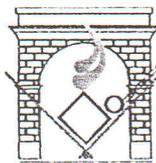




République algérienne démocratique et populaire
 Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Amar Telidji à Laghouat



**FACULTE DES SCIENCES ET DE L'INGENIERIE
 DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTER** en Génie Civil
 Option : **Matériaux et Structures**

Présenté par : Mr. RABEHI Mohamed

Ingenieur d'Etat en Travaux Publics diplômé de l'E.N.T.P. Alger

THEME

**Contribution à la caractérisation de la porosité ouverte du béton
 d'enrobage : Relation entre la résistance à la compression, la
 profondeur de carbonatation et l'absorption initiale des bétons**

Mémoire soutenu le 07/07/2005, devant la commission d'examen :

M. Bouhicha	Professeur	U.A.T.Laghouat	Président
M.M Khenfer	Professeur	U.A.T.Laghouat	Examineur
B.Benchikh	Maître de conférence	C.U.Djelfa	Examineur
M.S Goual	Maître de conférence	U.A.T.Laghouat	Rapporteur

République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Amar Telidji à Laghouat



FACULTE DES SCIENCES ET DE L'INGENIERIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER en Génie Civil

Option : Matériaux et Structures

Présenté par : *Mr. RABEHI Mohamed*

Ingenieur d'Etat en Travaux Publics diplômé de l'EN.T.P.Alger

THEME

Contribution à la caractérisation de la porosité ouverte du béton d'enrobage : Relation entre la résistance à la compression, la profondeur de carbonatation et l'absorption initiale des bétons

Mémoire soutenu le 07/07/2005, devant la commission d'examen :

M. Bouhicha	Professeur	U.A.T.Laghouat	Président
M.M Khenfer	Professeur	U.A.T.Laghouat	Examineur
B.Benchikh	Maître de conférence	C.U.Djelfa	Examineur
M.S Goual	Maître de conférence	U.A.T.Laghouat	Rapporteur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الحمد لله الذي بنعمته وتوفيقه وهدايته تم صالحات
الأعمال.

وبعد:

أهدي ثمرة هذا الجهد المتواضع إلى من حملتني وهنا على وهن ومسهرت
الليالي من أجل سعادتني أُمِّي الحبيبة وإلى من رباني ورعاني والذي
حفظهما الله لي ورعاهما.

إلى من بفضلته بعد الله أكتمت هذا العمل أستاذي الفاضل الدكتور قـوال
محمد السايح.

إلى جميع أخوتي الأحرار وخاصة أخي الكريم بقلوبكم عبد الحليم
مصطفى علام وكل أصدقائي.

إلى كل من علمني وأرشدني عبر كل مراحل أطوار التعليم، إلى كل من له
فضل علي، إلى كل مشابر في ساحات الحق رافعا راية العلم ومخاربا
للجهل، إلى كل هؤلاء أقدم بين أيديهم هذا العمل عل الله أن ينفع به كل
باحث في هذا الميدان.

Remerciements

Je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur **M. S. GOUAL**, Maître de conférence à l'Université Amar Telidji à Laghouat, pour la confiance qu'il m'a accordé en acceptant d'être directeur de ce travail. j'ai pu apprécier ses compétences scientifiques et il a su me faire profiter de son expérience et de ses directives fructueuses.

Je remercie vivement Monsieur **M. BOUHICHA**, Professeur à l'université Amar Telidji à Laghouat pour l'honneur qu'il m'a fait présider en acceptant de présider le jury d'examen de ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à messieurs **M. M. KHENFER**, Professeur au Université Amar Telidji à Laghouat, **B. BENCHIKH**, Maître de conférence au centre universitaire de Djelfa pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce ~~travail en acceptant d'en être examinateurs.~~

J'espère à tous les membres de jury qu'ils trouvent dans ce travail la rigueur scientifique qu'ils attendent.

Mes remerciements vont également à toute l'équipe du Laboratoire de génie civil de l'université Amar Telidji à Laghouat en particulier **A. ZIREG**.

Je ne pourrais guère oublier de remercier vivement le directeur et le personnel du laboratoire de la Cimenterie de Sour El-Ghozlane, ainsi que monsieur **B. HALIFA** de L'U A T L pour leurs aides.

Enfin, Que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation trouveront ici ma profonde reconnaissance.

Résumés

Résumé:

La porosité interconnectée joue un rôle très important dans le processus de transfert d'humidité. La formulation d'un béton devant résister à l'action d'agents agressifs passe en premier par la caractérisation du réseau poreux. Cependant, d'un point de vue pratique la zone de béton essentielle est celle qui correspond à la l'épaisseur d'enrobage des armatures ou zone du béton de peau. C'est de la durabilité de cette faible épaisseur que dépendra généralement la durée de vie d'un ouvrage ou d'une partie d'ouvrage. Il est donc nécessaire de se procurer un moyen fiable et rapide pour évaluer la porosité capillaire de cette zone.

Ce travail avait pour objectif, la contribution à la caractérisation de la porosité ouverte de la zone du béton d'enrobage en utilisant l'essai d'absorption capillaire et d'établir les liens existants entre la porosité ouverte caractérisée par l'absorption initiale de la zone du béton de peau, la résistance mécanique et la profondeur de carbonatation. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence les effets de l'augmentation du dosage en ciment et de l'effet de la cure humide sur la porosité capillaire du béton d'enrobage. En effet, celle-ci diminue en fonction du dosage en ciment jusqu'à un seuil de 400 kg/m³, au-delà de ce dosage, la porosité ouverte a tendance à augmenter en raison des microfissures créées par le retrait endogène. De même, la durée de cure humide contribue à la diminution de la porosité ouverte de la zone de peau. A travers les résultats expérimentaux recueillis on a pu déduire des relations théoriques permettant de relier la résistance à la compression des bétons à 28 jours et la profondeur de la zone carbonatée à la porosité ouverte de la zone de peau caractérisée par l'absorption initiale du béton.

Abstract:

~~The interconnected porosity plays a very important role in the process of humidity transfer. The formulation of a concrete must resist to the action of aggressive agents passes in first by the characterization of its porous network. However, of a convenient point view the essential concrete zone is that corresponds to the thickness of armature coating or concrete skin zone. It is the durability of this weak thickness that depends generally the duration life of a piece work. . It is thus necessary to get a weak and fast means to evaluate the capillary porosity of this zone.~~

This work had for objective, the contribution to the characterization of the open porosity of the coating concrete zone while using the capillary absorption test and to establish the relations existing between the open porosity characterized by the initial absorption of the zone of the skin concrete, the mechanical resistance and the carbonatation depth. The results obtained have permit to put in evidence the effects of the increase of dosage in cement and the humid cure on the capillary porosity of the coating concrete. Indeed, this one decreases according to dosage in cement until a threshold of 400 kg/m³, beyond this dosage, the open porosity has tendency to increase by reason of micro fissures created by endogenous shrinking. In the same way, the humid cure length contributes to the reduction of the open porosity of the skin zone. From experimental results, theoretical relations have been established to predict the compressive strength at 28 days and the carbonatation zone depth as function of open porosity of the skin zone characterized by the initial absorption of the concrete.

ملخص:

المسامية المتصلة تلعب دورا هاما في انتقال الرطوبة، و من ثم تشكيل خرسانة ذات خصائص مقاومة لفعل ونشاط العوامل المرضية العدوانية تمر أولا بتشخيص الشبكة المسامية، خاصة مسامية منطقة الغلاف الخراساني الحامي للقضبان الحديدية حيث أن ديمومة أي بناية أو جزء من بناية له علاقة مباشرة بديمومة هذه المنطقة ذات السمك الضعيف. لذا يتوجب علينا كمهندسين إيجاد طريقة سهلة و سريعة تمكن من تشخيص المسامية الشعيرية لهذه المنطقة.

الهدف من هذا العمل هو المساهمة في تشخيص المسامية المفتوحة لمنطقة الغلاف الخراساني باستخدام تجربة الامتصاص الشعري للماء واستخراج العلاقات الموجودة بين المسامية المفتوحة للغلاف الخراساني المقرونة بالامتصاص الأولي، المقاومة الميكانيكية وسمك المنطقة المكربنة.

النتائج المتحصل عليها بينت مدى تأثير زيادة التركيز الإسمنتي في تقليص المسامية المفتوحة للغلاف الخراساني و كذا فعالية المعالجة الرطبة في تخفيض حجم الثغرات الكبيرة.

انطلاقا من النتائج التجريبية تمكنا من استخراج علاقات نظرية تسمح باستنباط مقاومة الضغط و سمك المنطقة المعرضة للكربنة للخرسانة عن طريق معرفة طاقة الامتصاص الأولي بها.

Table des matières

Table des matières

Introduction Générale.....	1
Chapitre I: Etude théorique sur le Transport d'humidité dans les matériaux poreux et la carbonatation du béton.....	3
I.1 Transport d'humidité dans les matériaux poreux :.....	3
I.1.1 Description physique d'un matériau poreux :.....	4
I.1.1.1 Fraction volumique et porosité :.....	4
I.1.1.2 Masse volumique apparente sèche :.....	5
I.1.1.3 Teneur en eau :.....	5
I.1.2. Interaction eau/ matériau poreux :.....	6
I.1.2.1 Propriété capillarité d'un matériau poreux:.....	6
I.1.2.2 Condensation en milieu poreux (Loi de Kelvin):.....	7
I.1.3 Description mathématique du transfert d'humidité en milieu poreux :.....	8
I.1.3.1 Hypothèses de base :.....	8
I.1.3.2 Equations du phénomène :.....	9
I.1.3.3 interprétation physique de l'infiltration de l'eau dans les bétons:.....	13
I.2 Durabilité du béton vis-à-vis de la carbonatation:.....	14
I.2.1 Durabilité et paramètres d'influences :.....	14
I.2.2 La carbonatation du béton :.....	15
I.2.2.1 Mécanisme de transport du gaz CO ₂ dans le réseau poreux du béton :.....	16
I.2.2.2 Réaction de carbonatation :.....	16
I.2.3 Facteurs contrôlant la carbonatation :.....	19
I.2.4 Mesure expérimentale de la profondeur de carbonatation :.....	21
I.2.5 Conséquences de la carbonatation sur la physicochimie de matériaux à base de liant hydraulique:.....	21
Chapitre II: Matières premières, formulation des bétons et mesures expérimentales	
II.1 Matières premières:.....	24
II.1.1 Le ciment :.....	24
II.1.1.1 Analyse chimique et minéralogique du ciment :.....	24
II.1.1.2 Caractéristiques physiques du ciment :.....	26

II.1.1.3	Caractéristiques mécaniques du ciment:.....	29
II.1.2	Le sable :.....	29
II.1.2.1	Composition minéralogique du sable :.....	29
II.1.2.2	Caractéristiques granulaire du sable :.....	30
II.1.2.3	Caractéristiques physiques du sable:.....	31
II.1.3	Le gravier :.....	32
II.1.3.1	L'analyse granulométrique du gravier:.....	33
II.1.3.2	Caractéristiques physiques du gravier:.....	34
II.1.4	L'eau de gâchage:.....	35
II.1.4.1	l'analyse chimique de l'eau de gâchage :.....	35
II.2	Formulation des bétons :.....	36
II.2.1	Principe de la méthode de Dreux-Gorisse:.....	36
II.2.1.1	Le dosage en eau :.....	36
II.2.1.2	Le dosage des granulats:.....	37
II.2.1.3	Évaluation des proportions pondérales des composants de béton :.....	39
II.2.1.4	Pris en compte de l'absorption des granulats :.....	40
II.2.1.5	l'influence de la granularité sur le béton :.....	42
II.2.1.6	Préparation des éprouvettes d'essais:.....	42
II.2.2	Modes de cure.....	43
II.3	Mesures expérimentales:.....	43
II.3.1	Résistances mécaniques:.....	44
II.3.1.1	Résistance à la traction (flexion trois points):.....	44
II.3.1.2	Résistance à la compression:.....	45
II.3.2	L'essai d'absorption d'eau des bétons :.....	46
II.3.3	L'essai de carbonatation à court terme :.....	46
Chapitre III	Résultats expérimentaux et interprétations.....	49
III.1	Résistances mécaniques à la compression et à la traction:.....	49
III.1.1	Résistance à la compression:.....	49
III.1.2	Résistance à la traction:.....	51
III.2	Absorption capillaire:.....	52
III.2.1	Influence de la durée de cure :.....	54
III.2.2	Influence du type de béton (E/C variable):.....	55
III.2.3	Coefficients de sorptivité et de capillarité:.....	58

III.3 Carbonatation des bétons élaborés:	60
III.3.1 Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction de la durée d'exposition au gaz CO ₂ :.....	60
III.3.2 Influence de la carbonatation sur la résistance à la compression à 180 jours :.....	63
III.3.3 Influence de la carbonatation sur l'absorption capillaire à 180 jours :.....	64
III.4 Relations entre la résistance à la compression, la profondeur de carbonatation et l'absorption initiale :	66
III.4.1 Relation entre la résistance à la compression à 28 j et l'absorption initiale A_{bi} :.....	66
III.4.2 Relation entre la résistance à la compression à 28 j et l'absorption initiale z_i :.....	68
III.4.3 Relation entre de la profondeur de carbonatation et la résistance à la compression à 28 jours:.....	70
III.4.4 Relation entre de la profondeur de carbonatation et l'absorption initiale:.....	72
Conclusions Générales et recommandations :	74
Références bibliographiques :	77
Annexe A :	81
Annexe B :	83

Liste des figures

Premier chapitre

Figure I-1 : Schématisation macroscopique d'un matériau poreux dans un état hydrique quelconque.

Figure I-2 : Schéma de l'essai d'imbibition capillaire unidirectionnel.

Figure I-3 : Exemple de profil type θ (b).

Figure I-4 : Exemple de l'évolution du taux d'absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour une roche.

Figure I-5 : Exemple de cinétique d'absorption d'eau pour un béton.

Figure I-6 : Dégradation des éléments en béton par corrosion des aciers d'armature, dont l'eau est le principal vecteur.

Figure I-7 : Formes sous lesquelles est dissous le dioxyde de carbone D'après Valsaraj .

Figure I-8 : Croissance linéaire de l'épaisseur carbonatée en fonction du temps, de bétons confectionnés avec différents rapports E/C (d'après SHISSL.P)].

Figure I-9 : Influence de l'humidité relative sur la profondeur de carbonatation pour des bétons confectionnés avec des rapports E/C de 0.6 (courbe 1) et 0.8 (courbe 2) et conservés 16 ans à 20°C D'après Wierig.

Figure I-10 : Mesure expérimentale de la profondeur de carbonatation.

Figure I-11 : Gradient de pH entre le front de carbonatation et la surface.

Deuxième chapitre

Figure II-1 : Diffractogramme du ciment CPJ CEM II/A 32.5.

Figure II-2 : Dispositif expérimental de l'appareil LeChatelier.

Figure II-3 : Dispositif expérimental du perméabilimètre *Blaine*.

Figure II-4 : Diffractogramme de rayons X du sable.

Figure II-5 : Courbes granulométriques des granulats.

Figure II-6.a : Courbes granulométriques des granulats de béton dosé à 300 kg/m³.

Figure II-6.b : Courbes granulométriques des granulats de béton dosé à 400 kg/m³

Figure II-7 : Organigramme représentatif des différents essais effectués.

Figure II-8 : Essai de traction par flexion trois points.

Figure II-9 : Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.

Figure II-10 : Les étapes de l'essai de carbonatation.

Troisième chapitre

Figure III-1 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du dosage en ciment (E/C variable) pour les différents âges de cure humide.

Figure III-2 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la durée de cure pour les différents types de bétons.

Figure III-3 : Evolution de la résistance à traction à 28 jours en fonction du dosage en ciment pour les différentes durées de cure.

Figure III-4 : Evolution de la résistance à traction à 28 jours en fonction de la durée de cure pour les différents dosages en ciment.

Figure III-5 : Cinétique d'absorption d'eau en fonction du temps et de la racine carrée du temps (Exemple : Béton B30 après 3 j de cure).

Figure III-6 : Evolution de l'absorption capillaire en fonction de \sqrt{t} à différents âges de cure des différents types de bétons (E/C variable).

Figure III-7 : Evolution de l'absorption capillaire en fonction de \sqrt{t} des différents bétons élaborés pour différentes durées de cure

Figure III-8 : Effet de la cure sur l'absorption initiale des différents types de bétons élaborés (E/C variable).

Figure III-9 : Influence de la cure sur les coefficients d'absorption des différents bétons élaborés.

Figure III-10 : Evolution de la profondeur de carbonatation des différents types de bétons en fonction de la durée d'exposition au gaz CO₂.

Figure III-11 : Variation de la profondeur de carbonatation à l'âge de 180 jours en fonction du dosage en ciment pour différentes durées.

Figure III-12 : L'effet de la carbonatation sur la variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en ciment pour les différentes conditions de cure.

Figure III-13 : L'effet de la carbonatation sur l'absorption d'eau initiale des différents types de bétons en fonction des conditions de cure.

Figure III-14 : la variation de la résistance à la compression à 28 j en fonction de l'absorption initiale (enregistrée en 1 heure) (kg/m²).

Figure III-15: la variation de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la hauteur initiale d'imbibition capillaire z_i (mm).

Figure III-16 : Relation entre la profondeur de carbonatation à l'âge de 180 jours et la résistance à la compression à 28 jours.

Figure III-17 : la variation de la profondeur de carbonatation en fonction de l'absorption initiale A_{bi} ($\text{kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1/2}$) à l'âge de 180 jours

Figure III-18 : Relation entre la profondeur de carbonatation estimée à 180 jours et la position du front d'imbibition capillaire localisée en 1 heure.

Liste des tableaux

Premier chapitre

Tableau I-1 : Tensions superficielles pour quelques interfaces.

Deuxième chapitre

Tableau II-1 : Analyse chimique du ciment CPJ CEM II/A 32.5 de Sour El-Ghozlane.

Tableau II-2 : Composition minéralogique du ciment CPJ CEM II A 32.5 de Sour El Ghozlane.

Tableau II-3 : Temps de prise du ciment.

Tableau II-4 : Les caractéristiques mécaniques du ciment CPJ CEM II A 32.5.

Tableau II-5 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable ($T=20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $HR=45 \pm 10\%$).

Tableau II-6 : Equivalent du sable.

Tableau II-7 : Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 8/15.

Tableau II-8 : Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 3/8.

Tableau II-9 : Caractéristiques physiques du gravier.

Tableau II-10 : L'analyse chimique de l'eau de gâchage.

Tableau II-11 : Les termes de correction et l'ordonnée Y pour les différents dosage en ciment.

Tableau II-12 : Le partage des pourcentages des granulats.

Tableau II-13 : Compositions des bétons.

Tableau II-14 : Données climatologiques durant la période de la confection.

Troisième chapitre

Tableau III-1 : Résistance à la compression à 28 jours en fonction du dosage en ciment et pour les différents âges de cure.

Tableau III-2 : Résultats de la résistance à la traction à 28 jours en fonction du dosage en ciment pour les différentes durées de cure.

Tableau III-3 : Influence de type du béton sur les cinétiques d'absorption d'eau (kg/m^2) pour les différentes durées de cure.

Tableau III-4 : Influence de type du béton sur les cinétiques d'absorption d'eau (mm) pour les différentes durées de cure.

Tableau III-5 : Coefficients de sorptivité et de capillarité des différents types de béton en fonction de la durée de cure.

Tableau III-6 : Relation en k_c et S_c .

