320 (f_c)^{1/2} + 6900 \text{ en (MPa)}$$

$$E_c = 3.320 (f_c)^{1/2} + 6.9 \text{ en (GPa) proposée par ACI}$$

$$E_c = 11000 (f_c)^{1/3} \text{ en (MPa) proposée par BAEL extension au bétons de 80MPa}$$

I-6-3. Adhérence acier – béton HP

Le comportement de la liaison armature – béton HP est apprécié à travers le graphe des variations du déplacement de la barre par rapport au béton en fonction de l'effort de l'arrachement (voir la figure

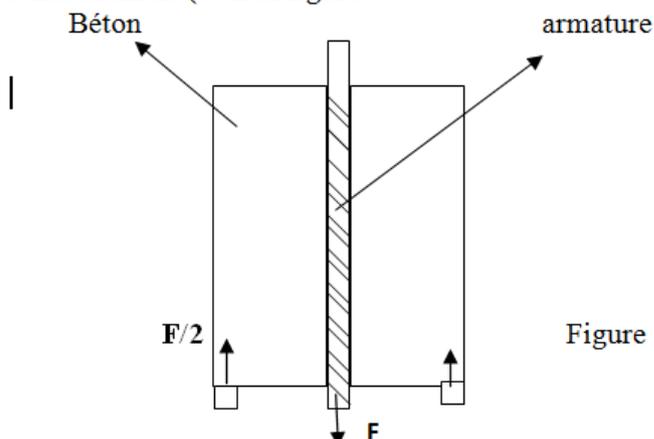


Figure Essai d'arrachement direct

À partir des résultats de recherche développés sur l'adhérence acier – BHP on peut tirer les constatations intéressantes :

- la résistance ultime de liaison acier – BHP est fonction croissante de la résistance à la compression de ce béton d'enrobage.
- la résistance à l'apparition et à la propagation de l'endommagement de la liaison acier - BHP ne dépend pas seulement de la résistance mécanique, mais aussi de la microstructure du béton d'enrobage.

La figure montre la bonne liaison acier – béton BHP par rapport à un béton ordinaire BO. Cette amélioration est due essentiellement aux caractéristiques exceptionnelles des BHP. Ces derniers présentent un retard dans l'apparition du premier glissement et une rigidification de la liaison plus supérieure.

Paramètres influençant la liaison acier – BHP

- Age du béton d'enrobage
- Dosage en liant

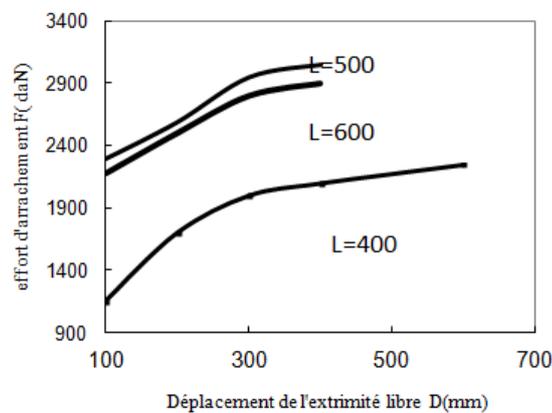


Fig. Adhèrence en fonction du dosage en liant

-Influence du rapport pondérale Eau/ Liant

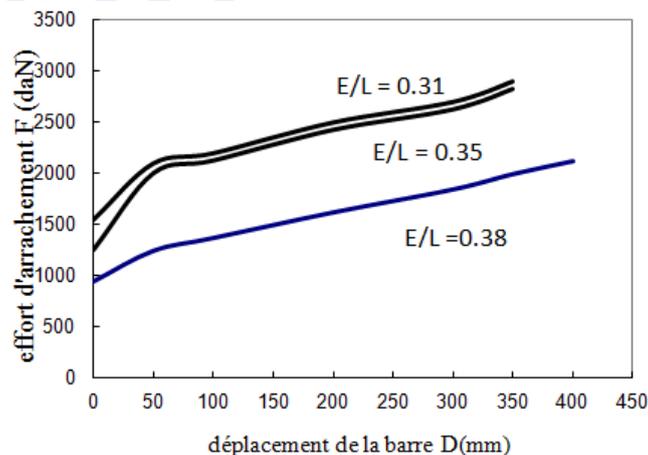


Figure. Adhèrence acier – béton en fonction du rapport Eau / Liant

7 - Durabilité des bétons à hautes performances

Une des propriétés principales d'un BHP et sa bonne compacité et sa faible perméabilité dont les conséquences méritent d'être envisagés avec une grande attention. Dans les BHP la matrice cimentaire présente une structure particulièrement dense avec un réseau capillaire