Tableau III-7 : Evolution de la profondeur de carbonatation (mm) des différents types de bétons tenant compte de l'effet de la durée de cure humide.

Tableau III-8 : Effet de la carbonatation sur la résistance à la compression des bétons élaborés.

Tableau III-9 : la variation de l'absorption initiale à 180 jours en fonction du dosage en ciment et de la durée de cure humide.

Tableau III-10 : Relation entre la différence de la hauteur d'imbibition initial Δz_i (mm) des bétons carbonatés et non carbonatés et la profondeur de carbonatation P_c (mm)

Tableau III-11 : Valeurs expérimentales et estimées de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'absorption initiale A_{bi} ($kg.m^{-2}.h^{-1/2}$ ou $mm.h^{-1/2}$)

Tableau III-12 : Valeurs expérimentales et estimées de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'absorption initiale z_i ($mm.h^{-1/2}$).

Liste des symboles utilisés

Liste des symboles utilisés

- a** : coefficient de proportionnalité variant de 0,5 à 1 .
- A** : coefficient d'affaissement.
- A_c** : coefficient d'absorption capillaire [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$].
- A_b**:coefficient d'absorption [%].
- A_{bG}** : coefficient d'absorption du gravier.
- A_{bi}** : coefficient d'absorption initiale [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$].
- A_{bs}** : coefficient d'absorption du sable.
- b** : variable de Boltzmann [$\text{m/s}^{1/2}$].
- B** : coté de la section carrée (en mm), B=70mm.
- C** : Ciment
- C_p** : compacité
- C_c** : flux de gaz de carbonique [m^3/s].
- D_c** : dosage en ciment [kg/m^3].
- D_f**: coefficient de diffusion du gaz carbonique CO₂ [m^2/s].
- D_v**: coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur d'eau dans l'aire sec [m^2/s].
- D_θ**: coefficient de transport d'eau ou diffusivité hydrique isotherme [m^2/s].
- D_T**: coefficient de transport d'eau ou diffusivité hydrique non isotherme [m^2/s].
- E** :Dosage en eau (en litre).
- E_s**:L'équivalent de sable [%].
- f** :facteur de résistance à la diffusion .
- g** : accélération de pesanteur[m/s^2].
- G**: Coefficient granulaire égale à 0.45 pour les granulats courants.
- G_g** : masse du gravier a l'état sec.
- HR** : L'humidité relative [%].
- i** : volume cumulé d'eau absorbé à l'instant t [m^3].
- I_i** : les termes sources traduisant les phénomènes d'évaporation et de condensation.

- J_{ic} : densités de flux de masse transportées par convection .
- J_{id} : densités de flux de masse transportées par diffusion.
- k_i : perméabilité du milieu à la phase i ($i = v$: vapeur ou $i = l$: liquide) [m^2].
- K : conductivité hydraulique [m/s].
- k_c : coefficient de capillarité [$mm/s^{1/2}$].
- K_r : coefficient de correction.
- K_{rs} : terme de correction supplémentaire.
- L : distance entre appuis (en mm), $L = 200$ mm.
- M : masse molaire de la vapeur d'eau ($= 18 \cdot 10^{-3}$ kg/mole).
- M_T : masse totale du matériaux poreux [kg].
- MF : module de finesse.
- M_g : masse de la phase gazeuse [kg].
- M_l : masse de la phase liquide [kg].
- M_s : masse de la phase solide [kg].
- M_s : masse de l'échantillon séché à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante
- M_a : masse de l'échantillon après imbibition dans l'eau pendant $24h$ à $T = 20$ °C.
- M_{Ga} : masse du gravier à l'état humide [kg].
- M_{sa} : masse du sable à l'état humide [kg].
- M_1 : Masse de (cellule + benzène)
- M_2 : Masse de (cellule + benzène + ciment)
- M_v : masse molaire de la vapeur d'eau ($= 18 \cdot 10^{-3}$ [kg/mole]).
- P : charge de rupture (en KN).
- P_1 : Pression de l'air [Pa].
- P_2 : Pression de l'eau [Pa].
- P_c : profondeur de carbonatation [mm].
- P_l : Pression total de la phase liquide.
- P_g : Pression total de la phase gazeuse
- P_v : Pression partielle de vapeur d'eau [Pa].

P_{vs} : Pression de vapeur d'eau à saturation [Pa].

P_c : Pression capillaire [Pa].

Q : débit ou flux d'eau [m^3/s].

R : Constante des gaz parfaits ($=8.3143$ [J/(mole.K)]).

r : Rayon de pore [m].

S : surface de compression de l'éprouvette ($7 \times 7 cm^2$).

S_l : masse du sable [kg].

S_c : sorptivité capillaire [$mm/s^{1/2}$].

S_m : surface spécifique [cm^2/g].

T : Température [$^{\circ}C$ ou K].

t : temps [s].

V : volume total du matériaux poreux [m^3].

V_{app} : volume apparent [m^3].

V_v : volume des vides [m^3].

V_l : volume de liquide [m^3].

V_g : volume de gaz [m^3].

V_s : volume de solide [m^3].

V_u : volume des pores ouverts (volume utile ou accessible) [m^3].

V_1 : Le volume du benzène initial,

V_2 : Le volume du benzène final (après introduction du ciment)

x, y, z : coordonnées spatiales.

z_i : front d'imbibition initial [mm].

ϵ : porosité totale [m^3/m^3].

ϵ_u : porosité utile ou accessible [m^3/m^3].

ϕ : L'humidité relative du milieu.

γ : coefficient de compacité .

η : Viscosité dynamique de l'eau ($=0.001$ Pa.s à $20^{\circ}C$).

μ_i : potentiel chimique de fluide (liquide ou vapeur).

μ_l : potentiel chimique de fluide (liquide).

- μ_v : potentiel chimique de fluide (vapeur).
- μ^0 : les potentiels de références arbitraires.
- ν_i : viscosité cinématique de phase i [m^2/s].
- θ : Teneur en eau volumique [m^3/m^3].
- θ_i : Teneur en eau volumique de la phase fluide (vapeur ou liquide) [m^3/m^3].
- θ_v^* : Teneur en vapeur en équivalent liquide condensé [m^3/m^3].
- ρ_a : Masse volumique apparente sèche du solide [kg/m^3].
- ρ_{app} : Masse volumique apparente [kg/m^3].
- ρ_{abs} : Masse volumique absolue [kg/m^3].
- ρ_i : Masse volumique de la phase i ($i=v$: vapeur ou $i=L$:liquide) [kg/m^3].
- ρ_l : Masse volumique de l'eau liquide [=1000 kg/m^3].
- ρ_s : Masse volumique des grains du solide sec [kg/m^3].
- σ : Tension superficielle [N/m].
- σ'_{28} :résistance moyenne en compression à 28 jours [MPa].
- σ'_c : la classe vrai du ciment calculée à 28 jours égale à 410 bars.
- σ'_n : résistance nominale en compression à 28 jours $\sigma'_n = 240$ bars .
- σ_{c28} :résistance à la compression à 28 jours [MPa].
- R_{co}, α, β : Coefficients de régression linéaire de la résistance à la compression.
- σ'_c :classe vrai de la résistance du ciment à 28 jours [MPa] .
- σ_t : contrainte de traction [MPa].
- σ_c : contrainte de compression (en MPa).
- ω : Teneur en eau massique [kg/kg].
- ω_G : teneur en eau du gravier [kg/kg].
- ω_s : teneur en eau du sable [kg/kg].
- ψ : Succion capillaire [m].

**INTRODUCTION
GENERALE**

Introduction Générale

Le choix des formulations de béton et la conception des ouvrages doivent désormais prendre en compte la durée de vie escomptée pour l'ouvrage, qui peut être très variable suivant le type de structure à construire, l'environnement considéré et naturellement le type de sollicitations que devra subir l'ouvrage. Cependant, la durabilité des structures en béton armé ou précontraint est difficile à quantifier et donc à prévoir. En effet, celle-ci est déterminée par l'action couplée évoluant au cours du temps et souvent à long terme, de différents processus physicochimiques complexes. Parmi toutes les dégradations potentielles, on peut citer la corrosion des armatures, qui est la cause principale de dégradation des structures en béton armé, notamment, dans les régions humides.

Les problèmes de dégradation et de vieillissement des matériaux de construction sont étroitement liés à la facilité de migration de l'humidité en phase liquide ou gazeuse au sein de la structure poreuse de ces matériaux. L'eau est non seulement le vecteur principal de transport d'agents agressifs, mais également elle crée les conditions favorables pour l'accomplissement des réactions physicochimiques dans les matériaux de construction. Cependant, il est indispensable de pouvoir caractériser de façon précise et complète la microstructure des matériaux de construction, et en particulier leur structure poreuse dans la mesure où celle-ci conditionne non seulement les propriétés mécaniques et thermiques, mais également celles liées à leur durabilité.

Par ailleurs, la porosité interconnectée joue un rôle très important dans le processus de transfert d'humidité, et la réalisation par exemple d'un béton devant résister à l'action d'agents agressifs passe en premier par la caractérisation du réseau poreux. Cependant, d'un point de vue pratique la zone de béton essentielle est celle qui correspond à l'épaisseur d'enrobage des armatures ou zone du béton de peau. C'est de la durabilité de cette faible épaisseur que dépendra généralement la durée de vie d'un ouvrage ou d'une partie d'ouvrage. Il est donc nécessaire de se procurer un moyen fiable et rapide pour évaluer la porosité capillaire de cette zone.

Ce travail a pour objectif, la contribution à la caractérisation de la porosité ouverte de la zone d'enrobage du béton en utilisant l'essai d'absorption capillaire et d'établir les liens existant entre l'absorption initiale, la résistance mécanique et la profondeur de la zone de carbonatation. Cette étude est étendue pour mettre en évidence les effets de la cure sur les

caractéristiques capillaires d'un béton ainsi que de prévoir le comportement du béton de peau vis-à-vis de la carbonatation.

Afin d'étudier l'influence du rapport Eau/Ciment et le mode de cure sur les caractéristiques capillaires, mécaniques et sur la carbonatation, quatre types de bétons d'ouvrabilités similaires ont été élaborés en faisant varier le rapport E/C. Ces échantillons ont subis deux modes de cures : à l'air libre (béton témoin), et dans l'eau pendant 3, 7 et 28 jours.

Afin d'atteindre les objectifs visés supra, nous avons subdivisé notre travail en trois chapitres étroitement liés :

- Le premier est consacré à une étude théorique qui se rapporte au transport d'humidité dans les matériaux poreux de génie civil et le problème de carbonatation du béton.
- Le deuxième chapitre est consacré aux techniques expérimentales de caractérisation des matières premières (ciment, sable, granulats et eau) de formulation des différentes classes des bétons élaborés et enfin description des essais mécaniques, d'absorption capillaires et de carbonatation à court terme.
- Le troisième chapitre est consacré aux résultats expérimentaux et interprétation en mettant en évidence l'influence du dosage en ciment et du mode de cure sur les caractéristiques physicomécaniques, d'absorption capillaires et sur l'avancement du front de carbonatation. Sur la base des résultats expérimentaux, une tentative de modélisation de la résistance à la compression à 28 jours et de la profondeur de carbonatation en fonction de l'absorption initiale a été entamée dans ce chapitre. Une relation théorique entre la profondeur de carbonatation et la résistance à la compression à 28 jours a été également établie dans cette étude.
- Enfin, une conclusion générale qui résume les principaux résultats et les perspectives à entreprendre pour les études à venir.

Chapitre I :

*Etude théorique sur le Transport d'humidité
dans les matériaux poreux de génie civil et
la carbonatation du béton*

Chapitre I: Etude théorique sur le Transport d'humidité dans les matériaux poreux et la carbonatation du béton

I.1 Transport d'humidité dans les matériaux poreux :

La plupart des matériaux de construction sont poreux, une partie ou la totalité des pores sont interconnectés. Cette particularité les rend aptes à fixer l'humidité et, par voie de conséquence, les expose à des modifications de leurs caractéristiques physiques, notamment, au point de vue mécanique et thermique.

De plus, la migration d'eau est la base de nombreux désordres (gonflement, retrait, fissuration, pollution, carbonatation, lessivage, gel/dégel, corrosion,...) qui entraînent un vieillissement et une dégradation plus ou moins rapide des matériaux de construction.

D'une manière générale, la fixation de l'humidité dans les milieux poreux résulte de l'action plus ou moins conjointe de trois mécanismes physiques fondamentaux : l'**adsorption**, la **condensation** et la **capillarité**. L'importance relative du rôle de chacun de ces mécanismes sur la masse d'humidité fixée dépend de plusieurs paramètres :

- Les propriétés structurales : porosité, surface spécifique des pores.
- Nature de la phase fluide avec laquelle le matériau se trouve en contact (vapeur ou liquide).
- Les conditions thermodynamique auxquelles le matériau est soumis (Pression, Température).

Les premiers modèles théoriques de transfert ont été utilisés pour décrire les processus d'humidification des structures, résultant des phénomènes de condensation liés au mécanisme de diffusion de la vapeur d'eau au sein du matériau **Glaser** [1]. Ces modèles ont été modifiés par la suite par **Krisher et al** [2] en tenant compte de l'influence des effets capillaires sur la phase fluide condensée. Cette modélisation est enfin établie dans sa forme actuelle, respectivement par **Philip et De Vries** [3] et **Luikov** [4] en faisant intervenir le phénomène de thermo migration lié aux effets de couplage entre transfert de masse et transfert de chaleur. Le système d'équations obtenu par ces auteurs, bien que similaire au point de vue formulation, diffère uniquement dans le choix du type de la variable "teneur en eau": teneur en eau

volumique θ dans le modèle de Philip et DeVries et Teneur en eau pondérale ω pour le modèle de Luikov.

1.1.1 Description physique d'un matériau poreux :

D'un point de vue générale, un matériaux poreux de type béton ou roche, à l'état "naturel", est un milieu hétérogène triphasique constitué d'une phase solide (matrice) supposée indéformable et de deux phases fluides en équilibre thermodynamique: une phase liquide (eau) et une phase gazeuse (air+vapeur d'eau) assimilée à un gaz parfait (Figure I.1). La température de ces deux phases est supposée dans tous les cas supérieure à 0°C et inférieure à 100°C a fin d'écarter les états extrêmes de gel et d'ébullition de l'eau.

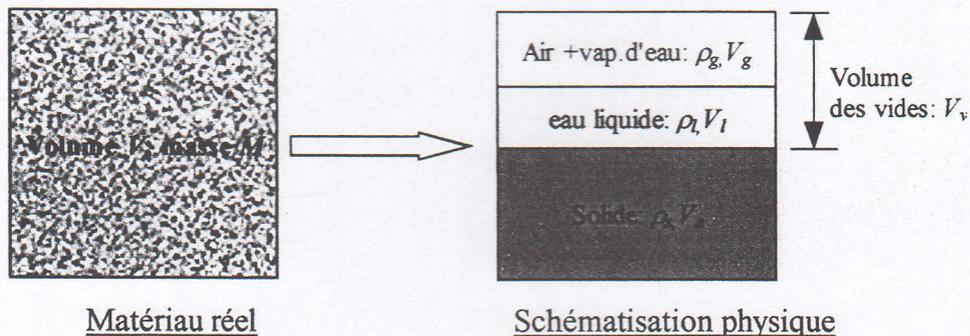


Figure 1-1 : Schématisation macroscopique d'un matériau poreux dans un état hydrique quelconque.

Avec :

M_g , M_l , M_s sont respectivement la masse de la phase gazeuse, liquide et solide (kg)

V_g , V_l , V_s sont respectivement le volume de la phase gazeuse, liquide et solide (m^3)

$V_v = V_g + V_l$: volume des vides (m^3)

M et V sont la masse totale et le volume total du matériau poreux.

1.1.1.1 Fraction volumique et porosité :

La fraction volumique ε_i d'une phase i d'un milieu formé de n phases est égale au rapport du volume occupé par la phase i au volume total $V = V_v + V_s$, la somme des ε_i est donc égale à l'unité. La fraction volumique de la phase (vide) dans le milieu poreux s'appelle porosité.

Elle est notée ε_0 , et est donnée par :

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V} = \frac{V_l + V_g}{V} = \frac{V - V_s}{V} \quad (\text{I-1})$$

Cette porosité est divisée en deux classes : la porosité **fermée** correspondant à l'ensemble des pores ou cellules fermées, et la porosité **utile** ou accessible. La première joue un rôle important vis-à-vis des propriétés mécaniques et thermiques mais n'est pas concernée par les phénomènes de diffusion ou d'écoulement. La deuxième, est la porosité utile ou accessible, elle joue un rôle important dans le processus de transport d'humidité et conditionne la durabilité du matériau. On définit la porosité utile ou accessible par :

$$\varepsilon_u = \frac{V_u}{V} \quad (I-2)$$

Où V_u est le volume des pores ouverts (volume utile ou accessible).

1.1.1.2 Masse volumique apparente sèche :

Elle est définie comme le rapport de la masse du solide au volume total apparent, soit :

$$\rho_{app} = \frac{\rho_s V_s}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (I-3)$$

1.1.1.3 Teneur en eau :

- Massique ou pondérale : $\omega = \frac{\text{masse d'eau}}{\text{masse de solide}} = \frac{M_T - \rho_s V_s}{\rho_s V_s} \quad (I-4)$

- Volumique : $\theta = \frac{\text{volume d'eau liquide}}{\text{volume apparent}} = \omega \frac{\rho_{app}}{\rho_l} \quad (I-5)$

Expérimentalement, la détermination de la teneur en eau suppose le plus souvent de définir un état sec de référence qui possède un caractère purement conventionnel. Dans ce cadre, les relations (I-3) et (I-4) sont généralement substituées par les définitions suivantes :

$$\rho_{app} = \frac{\text{masse sèche}}{\text{volume apparent}} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (I-6)$$

$$\omega = \frac{\text{masse humide} - \text{masse sèche}}{\text{masse sèche}} \quad [\text{kg/kg}] \quad (I-7)$$

La phase gazeuse peut être caractérisée par sa teneur volumique ($\varepsilon - \theta$), sa pression (généralement considérée comme égale à la pression atmosphérique) et un paramètre définissant la teneur en vapeur d'eau qu'elle contient. Ce dernier pourra être, par exemple :

- **La pression partielle de vapeur d'eau :**

$$P_v = \phi P_{vs}(T) \quad [\text{Pa}] \quad (I-8)$$

où ϕ est l'humidité relative du milieu et P_{vs} la **pression de vapeur à saturation** à la température T considérée.

- **La masse volumique de la vapeur d'eau :**

$$\rho_v = \frac{M}{RT} P_v = \frac{M}{RT} \phi P_{vs}(T) = \phi \rho_{vs} \quad (I-9)$$

M La masse molaire de la vapeur d'eau ($= 18.10^{-3} \text{ Kg/mole}$) ; **R** la constante de gaz parfait ($= 8.3143 \text{ J.mole}^{-1}\text{K}^{-1}$) ; **T** Température (K).

1.1.2. Interaction eau/ matériau poreux :

1.1.2.1 Propriété de capillarité d'un matériau poreux:

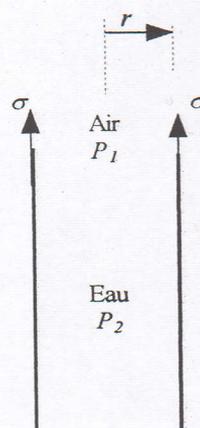
- **Tension superficielle :**

A l'interface entre deux fluides non miscibles, les molécules possèdent une énergie différente de celle qu'elles ont " en masse ". Ceci se traduit par la formation d'un ménisque qui se comporte comme une membrane élastique. La tension de cette membrane, appelée tension superficielle (notée ici σ), est caractéristique du couple de fluides considérés. Elle a la dimension d'une force par unité de longueur et elle est donc exprimée en (N/m) [5, 6, 7]. Le tableau I-1 donne la valeur de σ à 20 °C pour quelques couples de fluides.

Tableau I-1 : Tensions superficielles pour quelques interfaces

Interface	σ [N/m]
air – eau	0.072
huile – eau	0.048
air – huile	0.024
air – mercure	0.480

Considérons maintenant L'équilibre mécanique de ce ménisque en prenant, par exemple, le cas d'une interface eau/air :



L'action de la tension superficielle a pour effet de comprimer la phase air et l'équilibre peut donc s'écrire :

$$2\pi r \sigma = \pi r^2 (P_1 - P_2) \quad (\text{I-10})$$

De (I-10) se déduit immédiatement la loi de Laplace pour un ménisque sphérique :

$$P_1 - P_2 = \frac{2\sigma}{r} \quad (\text{I-11})$$

- **Pression capillaire en milieu poreux :**

D'après ce qui précède, la présence d'un liquide dans un milieu poreux implique la formation d'un ménisque à l'interface gaz/liquide. D'après la **loi de Laplace**, la pression de la phase liquide n'est donc pas égale à la pression du gaz et, par définition, on appelle pression capillaire P_c la différence entre la pression du gaz et celle du liquide. Soit, d'après (I-11), si l'on considère le cas d'un pore cylindrique et d'un mouillage parfait [5,7]:

$$P_c = \frac{2\sigma}{r} \quad [Pa] \quad (\text{I-13})$$

Dans certains domaines d'application, l'usage a consacré l'utilisation de paramètres directement reliés à la pression capillaire comme, par exemple :

- **La succion:**
$$\psi = -\frac{P_c}{\rho_l g} \quad [m] \quad (\text{I-14})$$

1.1.2.2 Condensation en milieu poreux (Loi de Kelvin):

La compréhension du phénomène de condensation en milieu poreux est facilitée si l'on adopte un point de vue thermodynamique. Pour cela, comme pour étudier n'importe quel système binaire, il faut préalablement exprimer les **potentiels chimiques** μ_i des deux phases fluides en présence [5,6] :

- Pour l'eau liquide supposée incompressible et par unité de masse :

$$\mu_l = \mu_l^0 + \frac{P_l}{\rho_l} = \mu_l^0 - \frac{P_c}{\rho_l} = \mu_l^0 + g\psi \quad [J/kg] \quad (\text{I-15})$$

- Pour l'eau vapeur assimilée à un gaz parfait et par unité de masse :

$$\mu_v = \mu_v^0 + \frac{RT}{M} \ln P_v = \mu_v^0 + \frac{RT}{M} \ln \phi \quad [J/kg] \quad (\text{I-16})$$

Où les μ^0 sont des potentiels de références arbitraires. A l'équilibre, les potentiels des deux phases sont égaux. Ceci s'écrit, en supposant que l'on peut définir des états de référence pour lesquels les potentiels de références de la vapeur et du liquide sont identiques :



$$\mu_i = \mu_v \Leftrightarrow g\psi = \frac{RT}{M} \ln \phi \quad (I-17)$$

Ce qui conduit à l'expression de la *Loi de Kelvin* avec la succion capillaire et l'humidité relative comme paramètres :

$$\psi = \frac{RT}{M} \ln \phi \quad (I-18)$$

En combinant la loi de Kelvin avec la définition de la succion (équation I-14) et la loi de Laplace (équation I-13), on obtient :

$$r = - \frac{2\sigma}{\rho_l RT} \cdot \frac{1}{\ln \phi} \quad (I-19)$$

Cette relation exprime que si l'air humide dans le réseau poreux est caractérisé par une humidité relative ϕ , à l'équilibre, tous les pores de rayons inférieurs à r donné par (I-19) sont nécessairement remplis d'eau. En d'autres termes, si un milieu poreux est en contact avec un air humide, il y aura condensation, donc fixation d'eau par capillarité, dans tous les pores dont le rayon est inférieur au rayon donné par (I-19).

1.1.3 Description mathématique du transfert d'humidité en milieu poreux :

La modélisation mathématique du transfert d'humidité en milieu poreux s'inspire directement de la méthode classique de conservation de masse.

1.1.3.1 Hypothèses de base :

La modélisation est établie dans le cadre des hypothèses suivantes :

- 1) Le milieu poreux est assimilé à un milieu continu fictif (MCF) dont les dimensions sont grandes par rapport aux dimensions des pores.
- 2) Les différentes phases solide, liquide et gazeuse du milieu poreux non saturé sont supposées en équilibre thermique en tout point du MCF équivalent.
- 3) La phase solide est supposée homogène, isotrope et indéformable, sans réaction chimique avec l'humidité et avec des propriétés thermophysiques indépendantes de la température.
- 4) Les différentes phases sont continues.
- 5) La température est comprise entre 0°C et 100°C afin d'éviter les états extrêmes de gel et d'ébullition de l'eau. De plus, les gradients thermiques dans le milieu sont faibles.
- 6) La pression totale de la phase gazeuse (pression atmosphérique) est uniforme et constante
- 7) La phase gazeuse obéit à la loi des gaz parfaits.

1.1.3.2 Equations du phénomène :

- **Conservation de la masse :**
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \theta_i) = -\nabla \cdot (\bar{J}_{ic} + \bar{J}_{id}) + I_i \quad (I-20)$$

ρ_i est la masse volumique de la phase i ($i = v$: vapeur ou l : liquide) ; θ_i la teneur volumique de cette phase (volume de liquide ou de vapeur par unité de volume du milieu poreux) ; \bar{J}_{ic} et \bar{J}_{id} les densités de flux de masse transportées par convection et diffusion ; I_i les termes sources traduisant les phénomènes d'évaporation et de condensation, t , est la variable temporelle.

- **Lois complémentaires de transferts :**

Il s'agit essentiellement de la loi de *Fick* exprimant la densité de flux de masse de vapeur par diffusion moléculaire et la loi de *Darcy* exprimant la densité de flux de masse de liquide par filtration.

- **Loi de Fick :**
$$\bar{J}_{vd} = -f D_v \frac{P_g}{P_g - P_v} \frac{M}{RT} \nabla P_v \quad (I-21)$$

- **Loi de Darcy :**
$$\bar{J}_{ic} = -\frac{k_i}{\nu_i} \nabla \tilde{P}_i \quad \tilde{P}_i = P_i - \rho_i g z \quad (I-22)$$

Où P_i représente la pression dans la phase i ; P_v la pression partielle de vapeur d'eau dans la phase gazeuse ; P_g la pression totale de la phase gazeuse ; D_v le coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air sec (m^2/s) ; f est le facteur de résistance à la diffusion traduisant l'influence du squelette poreux sur le mécanisme de la diffusion moléculaire il est fonction de la teneur en eau liquide ; k_i est la perméabilité du milieu à la phase i (m^2) ; ν_i est la viscosité cinématique de la phase i (m^2/s).

En combinant les équations (I-20), (I-21) et (I-22) et en tenant compte des équations d'équilibre des phases liquide (équation de Laplace) et vapeur (équation de Kelvin), on abouti au modèle de De Vries, dont la forme la plus employée dans la pratique est telle que :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\theta \nabla \theta + D_T \nabla T) - \frac{\partial K}{\partial z} \quad (I-23)$$

Où $K = k_l g / \nu_l$ est la conductivité hydraulique du milieu [m/s] ; k_l est la perméabilité du milieu à la phase liquide (m^2) ; ν_l la viscosité cinématique de l'eau liquide (m^2/s) ; $\theta = \theta_l + \theta_v$ # θ_l est la teneur volumique de l'eau liquide ; D_θ et D_T représentent la diffusivité hydrique isotherme et non isotherme du milieu à la phase liquide et la phase vapeur (m^2/s).

Or, l'effet gravitationnel est généralement négligeable devant la succion capillaire et l'équation de transfert de masse (I-23) se réduit à :

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\theta \nabla \theta_l + D_T \nabla T) \quad (\text{I-24})$$

De plus, si le transfert se fait dans des conditions isothermes, l'équation (I-24) se simplifie à la forme la plus employée dans les études expérimentales, à savoir :

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\theta \nabla \theta_l) \quad (\text{I-25})$$

Dans le cas d'un transfert unidirectionnel (figure I.2), l'équation (I-25) s'écrit :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (\text{I-26})$$

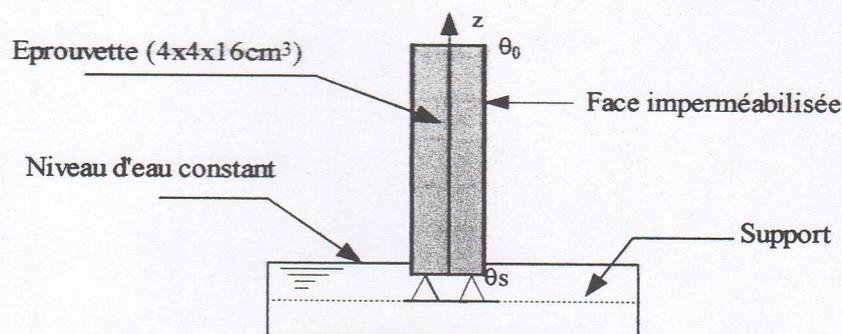


Figure I.2 : Schéma de l'essai d'imbibition capillaire unidirectionnel

Avec comme conditions initiales et aux limites :

- Condition au limite: à $z = 0$ et pour $t \geq 0$, $\theta = \theta_s$
- Condition initiale: à $t = 0$ et pour $z > 0$, $\theta = \theta_0$

Les profils hydriques $\theta(z,t)$ peuvent être regroupés en un seul profil type $\theta(b)$ en utilisant une variable unique ($b = z.t^{1/2}$) appelée variable de Boltzmann. Ainsi, l'équation (I-26) se transforme en :

$$-\frac{b}{2} \left(\frac{d\theta}{db} \right) = \frac{d}{db} \left(D_\theta \frac{d\theta}{db} \right) \quad (\text{I-27})$$

Avec comme conditions : $\theta = \theta_s$ pour $b = 0$ et $\theta = \theta_0$ lorsque $b \rightarrow \infty$

La figure I.3 représente un exemple de profil type $\theta(b)$.

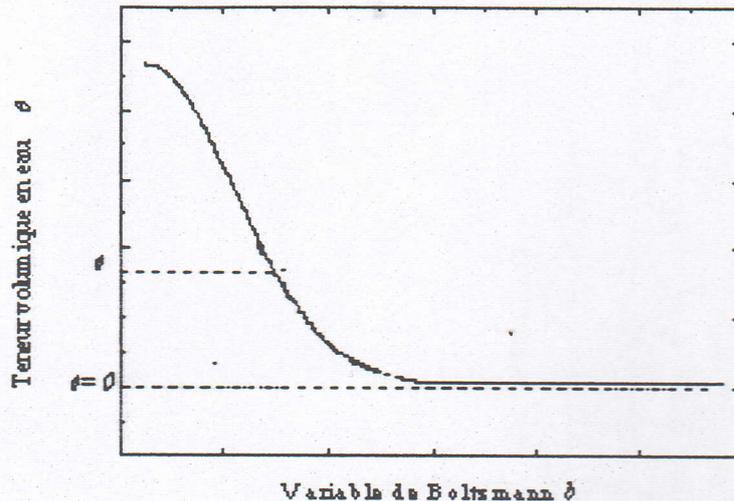


Figure I.3: Exemple de profil type $\theta(b)$ [55].

Un autre paramètre appelé « sorptivité » peut être déduit également de cet essai. Il a été introduit pour la première fois par Philip J.R [8] dans la théorie de l'infiltration. Cette terminologie a été également adoptée par la suite par Christopher H [9]; Christopher H et al [10] dans l'étude du mouvement de l'eau dans les matériaux poreux de bâtiment. Ce paramètre traduit la capacité d'un matériau à absorber l'eau par capillarité pour des conditions initiales et aux limites données. C'est une caractéristique macroscopique intrinsèque du matériau poreux, utilisé dans l'étude de la durabilité des matériaux de construction.

En effet, on peut déduire de l'équation (I-27) le volume d'eau cumulé $i(t)$ absorbé à l'instant t par unité de surface:

$$i = t^{1/2} \int_{\theta_0}^{\theta_i} b \cdot d\theta = S_c \cdot t^{1/2} \quad (\text{I-28})$$

où S_c est la sorptivité capillaire du matériau utilisée par les hydrologues exprimée en $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2})$. Elle est équivalente au coefficient d'absorption capillaire A_c [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$] utilisé par les recommandations de la **RILEM CPC 11.1** [11].

Ce comportement linéaire peut être démontré en faisant abstraction à un écoulement type «Poiseuille». En effet, si on considère un modèle de pore cylindrique, de rayon r , le régime d'écoulement à travers se pore peut être assimilé à un écoulement laminaire. Dans ce cas, le débit ou flux d'eau traversant le pore peut être décrit par la loi Poiseuille :

$$Q = -\frac{\pi r^4}{8 \eta} \cdot \frac{\Delta P}{z} \quad (\text{I-29})$$

où η est la viscosité dynamique de l'eau ($\approx 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ à 20°C).

Qu'on peut également l'exprimer à partir du déplacement du front d'imbibition capillaire $z(t)$, soit :

$$Q = \frac{dV}{dt} = \pi r^2 \cdot \frac{dz}{dt} \quad (\text{I-30})$$

Or d'après la loi de Laplace : $\Delta P = P_g - P_l = \frac{2\sigma}{r}$ c'est la pression capillaire.

En combinant (I-29) et (I-30) ainsi que la loi de Laplace, l'équation du mouvement du front

d'imbibition est décrite par :

$$\frac{dz}{dt} = \frac{r\sigma}{4\eta z} \quad (\text{I-31})$$

L'intégration de l'équation (I-31) conduit à :

$$z(t) = \sqrt{\frac{r\sigma}{2\eta} t} \quad (\text{I-32})$$

et :

$$\Delta m(t) = \rho_l \pi r^2 \sqrt{\frac{r\sigma}{2\eta} t} = \pi r^2 A_c \sqrt{t} = \pi r^2 \cdot \rho_l S_c \sqrt{t} \quad (\text{I-33})$$

L'équation (I-33) est connue comme l'équation de Washburn, A_c le coefficient d'absorption capillaire. Ce coefficient est l'analogue de la sorptivité capillaire $S_c = \frac{A_c}{\rho_l}$ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1/2}$].

Les deux équations (I-32) et (I-33) doivent être pris avec précaution pour les raisons suivantes :

- La distribution porométrique ne peut être réduite à un seul diamètre.
- Le front d'imbibition ne se comporte pas comme un piston et donc sa position z ne peut être localisée avec précision.
- L'effet de la gravité peut dans certain cas être significatif.

Expérimentalement, la sorptivité S_c est déterminée directement par une méthode gravimétrique en traçant l'évolution du volume d'eau absorbé par l'échantillon par unité de surface absorbante en fonction de la racine carrée du temps. La courbe d'évolution obtenue est généralement une droite dont la pente exprime la sorptivité du matériau. La quantité d'eau absorbée est mesurée à des intervalles de temps par pesée avec une précision de 0.01g. Le volume d'eau étant déduit connaissant la masse volumique de l'eau liquide ($1\text{g}/\text{cm}^3$).

Un exemple de l'évolution de la masse d'eau absorbée et la hauteur du front d'imbibition capillaire pour le cas d'une roche [6] est représenté en figure I-4.

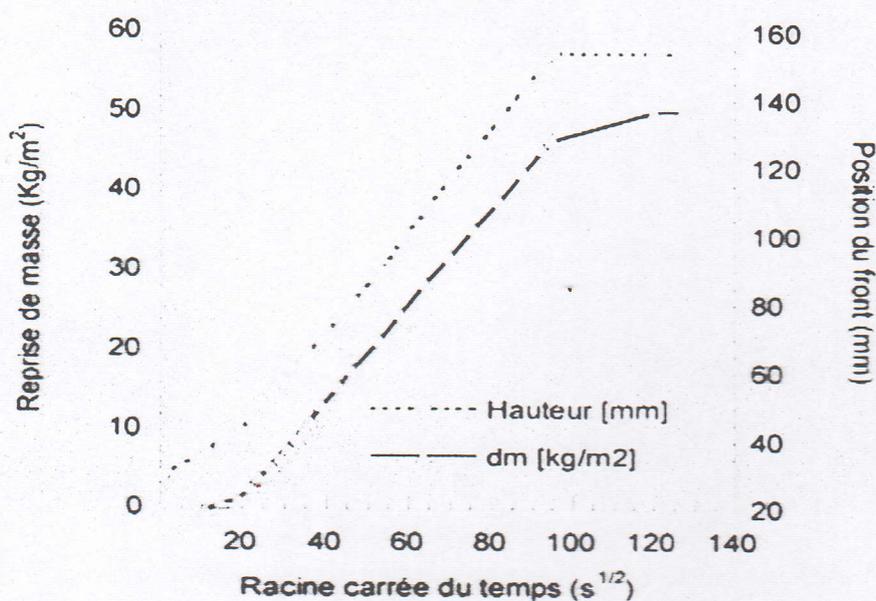


Figure I-4 : Exemple de l'évolution du taux d'absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour une roche [6]

I.1.3.3 interprétation physique de l'infiltration de l'eau dans les bétons:

En traçant l'évolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps pour un béton, on remarque que la courbe d'évolution se compose de deux segments de droite (figure I-5) :

- la première, de pente assez forte caractérise l'absorption d'eau initiale. Cette eau est retenue par les capillaires de plus grands diamètres situés en surface. Généralement cette absorption est enregistrée durant la première heure de l'essai [12]. Pour l'étude de la durabilité, l'absorption d'eau initiale est un paramètre très utile pour caractériser la durabilité du béton vis-à-vis des agents agressifs.
- La deuxième phase d'absorption de faible pente caractérise le remplissage des capillaires de plus en plus fins. La pente de cette partie détermine la sorptivité du matériau S_c .

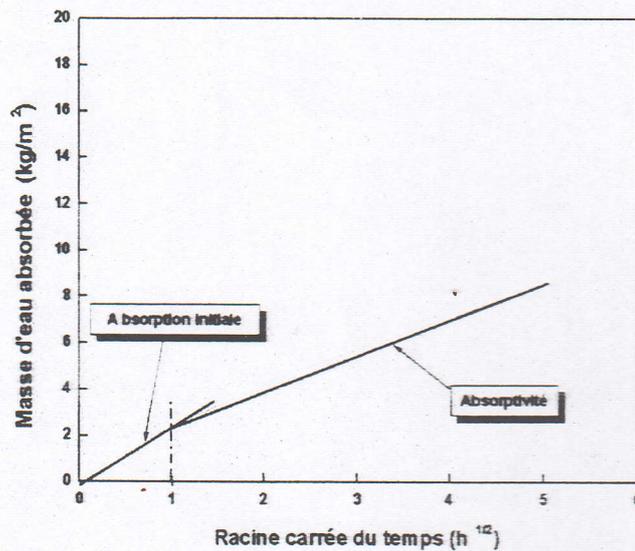


Figure I-5: Exemple de cinétique d'absorption d'eau pour un béton [12].