discontinu. Ceci rend les BHP plus résistant aux attaques externes. A l'échelle microscopique on peut détecter que la matrice cimentaire se compose de CSH, Ca(OH)₂, sulfo-aluminate, les fillers et les grains anhydre) et les zone d'interface ou de liaison matrice granulats. C'est à l'échelle microscopique que sont étudiées les dégradations physico chimiques du BHP.

7- 1 Perméabilité – durabilité

La perméabilité est la propriété d'un corps à se laisser traverser par un fluide est souvent considérée comme un critère de durabilité.

Les pores capillaires et les fissures jouent un rôle déterminant dans la perméabilité des bétons.

La théorie de percolation qui décrit la variation de la perméabilité des milieux poreux ou

fissureux est donnée sous la formule suivante : $K = C d_c^2 / F$

C= constante = 1/226 , d_c = diamètre critique des pores.

F = facteur de formulation

C'est le rapport de la conductivité du béton saturé et celle de la solution interstitielle.

7-2 L'alcali réaction

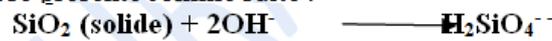
L'un des risques à prévenir est celui des désordres dus aux alcalis – réactions. Les réactions silico alcalines des bétons nécessitent deux conditions intrinsèques :

- la présence de granulats potentiellement réactifs c.à.d. comporte des minéraux siliceux ou silicates susceptible d'être altérés.

- une concentration en alcalis (Na₂O et K₂O) suffisamment élevée dans les fluides des pores capillaires au contact de ces granulats les cations principaux sont Na⁺ K⁺ et le bilan ionique s'écrit [Na⁺] + [K⁺] = [OH⁻].

Et la troisième condition est liée à l'environnement du béton (T c° , H et pression)

Les minéraux siliceux ont une certaine stabilité en milieu alcalin en fonction du PH et de la température. La réaction se présente comme suite :



Les produits de la réaction présentent morphologies et des compositions très variables et sont essentiellement des calciques, silicate et calcium avec des proportions d'eau. La réaction alcali- silice se produit seulement en présence d'eau.

L'utilisation des fumées de silice, d'ajout pouzzolanique, la recherche d'une compacité optimale et le faible et le faible rapport Eau /Liant contribuent globalement à l'obtention d'un BHP durable vis-à-vis des alcalis – réactions.

7-3 Résistance à la pénétration des ions chlore

Les BHP possèdent une haute résistance aux attaques externe particulièrement aux ions chlore. La pénétration des ions chlore dans les bétons est une cause principale de la dégradation de très nombreuses structures de béton armé.

Les ions chlore peuvent non seulement s'attaquer aux armatures d'acier en faisant les rouillées. Les réactions se déroulent comme suite :



lorsque les ions chlore pénètre dans la solution interstitielle, ils réagissent en premier lieu avec C₃A non hydraté pour former des mono chlore aluminates (3CaOAl₂O₃CaCl₂10H₂O) cette modification microstructurale est positive, mais la poursuite de la pénétration des ions chlore peut provoqué l'écaillage du béton de recouvrement qui se produit lorsque la poussé due au

gonflement devient excessive tous les résultats de recherche sur la pénétration des ions chlore confirme que les BHP offrent une résistance nettement élevée à la pénétration des ions chlore par rapport au béton ordinaire. Plus in baisse le rapport Eau/Ciment, plus on protège les BHP contre toute pénétration des ions chlore.

7-4. Résistance à la carbonatation

La carbonatation est due à l'action de l'oxyde carbonique CO_2 avec les composants de ciment. Le CO_2 se déplace à travers le réseau capillaire poreux de la matrice cimentaire le premier composant qui se forme est le CaCO_3 qui s'obtient de la réaction :



La vitesse de carbonatation dépend de plusieurs facteurs :

- humidité ambiante
- température
- compacité du béton
- concentration de CO_2 dans l'environnement

D'une façon générale les BHP offrent une meilleure résistance à la carbonatation que les BO en raison de leurs très grandes compacités et de leur dense microstructure.