1.2 Durabilité du béton vis-à-vis de la carbonatation:

1.2.1 Durabilité et paramètres d'influences :

La durabilité du béton s'explique, en grande partie, par la difficulté de pénétration des agents agressifs dans le réseau poreux du béton, une structure durable est celle qui continue à remplir ses fonctions tout au long de sa durée de vie sans que ces propriétés soient affectées. Il en résulte que le béton doit être en mesure de résister aux agents de détérioration auquel il peut être exposé par son environnement.

La porosité est le paramètre du premier ordre de la durabilité. En effet, les caractéristiques du réseau poreux (porosité, distribution des tailles de pores ...) déterminent les mécanismes de transfert sous forme liquide ou gazeuse des agents potentiellement agressifs pour le béton ou les armatures (chlorures, sulfates, gaz carbonique.....).

De nombreux chercheurs **Véronique B. & al [13]**, **Arnaud C. & al [14]** se sont intéressés à l'influence des paramètres tels que la composition chimique et les caractéristiques physiques (porosité, perméabilité, résistance) du béton, les conditions climatiques (température, humidité), la durée de cure ou encore la formation des carbonates de calcium sur la vitesse de carbonatation des bétons et leurs conséquences sur la physico-chimie de matériaux à base de liant hydrauliques.

L'eau joue un rôle essentiel dans le comportement du matériau durci, non seulement sur le plan physico mécanique (résistance, retrait de dessiccation et fissuration dus à l'évaporation de l'eau des pores, fluage,...) mais aussi sur celui de la durabilité par l'intermédiaire de paramètres tels que la perméabilité aux liquides et aux gaz régissant les transports d'agents agressifs au sein du matériau. La migration de l'eau est donc à la base de nombreux désordres (fissuration, corrosion, gonflement..) qui entraînent un vieillissement et une dégradation plus ou moins rapide des matériaux de construction (ex. figure I.6). Cependant, une bonne maîtrise du phénomène de transport d'humidité dans les matériaux poreux peut réduire ou prévenir les dommages dont l'humidité est le principal vecteur.

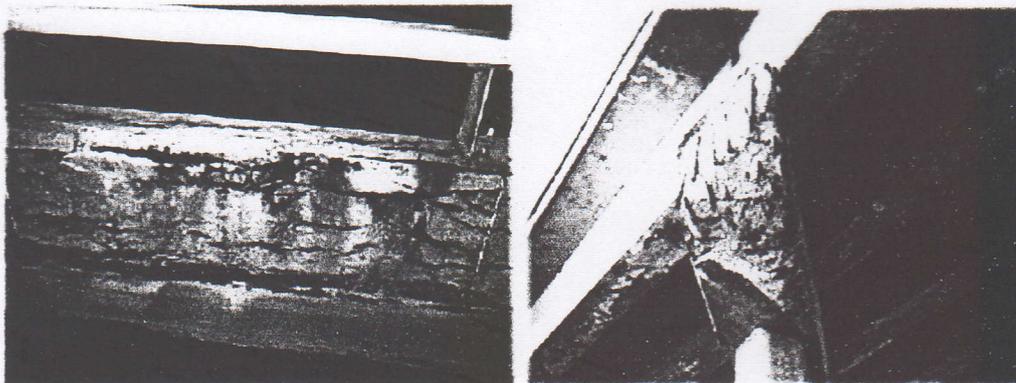


Photo 1 Vue d'une glissière en béton confrontée à la corrosion de ses aciers d'armature

Photo 2 Dégradation d'un chevêtre par la corrosion des aciers d'armature

Figure I-6 : Dégradation des éléments en béton par corrosion des aciers d'armature, dont l'eau est le principal vecteur [15].

1.2.2 La carbonatation du béton :

La carbonatation des béton et mortiers est un phénomène qui n'altère pas le matériau. En effet, les résistances mécaniques et les modules d'élasticité augmentent, tandis que la perméabilité et la porosité diminuent grâce à la formation des carbonates de calcium (CaCO_3).

Par ailleurs, lorsque le béton est armé, la carbonatation du matériau qui enveloppe l'acier supprime l'immunité dont bénéficie ce dernier. En effet, la carbonatation des composés hydratés du ciment par dioxyde de carbone de l'air (CO_2) diminue le pH de la solution interstitielle d'une valeur de l'ordre de 12.6 à une valeur inférieure à 9 de telle sorte que la pellicule d'oxyde passive protégeant l'acier n'est plus stable. Le film de passivation se détruit et la corrosion peut alors se développer en milieu aéré et humide [14,16].

I.2.2.1 Mécanisme de transport du gaz CO₂ dans le réseau poreux du béton :

Le transfert du gaz CO₂ se fait par diffusion, cette dernière désigne le processus de transport d'un constituant dans un milieu donné sous l'effet de son agitation aléatoire à l'échelle moléculaire. S'il existe des différences de concentration entre deux points du milieu, ce phénomène engendre un transport global du constituant considéré, orienté de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée [17]. En combinant la loi de Fick avec celui de conservation de la masse, l'équation de transfert diffusif du gaz CO₂ à travers un matériau poreux s'exprime par :

$$\frac{\partial C_c}{\partial t} = \nabla \cdot (D_f \nabla C_c) \quad (I-34)$$

Pour une diffusion unidirectionnelle suivant z par exemple, l'équation (I-34) s'exprime par :

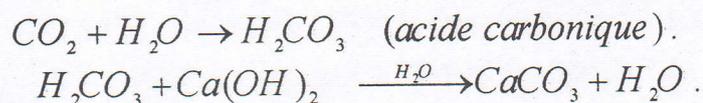
$$\frac{\partial C_c}{\partial t} = D_f \frac{\partial^2 C_c}{\partial z^2} \quad (I-35)$$

∇C_c est le gradient de concentration du CO₂ et D_f est le coefficient de diffusion du gaz carbonique CO₂, z , la variable spatiale et t , le temps.

Si l'on se place dans le cas d'un capillaire cylindrique, contrairement au cas de l'écoulement visqueux, la dimension capillaire n'a aucune influence sur la vitesse de diffusion si cette dimension reste grande par rapport au libre parcours moyen des molécules.

I.2.2.2 Réaction de carbonatation :

Quand un matériau à base de liant hydraulique est exposé à l'air, le dioxyde de carbone (CO₂) présent en moyenne à 0,035% en volume dans l'air, réagit en présence d'eau avec les différents hydrates du ciment et principalement avec la Portlandite Ca(OH)₂ pour former du carbonate de calcium ou calcite (CaCO₃) comme produit final [18]:



Le mécanisme réactionnel est cependant relativement complexe. La carbonatation est une réaction qui a lieu en milieu aqueux, par réaction du dioxyde de carbone dissous dans la solution des pores avec la Portlandite passée en solution. En fonction du pH de la solution, le dioxyde de carbone peut se trouver sous des formes différentes comme le montre la Figure 1.7:

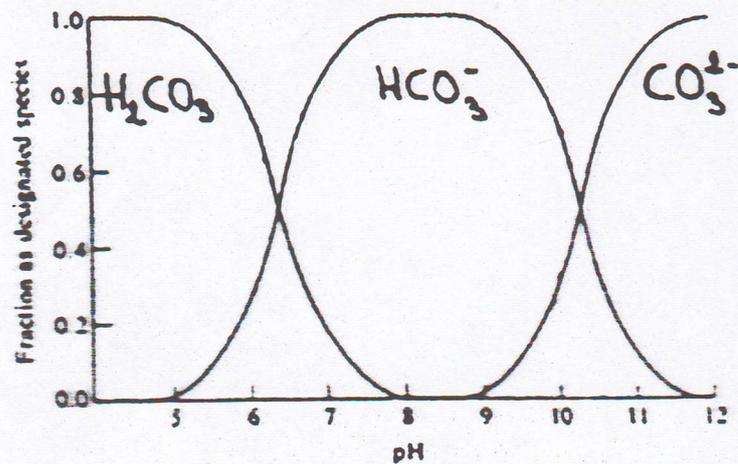
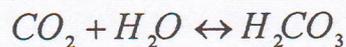


Figure I.7 : Formes sous lesquelles le dioxyde de carbone est dissous d'après Valsaraj [19].

Dans les solutions dont le pH est inférieur à 4 il forme de l'acide carbonique:



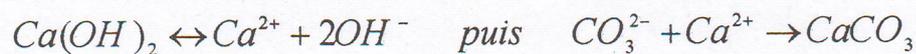
Si le pH de la solution est compris entre 6 et 10,5 la forme principale obtenue par dissociation est l'ion bicarbonate:



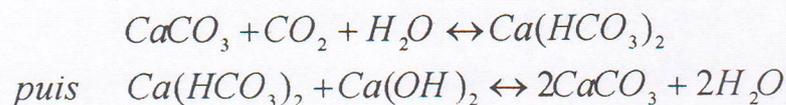
Si le pH de la solution est supérieur à 10,5 l'espèce majoritaire en solution est l'ion carbonate:



Dans les conditions de pH des solutions des pores de matériaux à base de liant hydraulique (pH supérieur à 12) les ions carbonates réagissent avec le calcium issu de la dissolution de la Portlandite pour former du carbonate de calcium précipité:



Au delà d'un certain seuil de carbonatation, l'acide carbonique forme par dissociation des ions bicarbonates qui eux aussi, par réaction avec la Portlandite, forment de la calcite:



Kobayashi [20] a montré qu'une partie des C-S-H (Tobermorite) réagit avec le dioxyde de carbone. Pour cela, il a déterminé la quantité de carbonate de calcium dans un matériau

carbonaté. Il a évalué le degré de carbonatation en mesurant le rapport CaO/SiO_2 dans les C-S-H. Plus ce rapport est faible plus la part de C-S-H carbonatés est importante.

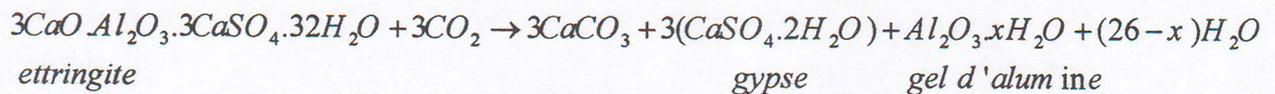
De même, Al-Kadhimi [21], a mesuré sur une pâte de ciment CPA carbonatée, le rapport CaO/SiO_2 . Celui-ci initialement supérieur à 1,7 devient inférieur à 1,4. Le résidu de la décomposition des C-S-H est un gel de silice. La décalcification du gel de C-S-H se fait selon la réaction suivante :



Le stade final de la dégradation des C-S-H par carbonatation est la formation de carbonate de calcium et d'un gel de silice (Kobayashi , Al-Kadhimi):



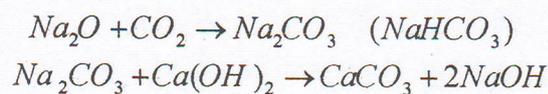
L'ettringite (Aluminate) se décompose également par carbonatation formant du gypse et un gel d'alumine (Nishikawa) [22] :



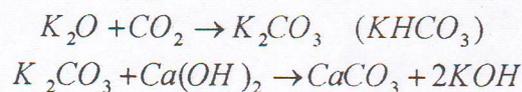
Tous les auteurs ne s'accordent pas sur l'ordre dans lequel les différents hydrates sont affectés par la carbonatation. Roberts [23] considère que la carbonatation affecte successivement les différents hydrates, la Portlandite étant le premier à carbonater. French et Matsusato, considèrent que les hydrates carbonatent simultanément [24].

Autres réaction de CO_2 avec les différents alcalis (Na_2O , K_2O) [25] :

- Alcali (Na_2O):



- Alcali (K_2O):



Nous constatons dans chaque réaction que le produit final contient le carbonate de calcium (CaCO_3) qui baisse le pH de 12.6 (milieu initial) à une valeur inférieure à 9.

1.2.3 Facteurs contrôlant la carbonatation :

Le taux de carbonatation d'un matériau à base de liant hydraulique dépend des caractéristiques intrinsèques du matériau (porosité, conditions de cure...) et des facteurs liés à l'environnement extérieur (température, humidité, teneur en CO₂...).

La progression de la carbonatation vers le coeur du matériau est généralement considérée comme proportionnelle à la racine carrée du temps d'exposition au dioxyde de carbone [26], c'est-à-dire selon un processus assimilable à un processus diffusionnel, soit :

$$P_c = a.t^{0.5} \quad (I-36)$$

Où P_c : épaisseur moyenne de carbonatation.

a : coefficient de proportionnalité variant de 0,5 à 1 .

t : temps d'exposition au dioxyde de carbone.

La relation (I-36) a été pratiquement validée par des essais de laboratoire effectués par SHISSL.P [26] comme le montre la figure (I.8):

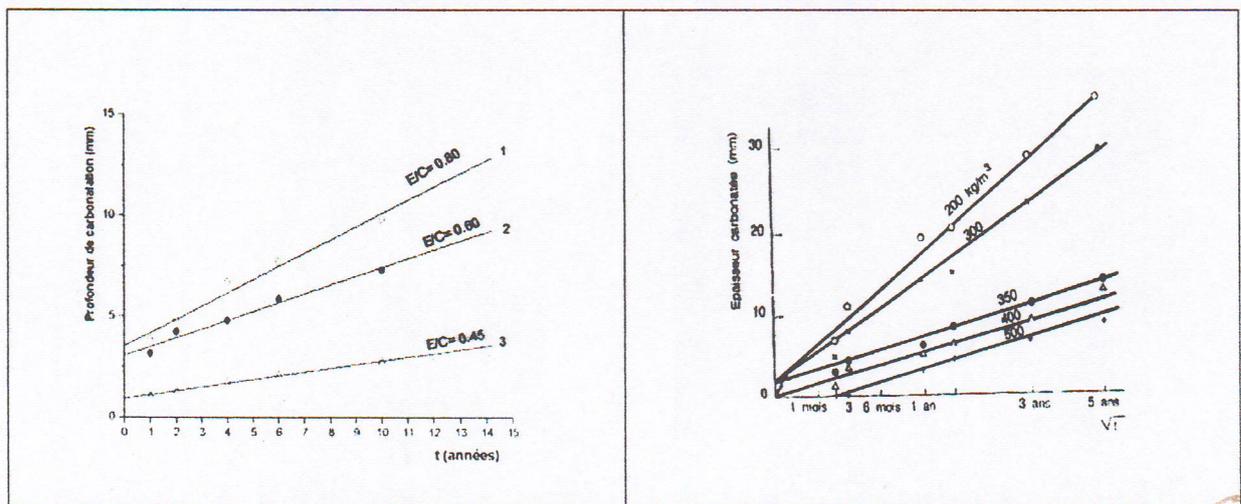


Figure I.8: Evolution dans le temps de l'épaisseur carbonatée des bétons de différents rapports E/C et différents dosages en ciment d'après [26].

Le processus de carbonatation comprend plusieurs étapes et chacune peut être le phénomène limitant la cinétique de carbonatation :

- 1- Diffusion du CO₂ dans les pores du matériau.
- 2- Dissolution du CO₂ dans la solution des pores
- 3- Mise en solution de calcium par dissolution de la Portlandite et décalcification des C-S-H.
- 4- Réaction du CO₂ dissous avec le calcium en solution.
- 5- Précipitation de carbonates de calcium.

Les auteurs Papadakis [27], Saetta [28] qui ont modélisé le processus de carbonatation considèrent que la réaction est limitée physiquement par la diffusion du dioxyde de carbone dans la phase gazeuse de l'espace poreux et chimiquement par la disponibilité en calcium et hydroxydes dans l'eau des pores. En effet, la carbonatation est une réaction qui a lieu en milieu aqueux. Cependant le coefficient de diffusion du CO₂ dans l'air est 10 000 fois plus élevé que dans l'eau Duval [29]. En d'autres termes, lorsque les pores sont saturés d'eau, la pénétration du dioxyde de carbone est extrêmement faible et la carbonatation inexistante. Inversement si la pâte de ciment est dans un milieu très sec, la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre le gaz carbonique Duval [29].

C'est pourquoi la carbonatation n'affecte un matériau à base de liant hydraulique que si les molécules d'eau tapissent les surfaces des pores sans les obstruer. C'est pour une humidité relative comprise entre 40 et 80 % que la carbonatation est maximale, on traduit souvent le phénomène par des courbes qui présentent l'allure de la figure (I.9) [30] ci – dessous et c'est dans ces conditions que la progression du front de carbonatation vers le coeur du matériau est la plus importante.

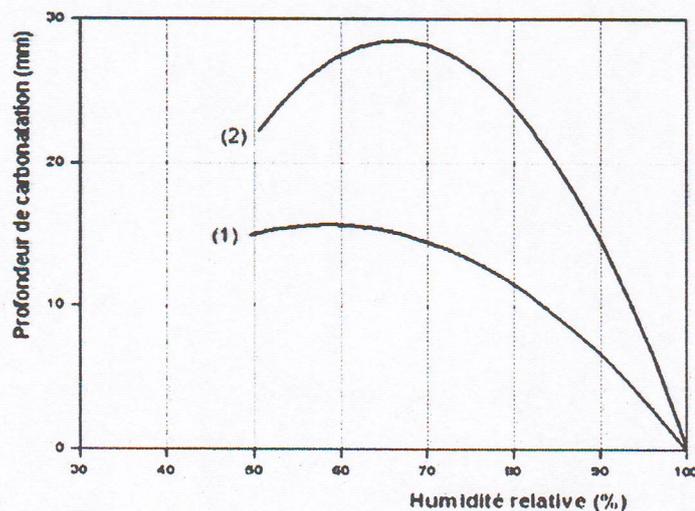
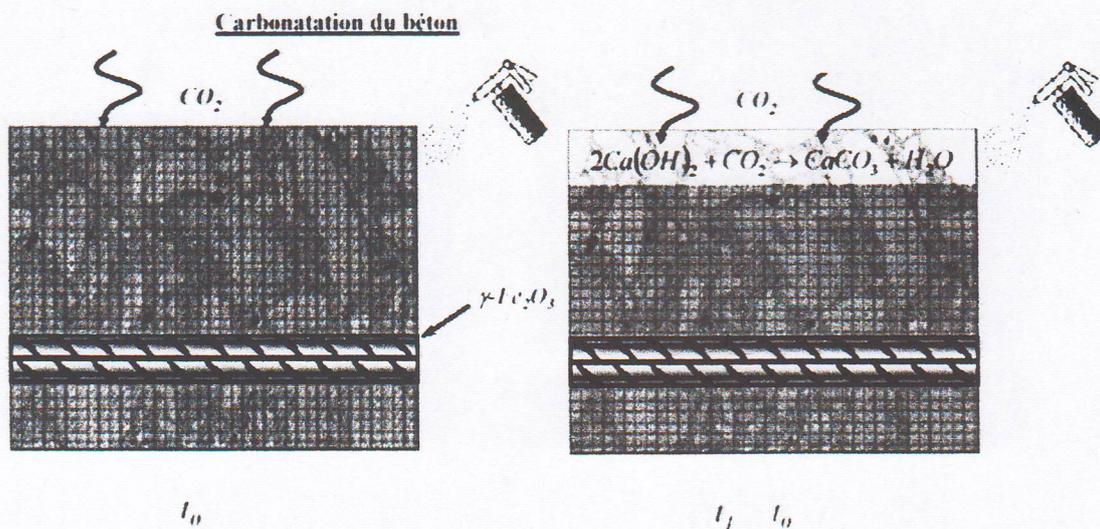


Figure I.9 : Influence de l'humidité relative sur la profondeur de carbonatation pour des bétons confectionnés avec des rapports E/C de 0.6 (courbe 1) et 0.8 (courbe 2) et conservés 16 ans à 20°C D'après Wierig [30]

Cependant la nature du processus de carbonatation limite sa progression vers le coeur du matériau puisque, comme cela est présenté plus loin, la formation de carbonate de calcium obture les pores et limite ainsi la diffusion du CO₂.

1.2.4 Mesure expérimentale de la profondeur de carbonatation :

La méthode la plus couramment utilisée pour déterminer la profondeur de carbonatation est le test à la phénolphthaléine (Ngala[31], Parrott[32], Patel[33]). Il consiste à rompre à sec une éprouvette, puis à vaporiser sur la section obtenue l'indicateur qui colore en violet les parties non carbonatées. Le virage colorimétrique de cette solution se situe à pH 8,7. Ce test indique le front de carbonatation totale et ne permet pas de faire de différence entre la carbonatation formée pendant le test et la carbonatation préexistante. La composition de la solution aqua-alcoolique phénolphthaléine : alcool 50%, eau 50%, phénolphthaléine <1 ‰ voir figures (I.10) suivantes :



Figures I.10: Mesure expérimentale de la profondeur de carbonatation.

1.2.5 Conséquences de la carbonatation sur la physicochimie de matériaux à base de liant hydraulique:

La carbonatation d'un matériau à base de liant hydraulique en modifie les caractéristiques physicochimiques:

- Le volume molaire de la calcite formée est supérieur de 11% à celui de la Portlandite (Lea) [34]. Par opposition, la carbonatation de l'ettringite entraîne une diminution de volume d'environ 35 %, mais les matériaux en contiennent peu. Par conséquent la précipitation de la calcite dans les pores modifie la porosité. La plupart des auteurs (Al-Kadhimi [21], Lange [35], Ngala [31]) ont noté la densification de la zone

carbonatée du matériau. Celle-ci traduit par une diminution de la porosité totale et de la perméabilité [31, 32 et 33], une réduction de la connectivité des pores par obturation [32], une modification de la distribution poreuse et une augmentation de la résistance mécanique [21] , [35].

Concernant la modification de la distribution poreuse certains auteurs (Parrott [32] et Patel [33]) ont montré que la proportion de grands pores diminue ($>30nm$). Au contraire Ngala [31] a observé une légère augmentation de la proportion des grands pores sur une pâte de ciment CPA hydratée. La décalcification des C-S-H modifie la distribution microporosimétrique.

- Smith [36] a montré que la précipitation de calcite suite à la carbonatation affecte de manière significative le transfert de masse de radionucléides. Par ailleurs, Parrott a établi, également pour un CPA hydraté, que la carbonatation provoque une diminution de la proportion de pores capillaires et que celle-ci est associée à une réduction du taux d'absorption en eau lorsque le matériau est remis en contact avec une solution aqueuse.
- La formation de carbonates à partir d'espèces alcalines provoque la neutralisation du matériau. L'alcalinité du matériau diminue. Dans la zone carbonatée le pH de la solution des pores est proche de 8 alors qu'il reste supérieur à 12 dans la zone saine (Malier [37], Diez [38]). Le front de carbonatation désigne la profondeur maximale atteinte par la carbonatation. Du coeur du matériau vers la surface s'établit un nouveau profil de pH (figure I.11) ainsi que de nouveaux profils de concentration en phases solides et aqueuses des espèces. Les espèces, dont la solubilité dépend du contexte physico-chimique et notamment du pH, peuvent se trouver mobilisées ou immobilisées.

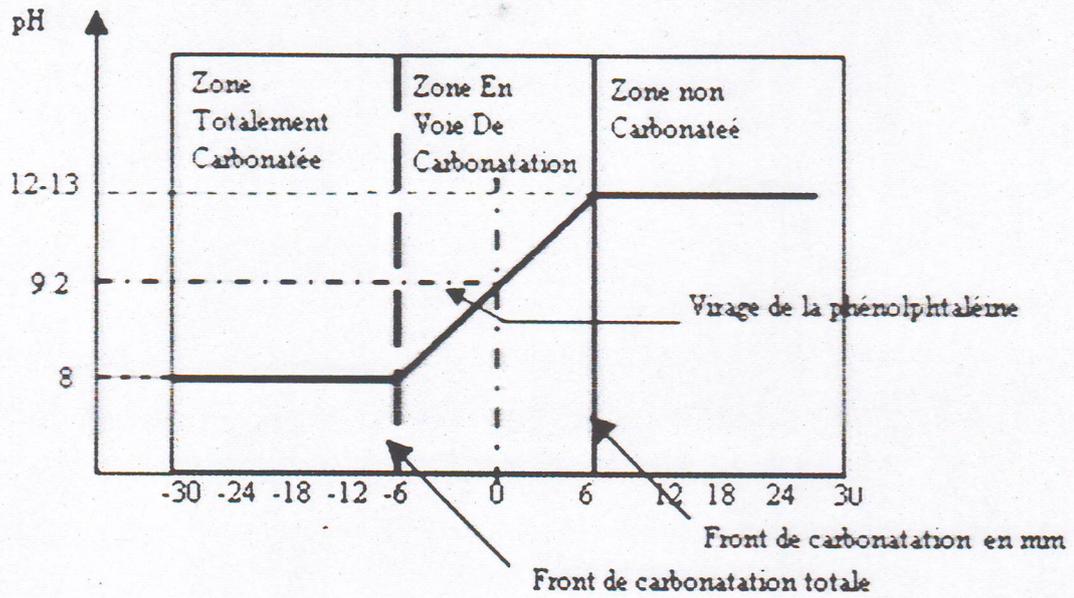


Figure L.11: Gradient de pH entre le front de carbonatation et la surface [26].

Chapitre II

*Matières premières, formulation des
bétons et mesures expérimentales*

Chapitre II: Matières premières, formulation des bétons et mesures expérimentales

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des matières premières, la méthode de formulation des bétons et description des essais utilisés pour :

- La caractérisation mécanique
- La mesure du coefficient d'absorption capillaire ou sorptivité
- La caractérisation de la zone de carbonatation

II.1 Matières premières:

Les Principaux composants des bétons élaborés sont :

II.1.1 Le ciment :

Le ciment utilisé est un ciment portland CPJ CEM II/A32.5 [NA 442 :2000] provenant de la cimenterie de Sour El Ghozlane. Ce ciment est composé d'après la fiche technique établie par le laboratoire de la cimenterie de Sour El Ghozlane de:

- 84% Clinker
- 10% d'ajouts actifs (Tuff)
- 06% de fines de cuisson (gypse)

II.1.1.1 Analyse chimique et minéralogique du ciment :

L'analyse chimique au Microscope Electronique à Balayage (MEB) réalisée au laboratoire de la cimenterie de Sour El Ghozlane a donnée Les résultats récapitulés dans le tableau (II.1) :

Tableau II.1: Analyse chimique du ciment CPJ CEM II/A 32.5 de Sour El-Ghozlane

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF	R.I	Total	CaOL
MAX	21.72	5.77	3.14	64.36	2.39	0.64	0.18	1.00	0.68	4.92	104.80	2.20
MIN	20.19	5.06	2.98	61.45	1.88	0.40	0.18	0.67	0.11	3.66	96.58	0.58
MOY	20.96	5.42	3.06	62.91	2.14	0.52	0.18	0.84	0.40	4.29	100.69	1.39
Ecart Type	0.76	0.36	0.08	1.45	0.26	0.12	0.00	0.17	0.29	0.63	4.11	0.99

La composition minéralogique du clinker a été déterminée en utilisant la formule de BOGUE [39] qui permet d'estimer la proportion de chaque phase du ciment à partir de sa composition chimique pondérale, soit:

$$C_3S = 4.07(CaO) - 7.06(SiO_2) - 6.72(Al_2O_3) - 1.43(Fe_2O_3) - 2.85(SO_3)$$

$$C_2S = 2.87(SiO_2) - 0.75(3CaO, SiO_2)$$

$$C_3A = 2.65(Al_2O_3) - 1.69(Fe_2O_3)$$

$$C_4AF = 3.04(Fe_2O_3)$$

Les résultats de calcul sont donnés dans le Tableau (II.2).

Tableau II.2 : Composition minéralogique du ciment CPJ CEM II A 32.5 de Sour El Ghozlane

	MAX (%)	MIN (%)	MOY (%)
C₃S	51.78	57.25	54.75
C₂S	18.72	10.56	14.47
C₃A	9.98	8.37	9.45
C₄AF	9.55	9.06	8.81

Ces quatre phases présentes dans le ciment ont été identifiées par une analyse aux rayons X. Cet essai est réalisé au niveau du laboratoire de physique à l'université Amar Telidji de Laghouat. Les résultats de cette analyse sont représentés par le diffractogramme de la figure II.1.

A remarquer que seulement la phase du Silicate de Calcium tricalcique C₃S et de l'Aluminate tricalcique C₃A ont été identifiées par le diffractomètre de rayons X, les deux autres phases n'ont pas pu être identifiées.

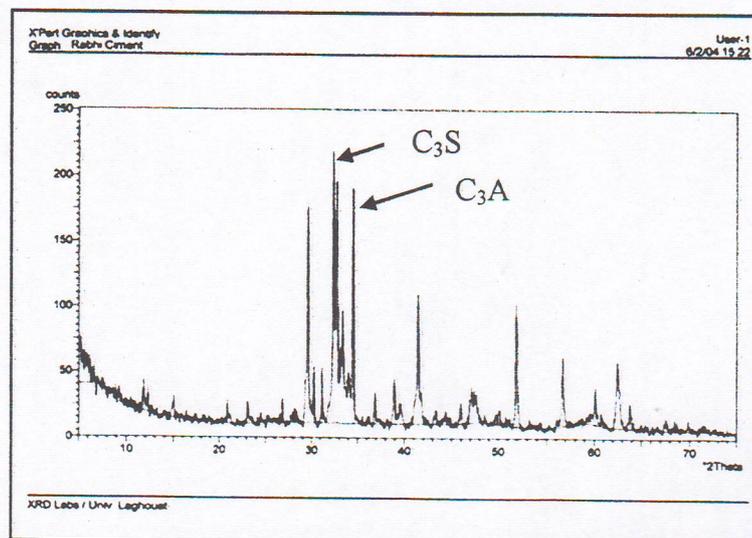


Figure II.1: Diffractogramme du ciment CPJ CEM II/A 32.5.

II.1.1.2 Caractéristiques physiques du ciment :

A. Masse volumique apparente : NF P18-555 [40]

C'est le rapport de la masse de l'échantillon M sur son volume total apparent V_{app} :

$$\rho_{app} = \frac{M_T}{V_{app}} \quad (\text{II.1})$$

Les résultats de mesure effectués sur trois échantillons de ciment ont donné comme valeur moyenne de la masse volumique apparente $\rho_{app} = 1026.43 \text{ kg/m}^3$ avec un écart type de 0.153 kg/m^3

B. Masse volumique absolue : NF P18-555 [40]

La masse volumique absolue est déterminée en utilisant le dispositif LeChatelier représenté sur la figure II.2.

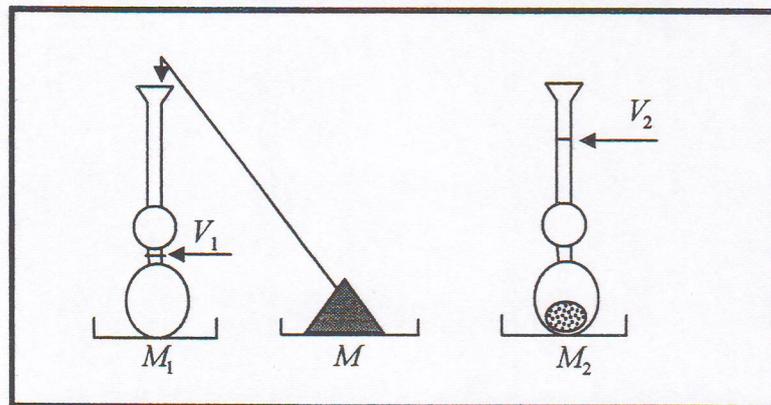


Figure II.2 : Dispositif expérimental de l'appareil LeChatelier

La masse volumique absolue est donnée par :

$$\rho_{abs} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} \quad (\text{II.2})$$

Où M_1 : Masse de (cellule + benzène),

M_2 : Masse de (cellule + benzène + ciment),

V_1 : Le volume du benzène initial,

V_2 : Le volume du benzène final (après introduction du ciment)

La masse volumique absolue moyenne calculée est $\rho_{abs} = 3040 \text{ kg/m}^3$ avec un écart type de 0.164 kg/m^3 .



C. Surface spécifique Blaine : NFP 196.6 [41]

Les ciments se présentent sous forme de poudre finement broyée, cette finesse est une caractéristique importante car lors du gâchage, plus la surface du ciment en contact avec l'eau est grande, plus l'hydratation est complète et rapide. De plus, si la surface spécifique d'un ciment est grande, plus la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation est grande. La finesse d'un ciment est exprimée par sa surface spécifique qui exprime la surface étendue des grains de l'unité de masse du ciment. Elle est généralement exprimée en (cm^2/g).

La méthode utilisée pour mesurer la surface spécifique est la perméabilité à l'air « *Méthode de Blaine* ». Il s'agit de faire passer un volume d'air connu à travers une poudre de filler. Plus la surface spécifique de la poudre est importante et plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long. Dans les conditions normalisées, la surface spécifique est proportionnelle à $t^{1/2}$. L'appareil utilisé dans cet essai est connu par *Appareil Blaine* (figure II.3). Cet essai est régi par la norme Française NFP 196.6 [41].

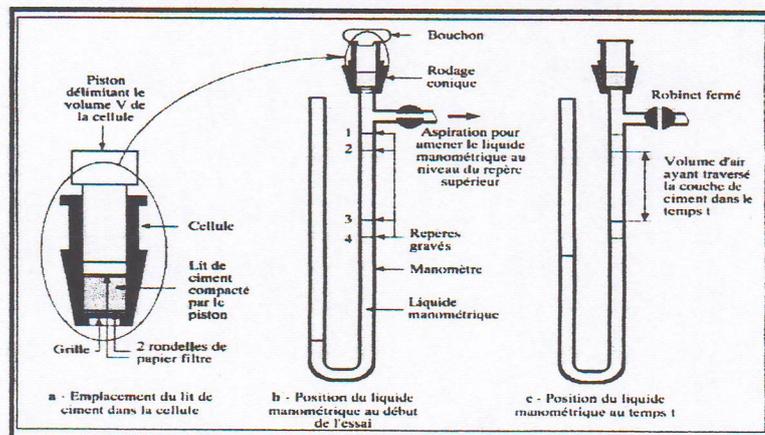


Figure II.3 : Dispositif expérimental du perméabilimètre *Blaine*

D'après cet essai, la surface spécifique est calculée à l'aide de l'expression :

$$S_m = K_s \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon^3 \cdot \sqrt{t}}}{\rho_{abs} (1-\varepsilon) \sqrt{\eta}} \quad (II.3)$$

Où K_s est la constante de l'appareil (= 43) ; ε , La porosité ; ρ_{abs} , La masse volumique absolue du ciment (kg/m^3) ; η , La viscosité dynamique de l'air ($Pa.s$) ; t , le temps en seconde mis par l'air pour traverser la masse du ciment.

Les résultats de cet essai ont donné une valeur moyenne de la surface spécifique du ciment utilisé de $3412 cm^2/g$ avec un écart type de 0.158.

D. Consistance normale et temps de prise du ciment :

- Consistance normale du ciment :

L'essai de consistance normale permet de déterminer le pourcentage d'eau nécessaire pour fabriquer une pâte dite de consistance normale. Cet essai est réalisé selon la norme EN 196-3 [42]. Il s'agit de mesurer l'enfoncement d'une sonde normalisée libre sous son propre poids dans une pâte préalablement préparée et contenue dans le moule tronconique de l'appareil de Vicat. La pâte est dite normale lorsque la différence entre la hauteur du moule et l'enfoncement de l'aiguille est égale à 6 ± 1 mm. Le malaxage est réalisé par un petit malaxeur où l'on doit suivre le procédé décrit par la norme.

En faisant varier le rapport E/C pour différents gâchés, on a trouvé que le rapport E/C correspondant à 27.8% est celui qui définit la consistance normale du ciment employé.

- Prise du ciment :

La durée de prise d'un ciment est généralement caractérisée par deux temps:

- Le temps de début de prise.
- Le temps de la fin de prise

On appelle le début de prise le moment où l'aiguille de Vicat, de section 1 mm^2 ne pénètre plus jusqu'au fond de l'anneau. La fin de prise correspond au moment où cette même aiguille ne laisse plus d'empreinte sur la pâte.

- ▶ La vitesse de prise augmente avec l'augmentation de la finesse de mouture du liant.
- ▶ La vitesse de prise est d'autant plus faible que la quantité d'eau de gâchage est élevée.
- ▶ L'accroissement de la température accélère la prise.

Les résultats de l'essai de prise sont regroupés dans le tableau II.3:

Tableau II.3 : Temps de début et de la fin de prise du ciment

	Essai à froid	Essai à chaud
Début de prise	2h32mn	27mn
Fin de prise	3h43mn	1h10mn

II.1.1.3 Caractéristiques mécaniques du ciment:

Les essais mécaniques sont réalisés au niveau du laboratoire de la cimenterie de Sour El Ghozlane. Les résultats de la résistance à la compression et à la traction du ciment sont donnés au tableau II.4 :

Tableau II.4 : Les caractéristiques mécaniques du ciment CPJ CEM II A 32.5

	2 jours	7 jours	28 jours
Résistance à la compression (MPa)	16.0	31.2	41.0
Résistance à la traction (MPa)	4.2	6.6	8.3

II.1.2 Le sable :

Le sable utilisé est un sable alluvionnaire (0/4) provenant de la région d'Oued M'zi située au nord de la ville de Laghouat.

II.1.2.1 Composition minéralogique du sable :

La composition minéralogique du sable est déterminée par l'analyse de diffraction des rayons X. Le diffractogramme du sable utilisé (figure II.4) montre qu'il est exclusivement composé du quartz SiO_2 avec quelques traces de calcium Ca, de Magnésium Mg et d'aluminium Al.

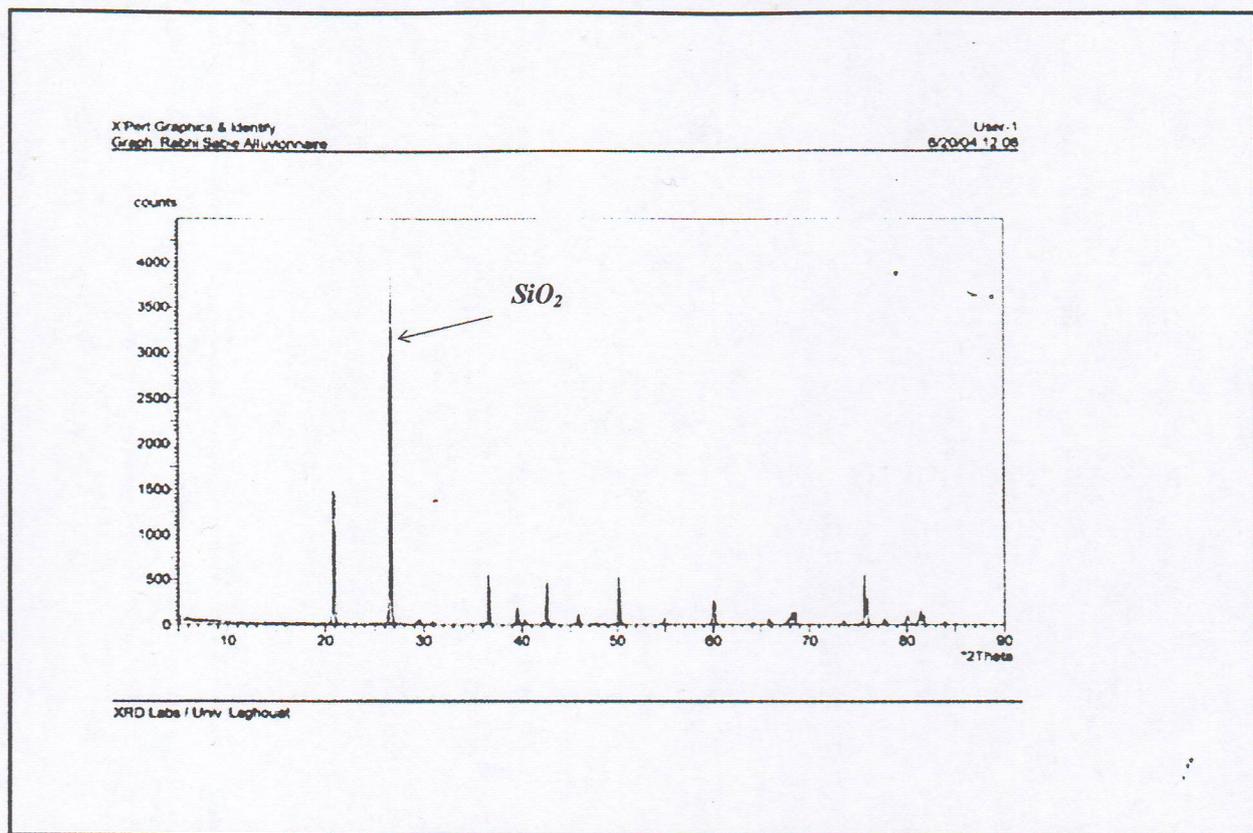


Figure II.4 : Diffractogramme de rayons X du sable.

II.1.2.2 Caractéristiques granulaire du sable :

A. Analyse granulométrique du sable:

La granulométrie est la distribution par dimension des grains d'un granulat. L'analyse granulométrique est l'un des essais les plus indispensables effectués dans la composition du béton. C'est un essai qui est réalisé selon NFP 18-431 [43] et qui consiste à classer les granulats suivant leurs grosseurs. Les résultats de l'analyse granulométrique du sable sont regroupés dans le tableau II.5, et sa courbe granulométrique est représentée sur la figure II.6. La forme de la courbe granulométrique du sable est une courbe des granulats riche en éléments fins.

B. Module de finesse :

La finesse du sable est définie comme étant la somme des refus cumulés exprimés en pourcentage sur les tamis de la série : 5, 2.5, 1.25, 0.63, 0.315 et 0.16 mm. Plus le module de finesse est élevé plus le granulat est grossier. Un bon sable de béton devrait avoir un module de finesse compris entre 2.20 et 2.80 [44].

Dans le cas de la granulométrie du sable .Le module de finesse égale à :

$$MF=(0+3.09+7.47+33.13+83.41+93.92)/100= 2.21$$

Le sable utilisé est donc de bonne qualité pour le béton.

Tableau II.5: Résultats de l'analyse granulométrique du sable (T=20 ±2°C et HR= 45±10%).

Masse du sable =1000g					
Module AFNOR	Diamètre des Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé en (%)	Tamisât en (%)
38	5	0	0	0	100.00
35	2.5	30.9	30.9	3.09	96.91
32	1.25	43.8	74.7	7.47	92.53
29	0.63	256.6	331.3	33.13	66.87
26	0.315	502.8	834.1	83.41	16.59
23	0.16	105.1	939.2	93.92	6.08
20	0.08	54.1	993.3	99.33	0.67
Fond	< 0.08	6.7	1000	100	0.00

II.1.2.3 Caractéristiques physiques du sable:

A. Masse volumique apparente ρ_{app} et absolue ρ_{abs} : NF P18-555 [40]

Les masses volumiques apparente et absolue moyennes du sable sont :

$$\rho_{app}= 1543.03 \text{ kg/m}^3 \text{ avec un écart type de } 2.39 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{abs}= 2569.67 \text{ kg/m}^3 \text{ avec un écart type de } 70.72 \text{ kg/m}^3$$

B. Compacité et porosité:

La compacité (C_c) est le rapport du volume de la matière pleine au volume total.

L'essai est réalisé selon la norme NFP18-555[40] :

$$C_c = \frac{V - V_v}{V} = 1 - \frac{V_v}{V} = 1 - \varepsilon \quad (II.4)$$

$$C_c = \frac{V_{abs}}{V} = \frac{\rho_{abs}}{\rho_{app}}$$

Où V_v est le volume des vides et V , le volume total apparent. e , étant la Porosité.

Les résultats de mesure donne : $C_c = \frac{1543.03}{2569.67} = 0.60$ soit $\varepsilon = 1 - C_c = 0.40$

C. Coefficient d'absorption :

Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition dans l'eau à 20°C pendant 24 heures (NFP18-555) [40], soit

$$Ab = \frac{Ma - Ms}{Ms} \cdot 100 \quad (\text{II.5})$$

Où M_s est la masse de l'échantillon séché à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante ; M_a , est la masse de l'échantillon après imbibition dans l'eau pendant 24h à T=20°C.

D. Equivalent de sable:

L'équivalent de sable (Es) indique le degrés de pollution des éléments d'un sol. Il permet de contrôler la propreté d'un sable et de déterminer le pourcentage des poussières nuisibles dans le matériau. Cet essai à été réalisé conformément à la norme NFP 18-598 [45]. Deux indices sont déterminés : Es à vue et E_s à piston

Les résultats de l'essai d'équivalent de sable sont récapitulés dans le tableau II.6 suivant :

Tableau II.6 : Equivalent du sable

	H ₂ (cm)	H ₁ (cm)	H ₂ *(cm)	Es visuel %	Es piston %
Essai N °1	10.8	11	10.7	0.9818	0.9727
Essai N °2	16.7	16.8	16.6	0.9940	0.9881
MOYENNE				0.9879	0.9804

Ces résultats montrent que le sable utilisé est un sable très propre.

II.1.3 Le gravier :

Le gravier est d'origine calcaire, concassé, composé de deux fractions 3/8 ,8/15 provenant de la carrière de Ouazane située dans la région nord de la ville de Laghouat. Les graviers concassés adhèrent bien à la pâte de ciment et offrent au béton de bonnes caractéristiques mécaniques.

II.1.3.1 L'analyse granulométrique du gravier:

Les résultats de l'analyse granulométrique du gravier 8/15 et 3/8 sont donnés respectivement dans les tableaux II.7 et II.8. Leurs courbes granulométriques sont montrées sur la figure II-5

Tableau II.7: Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 8/15

Masse du gravier=3000g					
Module AFNOR	D-Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé en (%)	Tamisât en (%)
43	16	0.00	0.00	0.00	100.00
42	14	609.50	609.50	20.32	79.68
41	10	1730.00	2339.50	77.98	22.02
40	8	566.50	2906.00	96.87	3.13
39	6.3	87.50	2993.50	99.78	0.22
Fond	< 6.3	6.50	3000.00	100.00	0.00

Tableau II.8: Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 3/8

Masse du gravier=1600g					
Module AFNOR	D-Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé en (%)	Tamisât en (%)
40	8	0.00	0.00	0.00	100.00
39	6.3	434.00	434.00	27.13	72.88
38	5	539.00	973.00	60.81	39.19
37	4	229.00	1202.00	75.13	24.88
36	3.15	269.00	1471.00	91.94	8.06
Fond	Fond	129.00	1600.00	100.00	0.00

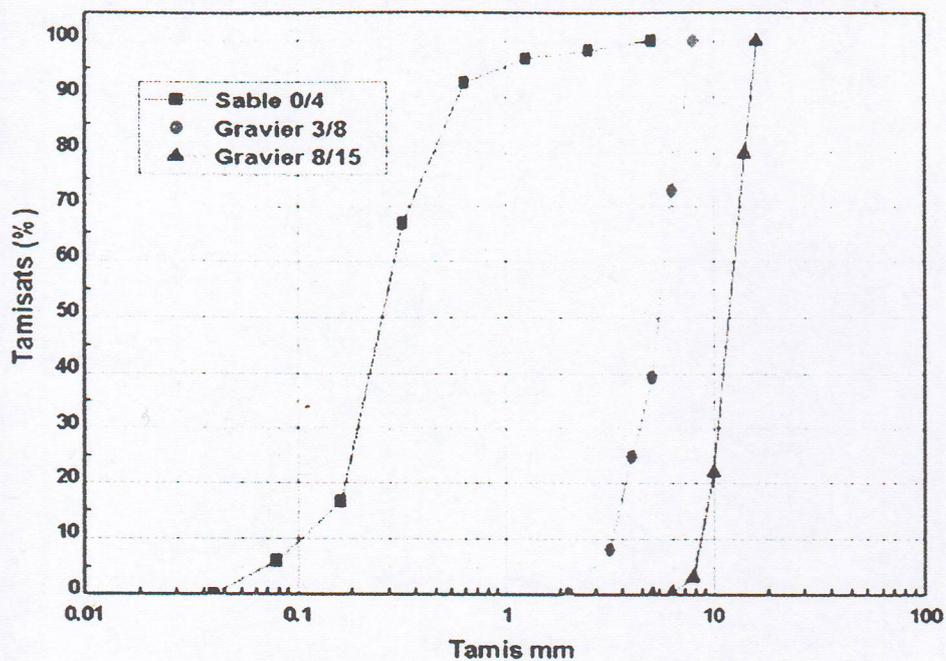


Figure II-5 : Courbes granulométriques des granulats

II.1.3.2 Caractéristiques physiques du gravier:

Les propriétés physiques des graviers calcaires sont regroupées dans le tableau II.9

Tableau II.9 : Caractéristiques physiques du gravier

Propriété physique	Classe granulaire	
	3 / 8	8 / 15
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.360	1.353
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.66	2.66
Porosité e (%)	51.13	50.86
Degré d'absorption (%)	0.2386	0.0961
Teneur en eau (%)	0.1580	0.0960
Résistance au choc : Coefficient Los Angeles (%)	24.57	28.76

II.1.4 L'eau de gâchage:

L'eau utilisée est une eau potable du robinet. Elle convient pour la confection du béton à condition qu'elle remplit toutes les prescriptions des normes NF P 18-303 [46] et EN 1008 concernant les concentrations des matières en suspension et les sels dissous. Une eau de mauvaise qualité peut avoir des effets néfastes sur le béton tels que la carbonatation, la corrosion des armatures, la diminution de la résistance mécanique, l'accélération ou le ralentissement du temps de prise et l'apparition des taches nuisibles sur la surface du béton.

II.1.4.1 l'analyse chimique de l'eau de gâchage :

L'analyse chimique de cette eau est effectuée au laboratoire de l'EPDEMIÀ et elle indique que c'est une eau de potabilité chimique passable à bonne avec un pourcentage élevé de sulfates. Les résultats de l'analyse chimique de l'eau de gâchage sont donnés dans le tableau II.10.

Tableau II.10: L'analyse chimique de l'eau de gâchage

Nature du point d'eau	Concentration en cations et en anions			
Ca ⁺² en mg/L	104	Balance		5.2
Mg ⁺² en mg/L	97	Cations		8
Na ⁺ en mg/L	102.3	m.éq/L		4.45
K ⁺ en mg/L	6.46	18.73		0.16
Cl ⁻ en mg/L	148	Balance		4.17
SO ₄ ⁻² en mg/L	520	Anions		10.82
HCO ₃ ⁻ en mg/L	94	m.éq/L		1.55
NO ₃ ⁻ en mg/L	12.4	16.24		0.2
Résidu sec à 105°C 1576 mg/l	PH (laboratoire) 7.7	Conductivité en 1/10 mm à 25° 16.80		Dureté total 43.25
Test chlore (ml d'eau de javel à 15° /m ³ 0.96 ml/l)	T.H 66°F	T.A.C 7.75°F	S.A.F 95°F	I.S 62°F
Minéralisation 1067 mg/l	Oxygène dissous O ₂ 12.05	SiO ₂ 0.0 mg/l		Somme des ions 1101.55
Cations	Ca ⁺² =15%	Mg ⁺² =23%		Na ⁺ =13% K ⁺ =0.5%
Anions	SO ₄ ⁻² =31.3%	Cl ⁻ =12%		HCO ₃ ⁻ =4.5% NO ₃ =30.60%

II.2 Formulation des bétons :

Afin de répondre à notre objectif, quatre séries de béton ont été confectionnées en faisant varier le dosage en ciment de 300 à 450 kg/m³ avec un pas de 50.kg/m³. Nous avons fixé le même critère d'ouvrabilité à tous les bétons confectionnés afin de mener une étude rationnelle et objective. A cet effet, on a veillé lors de la formulation que l'affaissement au cône d'Abrams des bétons soit compris entre 6 et 8 cm.

La formulation d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents constituants du béton permettant d'assurer à la fois une ouvrabilité et une résistance mécanique convenables. La méthode de formulation utilisée est celle de Dreux Gorisse [44]. C'est une méthode simple et pratique basée sur les courbes granulométriques des granulats.

II.2.1 Principe de la méthode de Dreux-Gorisse:

Le principe de la méthode consiste à déterminer pour une ouvrabilité et une résistance escomptées:

- Le dosage en ciment et en eau à partir de la formule de Bolomey.
- Les proportions volumétriques des classes granulaires à partir de la courbe granulométrique.
- Les proportions pondérales des constituants pour un mètre cube du béton.

L'explication des différentes étapes de la méthode peut être éclaircie à travers l'étude de l'exemple du béton dosé à 400 kg/m³. Les caractéristiques préliminaires moyennes du béton à formuler sont :

- **Consistance plastique** : Un affaissement au cône d'Abrams d'environ 6 à 8 cm.
- **Résistance** : une résistance nominale à la compression à 28 jours de $\sigma'_n = 24MPa$.

II.2.1.1 Le dosage en eau :

Le dosage en eau peut être déterminé en considérant la relation suivante :

$$\sigma'_{28} = G \cdot \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad (\text{II.7})$$

et:
$$\sigma'_{28} = \sigma'_n + 15\% \cdot \sigma'_n \quad (\text{II.8})$$

Avec :

σ'_{28} : résistance moyenne en compression désirée à 28 jours déterminée par la relation (II.8)

σ'_c : la classe vrai du ciment calculée à 28 jours égale à 410 bars (voir tableau II.4)

σ'_n : résistance nominale en compression à 28 jours $\sigma'_n = 240$ bars .

C : Dosage en ciment exprimé en kg/m^3

E : Dosage en eau totale efficace pour les matériaux secs (en litre pour 1 m^3)

G : Coefficient granulaire égale à 0.45 pour les granulats courants

En appliquant la relation (II-8), on trouve pour un dosage en ciment de 400 kg/m^3 les rapports suivants :

- le rapport $C/E \approx 2$
- le dosage en ciment $C = 400 \text{ kg/m}^3$
- le dosage en eau $E = 200 \text{ l/m}^3$

II.2.1.2 Le dosage des granulats:

Les courbes granulométriques des granulats sont présentées sur la figure II-6 .On procède à la représentation linéaire de la courbe granulaire de référence OAB (figure II-6.a et b) qui selon Dreux -Gorisse [44], le point de brisure A de la courbe de référence est à l'abscisse

$\frac{D}{2} = 8 \text{ mm}$ (module 40) son ordonnée est donnée par :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K_r + K_{rs} \quad (\text{II.9})$$

où K_r est un coefficient de correction fonction du dosage en ciment, de la puissance de vibration et de l'angularité des granulats. Pour un dosage en ciment de 400 kg ; un granulat concassé et une vibration normal, on opte pour valeur de $K = 0$.

K_{rs} est un terme de correction supplémentaire, il est fonction du module de finesse du sable :

$$K_s = 6.MF - 15$$

Pour le sable utilisé : $MF = 2.21$, soit $K_s = -1.74$.

D'où l'ordonnée correspondant au dosage en ciment de 400 kg :

$$Y = 50 - 4 + 0 - 1.74 = 44.26 \%$$

Pour les autres dosages en ciment les valeurs de l'ordonnée Y sont regroupées dans le tableau II.11:

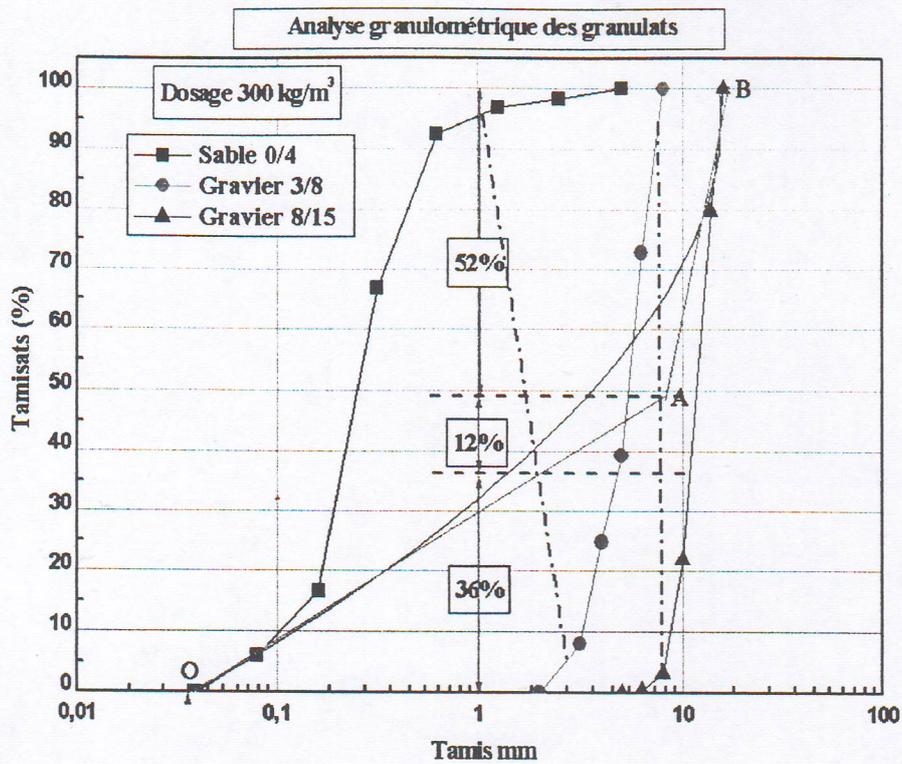


Figure II-6.a: Courbes granulométriques des granulats de béton dosé à 300 kg/m³

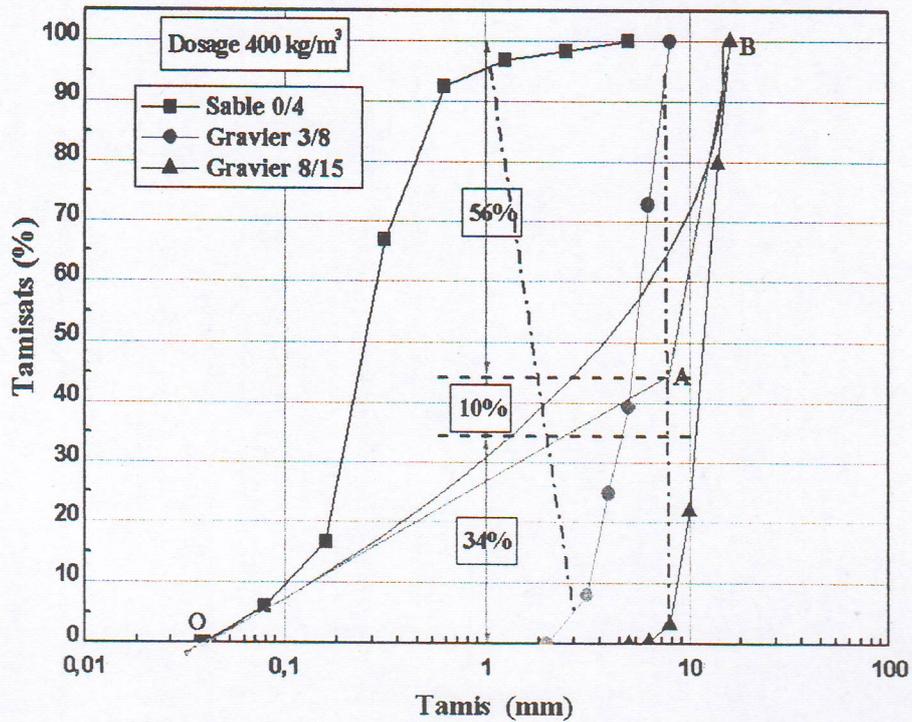


Figure II-6.b: Courbes granulométriques des granulats de béton dosé à 400 kg/m³

Tableau II.11: Les termes de correction et l'ordonnée Y pour les différents dosage en ciment

Dosage en ciment (kg/m ³)	L'abscisse de point A (mm)	K	Ks	Y (%)
300	8	+4	-1.74	48.26
350	8	+2	-1.74	46.26
400	8	0	-1.74	44.26
450	8	-2	-1.74	42.26

La ligne de partage entre les deux granulats s'obtient en joignant le point 95% de la courbe du sable au point 5% de la courbe du gravier 3/8 et la deuxième ligne de partage entre les deux graviers 3/8 et 8/15 (95%, 5%). Les deux points de rencontre des deux lignes de partage avec la courbe de référence OAB (dosage 400) donne le partage des pourcentages de sable et de gravier 3/8 et 8/15, soit:

- Pourcentage de sable 0/4 : **34 %**
- Pourcentage de gravier 3/8 : **10 %**
- Pourcentage de gravier 8/15 : **56 %**

Les pourcentages correspondants aux autres dosages en ciment sont regroupés dans le tableau **II.12**

Tableau II.12: le partage des pourcentages des granulats.

Granulat	Les pourcentages des granulats pour les différents dosages (%)		
	Dosage 300 kg/m ³	Dosage 350 kg/m ³	Dosage 450 kg/m ³
Sable 0/4	36	35	33
Gravier 3/8	12	11	09
Gravier 8/15	52	54	56

II.2.1.3 Évaluation des proportions pondérales des composants de béton :

Pour estimer les masses des granulats nécessaires à formuler un mètre cube de béton, on doit déterminer le coefficient de compacité γ . Cette valeur est choisie en fonction du diamètre D (16mm), de la consistance et du mode de serrage. Ce coefficient est le rapport

des volumes réels des composants solides du béton et du volume unitaire de béton frais (1000 litres).

Par interpolation linéaire entre les valeurs $\gamma_{D12.5}=0.815$ et $\gamma_{D20}=0.825$ (pour un béton plastique, vibration normal) on obtient $\gamma_{D16}=0.820$, les volumes absolus des constituants solides sont les suivants :

-
- Volume total absolu = $1000 \cdot \gamma = 820$ litres .
 - Volume absolu du ciment = $\frac{400}{3.04} = 131.58$ litres.
 - Volume absolu des granulats = $820 - 131.58 = 688.42$ litres
 - Volume absolu du sable 0/4 = $688.42 \times 0.34 = 234.063$ litres
 - Volume absolu du gravier 3/8 = $688.42 \times 0.10 = 68.842$ litres
 - Volume absolu du gravier 8/15 = $688.42 \times 0.56 = 385.516$ litres

Volume total (vérification) = 820 litres

Les densités absolues des granulats sont de 2.57 pour le sable et 2.66 pour le gravier. Il s'ensuit les dosages massiques en matériaux secs suivants :

- Sable 0/4 $S_1 = 234.063 \times 2.57 = 601.542$ kg
- Gravier $G_{g3/8} = 68.842 \times 2.66 = 183.120$ kg
- Gravier $G_{g8/15} = 385.516 \times 2.66 = 1025.473$ kg
- Ciment C = 400 kg
- Eau efficace $E = 200$ kg. ($\rho_{eau} = 1$ kg/litre).

II.2.1.4 Pris en compte de l'absorption des granulats :

Les granulats disposent d'une porosité non négligeable, ils doivent être introduits humides dans le malaxeur de manière à ce qu'ils aient préalablement absorbés la quantité d'eau correspond à leur porosité. Sinon, cette absorption se produira au cours du malaxage et la consistance du matériau pourra affectée. Dans ce cas, si G_g est le dosage en gravillon à l'état sec, ω_g sa teneur en eau et A_{bG} son coefficient d'absorption du gravier et si S_1 est le dosage en sable à l'état sec, ω_s sa teneur en eau et A_{bs} son coefficient d'absorption du sable. Les dosages M_{Ga} et M_{sa} du gravier et du sable humides à prévoir sont:

$$\begin{aligned} M_{sa} &= S_1 (1 + \omega_s) \\ M_{Ga} &= G_g (1 + \omega_g) \end{aligned} \quad (II.10)$$

La quantité d'eau d'apport devant être introduite dans le malaxeur est :

$$E' = E - M_{sa} \frac{\omega_s - A_{ts}}{1 + \omega_s} - M_{Ga1} \frac{\omega_{G1} - A_{tG1}}{1 + \omega_{G1}} - M_{Ga2} \frac{\omega_{G2} - A_{tG2}}{1 + \omega_{G2}} \quad (II.11)$$

A titre d'exemple: les proportions pondérales des composants de béton dosé à 400 kg/m³

sont :

Sable 0/4	$M_{Sa} \dots \dots \dots M_{Sa} = S_1 \cdot (1 + \omega_s) = 601.542 \times (1 + 0.0067) =$	605.57 kg
Gravier $M_{Ga3/8}$	$\dots \dots \dots M_{Ga3/8} = G_{g\ 3/8} \cdot (1 + \omega_{G1}) = 183.120 \times (1 + 0.00158) =$	183.41 kg
Gravier $M_{Ga8/15}$	$\dots \dots \dots M_{Ga8/15} = G_{g\ 8/15} \cdot (1 + \omega_{G2}) = 1025.473 \times (1 + 0.00096) =$	1026.46 kg
Ciment C	$\dots \dots \dots$	400.00 kg
Eau d'apport E'	$\dots \dots \dots$	200.85 litres

Résultat des compositions des bétons sont regroupés dans tableau II.13 suivant :

Tableau II.13: compositions des bétons

Composition	B30	B35	B40	B45
Gravier 8/15 [humide] (kg/m ³)	998.68	1013.44	1026.46	1037.72
Gravier 3/8 [humide] (kg/m ³)	230.61	206.57	183.41	161.12
Sable 0/4 [humide] (kg/m ³)	671.83	638.28	605.57	573.72
Ciment CPJ32.5A (kg/m ³)	300	350	400	450
Eau efficace E (litres)	200	200	200	200
Densité du béton frais (kg/m ³)	2397.95	2405.28	2412.57	2419.84
E/C	0.67	0.57	0.50	0.45
G _g /S ₁	1.8298	1.9114	1.9979	2.0896
Affaissement A (cm)	08	07	07	06
Eau de gâchage Total E' (litres)	200.83	200.84	200.85	200.86

II.2.1.5 l'influence de la granularité sur le béton :

La proportion relative de sable et de gravier doit être telle que le béton présente une homogénéité satisfaisante sans aucun risque de ségrégation, l'influence de la granularité sera jugée par le rapport (G_g/S_1). Il a été constaté selon les expériences entreprises que:

Plus le rapport G/S est élevé, plus le béton présentera des résistances mécaniques élevées, par contre il présente des difficultés de mise en œuvre par manque d'ouvrabilité.

A propos des résultats obtenus concernant la composition des bétons élaborés, le rapport G_g/S_1 pour les quatre types du béton (B30, B35, B40 et B45) varie de 1.8 et 2.10 (voir tableau II.17). Ceci implique que le béton obtenu est un béton normal de plasticité variable en fonction du dosage en eau, de mise en œuvre facile mais ne permettant pas des résistances exceptionnelles.

II.2.1.6 Préparation des éprouvettes d'essais:

Les différentes classes de bétons sont élaborées conformément aux compositions données dans le tableau II.13. Les conditions climatiques durant la préparation des gâchées sont celles présentées dans le tableau II.14.

Le mode de préparation des gâchées a été uniformisé pour tous les types de bétons préparés. En effet, après avoir peser les quantités de sable, de gravillons lavés et du ciment, les composants seront introduits dans le malaxeur selon les normes NF P .18-404[47] et dans l'ordre suivant : (gravillons + ciment + sable). Le malaxage de ces trois constituants a été réalisé à sec pendant une minute avant de verser la quantité d'eau nécessaire, ensuite on poursuit le malaxage humide pendant deux autres minutes, ce malaxage sera interrompu pendant une minute pour racler les parois afin d'homogénéiser le béton puis on redémarre le malaxage pendant une dernière minute.

Tableau II.14: Données climatologiques durant la période de la confection

Données climatologiques Dans laboratoire	Période de la confection	
	Début de la confection 13 MARS	Fin de confection 03 AVRIL
Température T moy (en °c)	20 ± 2°C	20 ± 2°C
Humidité relative (HR %)	45 ± 10%	45 ± 10%

Deux types d'éprouvettes sont confectionnés selon le type de l'essai à réaliser:

- Des éprouvettes prismatiques ($7 \times 7 \times 28$) cm^3 (norme NF P 18-400 [48]): Ces éprouvettes sont confectionnées pour la détermination de la résistance à la traction par flexion et la résistance à la compression ainsi que pour les essais d'absorption capillaire.
- Des éprouvettes cylindriques (16×32) cm^2 (norme NF P 18-400 [48]): Ces éprouvettes sont destinées aux essais de durabilité vis-à-vis de la carbonatation.

II.2.2 Modes de cure:

Le démoulage a été fait 24 heures après la confection des éprouvettes. Celles-ci ont été conservées par la suite dans l'ambiance du laboratoire ($T=20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $\text{HR}=45 \pm 10\%$). Afin d'étudier l'influence du mode de cure sur les caractéristiques physicomécaniques, les éprouvettes ont subies, après démoulage les deux modes de conservations suivants :

Model : conservation dans l'air du laboratoire ($T=20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $\text{HR}=45 \pm 10\%$).

Mode2 : conservation dans l'eau à $T=20 \pm 2^\circ\text{C}$, pendant : 0 jours (témoin) ; 3 ; 7 ; 14 et 28 jours.

Après que la durée de cure ait été terminée, les éprouvettes seront placées dans l'ambiance du laboratoire à ($T=20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $\text{HR}=45 \pm 10\%$) jusqu'à le jour j de l'essai.

II.3 Mesures expérimentales:

Les éprouvettes des différentes classes de bétons élaborées ont été soumises à trois campagnes d'essais, conformément à l'organigramme dressé à la figure II-7 :

- Essais de résistances mécaniques : il s'agit de la détermination de la résistance à la compression et à la traction à 28 jours en tenant compte de l'effet de cure ainsi que la résistance à la compression après carbonatation à l'age 180 jours.
- L'essai d'absorption capillaire : cet essai a été conduit à l'age de 28 jours pour les différentes classes de bétons et pour les différents modes de cure ainsi qu'après carbonatation à l'age de 180 jours). Les paramètres à déterminer par cet essai sont :
 - Le coefficient d'absorption initial.
 - La sorptivité et le coefficient de capillarité respectivement en fonction de la masse d'eau absorbée et en fonction de la hauteur du front d'imbibition capillaire.

- L'essai de carbonatation des bétons : il s'agit de la détermination de la profondeur de la zone du béton de peau carbonatée pour les différentes classes de béton et en tenant compte de l'influence du mode de cure.

Chaque essai est réalisé sur trois éprouvettes de la même composition, et la valeur moyenne des trois essais a été prise comme valeur caractéristique.

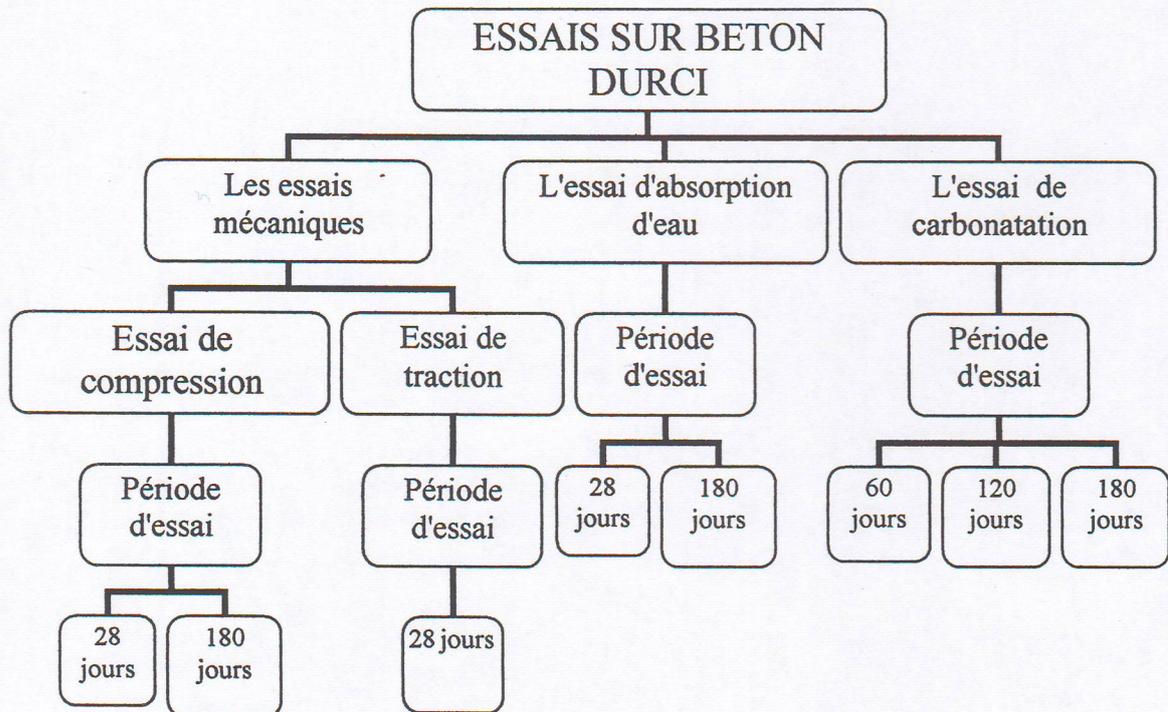


Figure II-7 : Organigramme représentatif des différents essais effectués.

II.3.1 Résistances mécaniques:

II.3.1.1 Résistance à la traction (flexion trois points):

C'est un essai destructif est réalisé sur des éprouvettes prismatiques $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$ selon les normes NF P. 18-407 [50], il s'agit de déterminer la résistance à la flexion (3 points) de l'éprouvette soumise à un effort centré exercé à l'aide d'une presse hydraulique conformément à figure II-8.

La résistance à la traction en MPa est la moyenne des résultats de trois éprouvettes. La contrainte de traction par flexion est donnée par la relation ci-dessous :

$$\sigma_t = \frac{3PL}{2B^3} \quad (\text{II.12})$$

Ou σ_t : contrainte de traction (en MPa).

P : charge de rupture (en KN).

B : coté de la section carrée (en mm), B=70mm.

L : distance entre appuis (en mm), L=200mm.

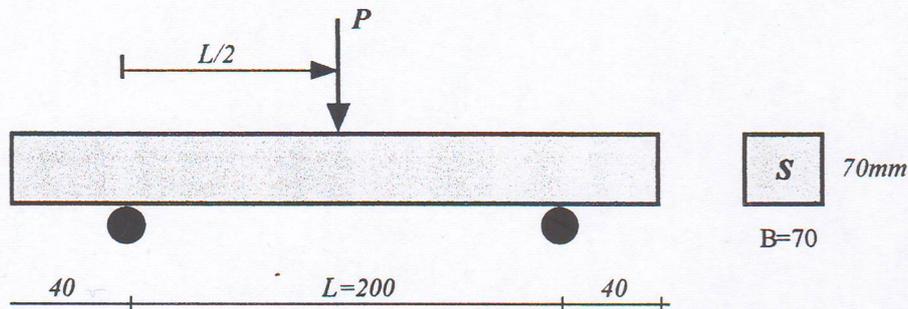


Figure II-8: Schéma mécanique de l'essai de traction par flexion trois points.

II.3.1.2 Résistance à la compression:

Les deux portions de l'éprouvette résultant de l'essai de traction ont été soumises par la suite à l'essai de compression conformément à la norme NF P. 18-406 [49]. La section sollicitée est de $7 \times 7 \text{ cm}^2$. L'éprouvette en question doit être d'une bonne planéité et de surface uniforme.

Principe d'essai :

L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture, la contrainte de compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette:

$$\sigma_c = \frac{P}{S} \quad (\text{II.13})$$

Ou σ_c : contrainte de compression (en MPa).

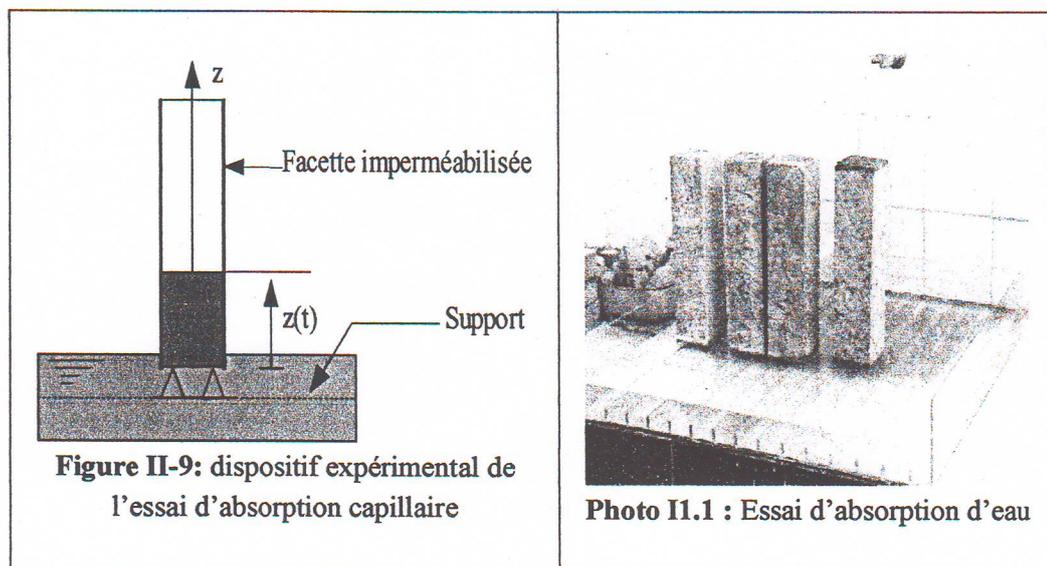
P : charge de rupture (en N).

S : surface de compression de l'éprouvette ($7 \times 7 \text{ cm}^2$).

La résistance à la compression en MPa est la moyenne des résultats obtenus sur trois éprouvettes, la résistance à la compression du béton constitue un bon indicateur de la durabilité.

II.3.2 L'essai d'absorption d'eau des bétons :

Nous avons adopté un essai généralement appliqué à des terres cuites et des pierres calcaires normes NF P10-502 [51]. Il s'agit de mettre en contact la base de l'éprouvette prismatique ($7 \times 7 \text{ cm}^2$) avec une nappe d'eau à 1 cm de profondeur et de suivre l'évolution de la masse de ces éprouvette au cours du temps. La nappe d'eau est maintenue à niveau constant par un trop-plein (photo II.1). Les faces latérales sont imperméabilisées à l'aide d'un film plastique (un ruban plastique adhésive) qui force l'eau à adopter un cheminement uniaxial et éviter l'évaporation par ces mêmes faces. La masse d'eau absorbée est déterminée par des pesées successives des échantillons. La seule précaution à prendre consiste à éliminer la pellicule d'eau retenue sur la face inférieure de l'échantillon avant chaque pesée à l'aide d'un papier absorbant. Les essais sont réalisés dans les conditions de laboratoire ($T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $\text{HR} = 45 \pm 10\%$).



II.3.3 L'essai de carbonatation à court terme :

Après 28 jours de conservation, les éprouvettes cylindriques ($16 \times 32 \text{ cm}^2$) ont été placées dans une ambiance humide saturée en gaz carbonique CO_2 . Cette ambiance a été créée dans une salle complètement fermée, le gaz carbonique dans la salle est assuré par la transpiration et expiration de plantes vertes que nous avons placé dans la salle, l'humidité dans la salle est maintenue par arrosage périodique de la sciures de bois qui recouvre le sol de la salle d'expérience. Un contrôle quotidien de l'humidité dans la salle a permis de situer la plage de l'humidité qui varie de 60 % à 75%. Cet intervalle favorise le processus de carbonatation déjà

citée en paragraphe §1.2.3. La température dans la salle pendant la période d'essais est d'environ $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Les essais de caractérisation de la zone carbonatée ont été effectués après 60, 120 et 180 jours de conservation dans la salle. L'essai consiste à rompre par fendage les éprouvettes (essai Brésilien), les deux surfaces de rupture sont pulvérisées par la suite par une solution de **Phénolphthaléine** préparée comme indiqué au §1.2.4.

Cette solution permet de distinguer deux zones dans la surface pulvérisée :

- ▶ une zone interne de couleur violette qui caractérise la zone non carbonatée de la surface.
- ▶ une zone incolore externe qui caractérise la zone carbonatée de la surface. La mesure de l'épaisseur de cette zone caractérise la profondeur du front de carbonatation du béton.

Les étapes de l'essai sont résumées sur le schéma représenté par la figure II-10.

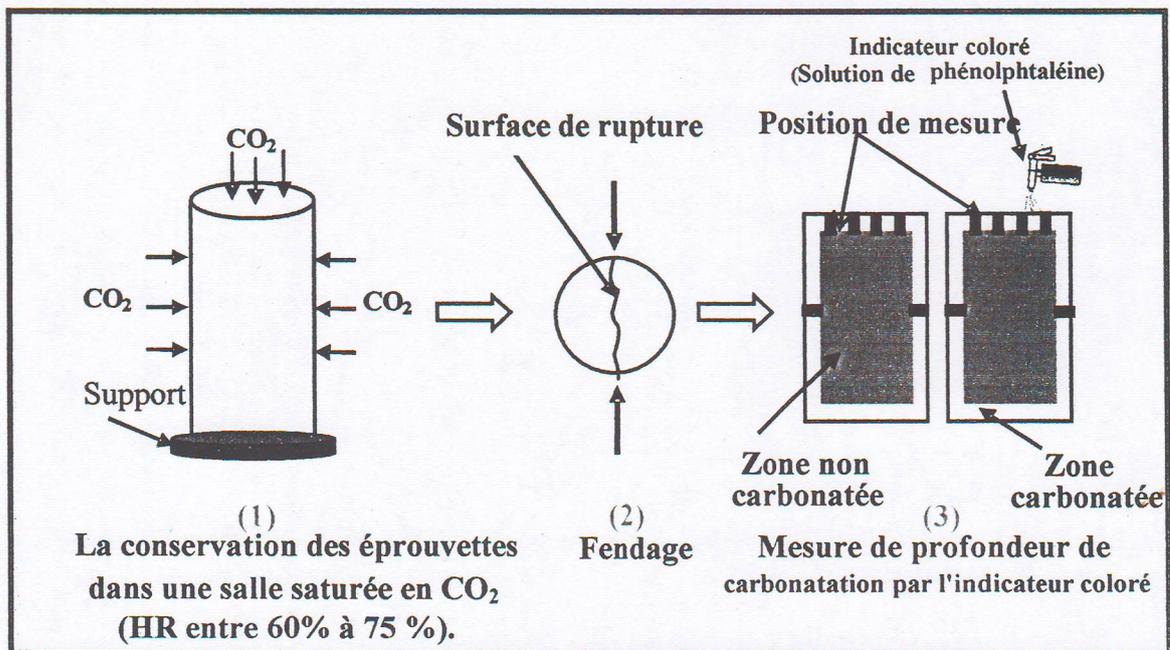
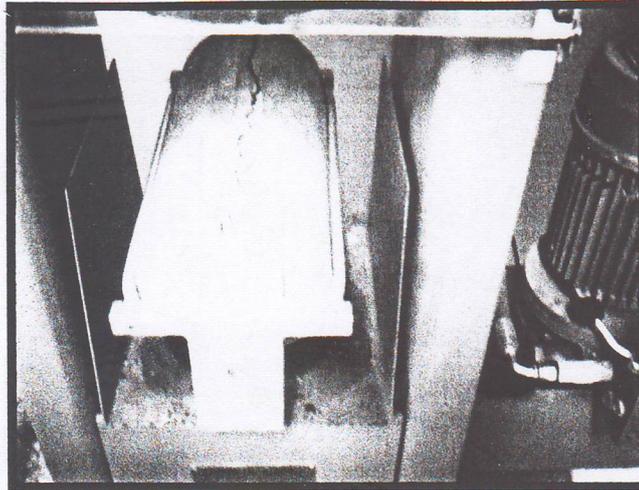
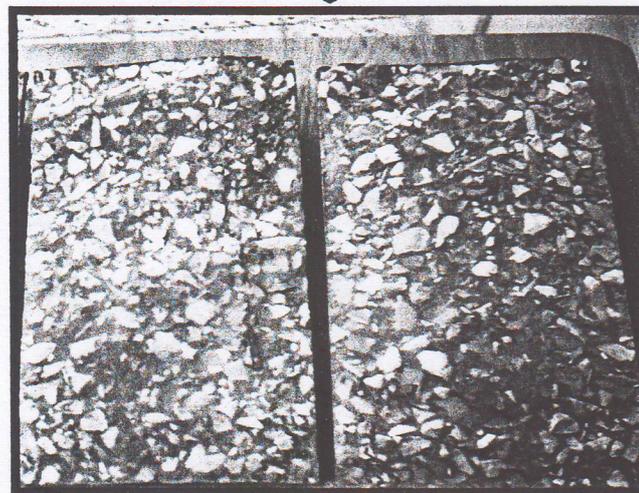


Figure II.10: Les étapes de l'essai de carbonatation.



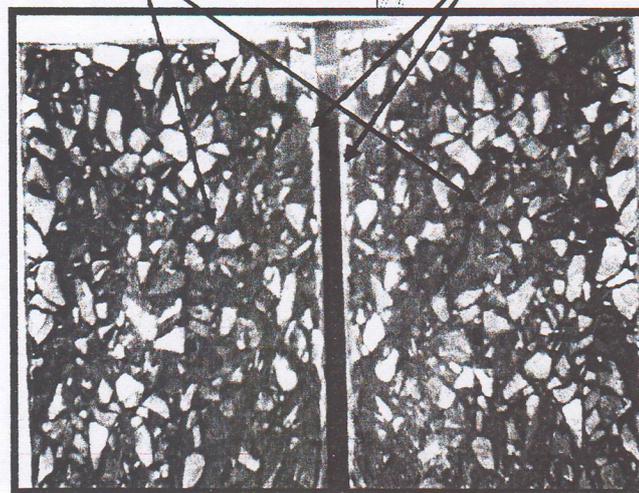
Fendage de l'éprouvette (16X32cm²)



Zone non carbonatée



Zone carbonatée



Les photos II.2: Exemple de mesure de la profondeur de carbonatation sur une éprouvette du béton après fendage.

Chapitre III

*Résultats expérimentaux et
interprétations*

Chapitre III: Résultats expérimentaux et interprétations

Ce chapitre regroupe les résultats sous forme de tableaux ou graphiques des différents essais réalisés conformément aux méthodes décrites au chapitre II:

Les essais sont réalisés sur des éprouvettes de mêmes dimensions, préparées avec les mêmes mélanges pour chaque type de béton et conservés dans les mêmes conditions. Les essais de résistances mécaniques et d'absorption capillaire sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$, tandis que les essais de carbonatation sont effectués sur des éprouvettes cylindriques

$16 \times 32 \text{ cm}^2$.

III.1 Résistances mécaniques à la compression et à la traction:

III.1.1 Résistance à la compression:

L'essai de compression à 28 jours est effectué sur des éprouvettes issues de l'essai de traction par flexion après séchage à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Un état sec selon la recommandation de la Rilem est tel que l'erreur relative entre deux pesées séparées de 24 heures après séchage en étuve à 105°C n'excède pas 1%. L'aire de la section écrasée est de $7 \times 7 \text{ cm}^2$.

Les résultats de l'essai d'écrasement par compression directe sont représentés par leurs moyennes et leurs écarts types dans le tableau III-1.

Les mêmes résultats représentés sur la figure III-1 et III-2 montrent que la résistance à la compression à 28 jours est fonction croissante du dosage en ciment. Cette croissance est d'autant importante en allant du dosage de 300 à 400 kg/m^3 de ciment, à partir du seuil de 400 kg/m^3 on constate que l'augmentation de la quantité de ciment n'apporte aucune amélioration significative à la résistance mécanique. Au contraire, d'après [52] un dosage supérieur à 400 kg/m^3 peu nuire à la résistance du béton par création des microfissures (des vides supplémentaire) créées par l'augmentation de retrait endogène dû au faible rapport E/C et à l'augmentation de la finesse du ciment. A titre d'exemple l'augmentation du dosage en ciment de 300 à 350 kg/m^3 pour des bétons conservés à l'air libre (Bétons témoins) permet

d'apporter un gain de résistance à la compression à 28 jours d'environ 42%. Alors que ce gain de résistance n'est que d'environ 7% en allant du dosage de 400 à 450 kg/m³.

Ces résultats mettent en évidence l'effet bénéfique de la cure, la prolongation de celle-ci augmente la résistance à la compression, notamment, pour les dosages en ciment variant de 300 à 400 kg/m³. Au-delà de ce dosage on remarque que le prolongement de la cure humide n'a pas d'influence remarquable sur l'amélioration de la résistance à la compression. En effet, la cure favorise l'hydratation qui a pour effet de colmater les capillaires (les pores) existants et renforcer les liaisons inter-granulaires. A titre d'exemples pour le béton B35 on observe clairement l'influence de la cure sur l'augmentation de la résistance à la compression à 28 jours, une augmentation de 7.32 % pour une cure de 3 j par rapport au béton témoin (sans cure), 12.29 % (cure 7 j / Témoin) et 22.16 % (cure 28 j / Témoin). A 28 jours de cure humide le gain de résistance escompté en augmentant le dosage en ciment de 400 à 450 kg/m³ n'est que de 0.84% ce qui confirme l'effet insignifiant d'un surdosage en ciment au-delà de 400 kg/m³.

Tableau III-1: Résistance à la compression à 28 jours en fonction du dosage en ciment à différents âges de cure.

Dosage en ciment (kg/m ³) [kg/m ³]	Résistances à la compression à 28 jours (MPa)			
	Témoin	Cure 3 j	Cure 7 j	Cure 28 j
300	23.03 ± 0.80	26.70 ± 1.06	28.27 ± 0.33	31.10 ± 0.30
350	32.80 ± 0.46	35.20 ± 0.86	36.83 ± 0.26	40.07 ± 0.31
400	38.37 ± 0.93	43.25 ± 0.85	44.65 ± 0.85	45.07 ± 0.41
450	41.20 ± 1.08	44.23 ± 0.88	45.17 ± 0.98	45.45 ± 0.05

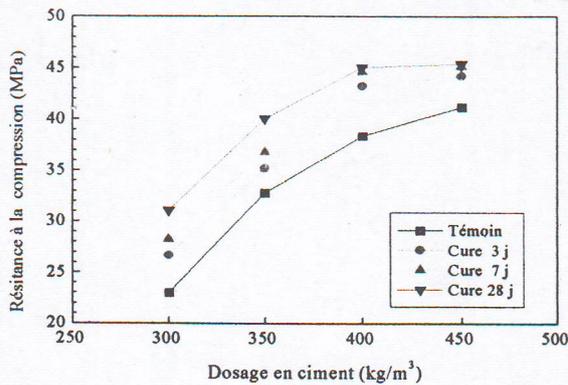


Figure III-1: Evolution de la résistance à la compression à 28 jours-en fonction du dosage en ciment (E/C variable) pour les différents âges de cure humide

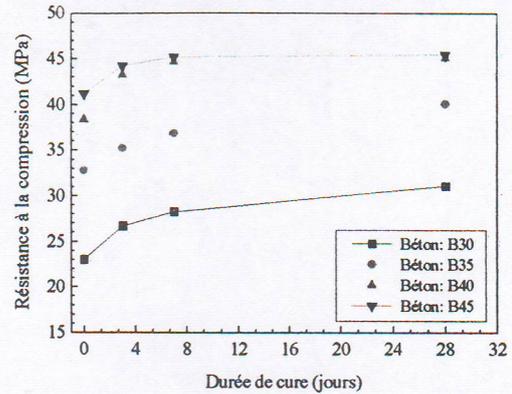


Figure III-2 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la durée de cure pour les différents types de bétons.

III.1.2 Résistance à la traction:

Les résultats de la résistance à la traction des bétons élaborés ont été déduits des essais de flexion 3 points réalisés sur des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm³. L'ensemble des résultats est récapitulé dans le tableau III-2. La représentation graphique des résultats (Figure III-3 et III-4) montre que la résistance à la traction évolue de la même manière que celle de la compression.

La résistance à la traction à 28 jours croît en fonction du dosage en ciment, cette croissance est importante en passant du dosage 300 à 400 kg / m³, à partir de ce dosage limite, l'augmentation de la quantité de ciment n'apporte pas d'amélioration significative à la résistance mécanique pour les mêmes raisons citées pour la compression. A titre d'exemple, l'augmentation du dosage en ciment de 300 à 400 kg/m³ pour une cure de 28 jours fait accroître la résistance à la traction du béton à 28 jours d'un taux d'environ 26%. Par contre, l'augmentation du dosage en ciment de 300 à 450 kg/m³ ne fait accroître ce taux que de 27%, ceci explique qu'un surdosage en ciment au-delà de 400 kg/m³ n'est plus bénéfique ni d'un point de vue économique ni d'un point de vue résistance mécanique.

Tableau III-2 : Résultats de la résistance à la traction à 28 jours en fonction du dosage en ciment pour les différentes durées de cure

Dosage en ciment (kg/m^3)	Résistances à la traction à 28 jours (en MPa)			
	Témoin	Cure 3 j	Cure 7 j	Cure 28 j
300	5.43 ± 0.06	6.38 ± 0.16	6.59 ± 0.14	7.44 ± 0.08
350	6.47 ± 0.13	7.39 ± 0.10	7.67 ± 0.14	8.39 ± 0.14
400	7.55 ± 0.13	8.27 ± 0.11	8.41 ± 0.09	9.41 ± 0.05
450	7.91 ± 0.18	8.53 ± 0.11	8.70 ± 0.18	9.46 ± 0.07

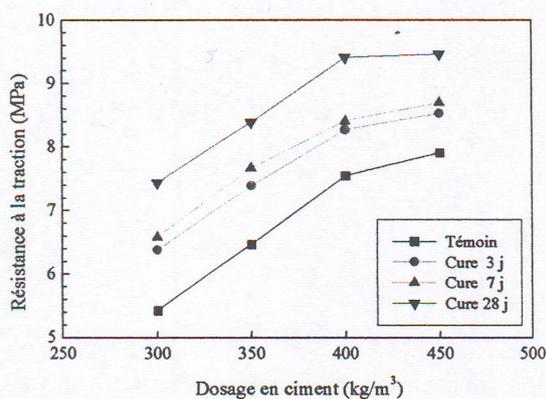


Figure III-3: Evolution de la résistance à la traction à 28 jours en fonction du dosage en ciment pour les différentes durées de cure

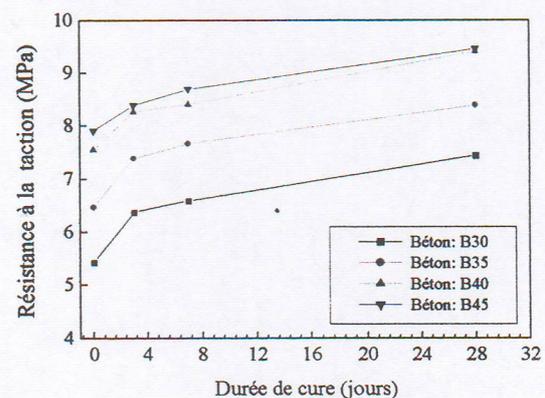


Figure III-4: Evolution de la résistance à la traction à 28 jours en fonction de la durée de cure pour les différents dosages en ciment

III.2 Absorption capillaire:

Les résultats de la cinétique d'absorption sont explicités par les deux paramètres suivants :

1. Par la hauteur du front d'imbibition capillaire $z(t)$.
2. Par la quantité d'eau absorbée par unité de surface $\left(\frac{\Delta M(t)}{s}\right)$.

La figure III-5 représente un exemple illustratif de la cinétique d'absorption en fonction du temps (en heures) exprimée en terme de $z(t)$ et $\left(\frac{\Delta M(t)}{s}\right)$ pour un béton B30 ayant subi une cure dans l'eau pendant 3 jours. La pente décroissante des deux courbes indique qu'au fur et à

mesure de l'essai ce sont les capillaires de plus en plus fins qui sont intéressés par le processus d'absorption d'eau. En exprimant la variation de $z(t)$ et de $\left(\frac{\Delta M(t)}{s}\right)$ en fonction de la racine carrée du temps, les deux allures ont presque une tendance linéaire. En effet, deux paramètres peuvent être dégagés à partir de ces tracées [12].

La première partie des courbes située entre 0 et 1 h, traduit le remplissage des plus gros pores. On peut caractériser ces plus gros pores à partir de l'absorption initiale (quantité d'eau absorbée entre 0 et 1 h). La pente de la droite située entre 0 et 1 heure sera caractérisée par un coefficient A_{bi} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1/2} = \text{mm} \cdot \text{h}^{-1/2}$) et z_i ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1/2}$). On note ici que : $1 \text{ kg d'eau} = 10^{-3} \text{ m}^3$.

La deuxième partie des courbes qui se prolonge au-delà d'une heure caractérise le remplissage des capillaires internes, ce processus de remplissage se fait des plus gros capillaires au plus fins. La pente de la droite dans cette partie caractérise d'après Christopher H [9] les coefficients de sorptivité ou absorptivité S_c ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1/2} = \text{mm} \cdot \text{h}^{-1/2}$) et de capillarité k_c ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1/2}$).

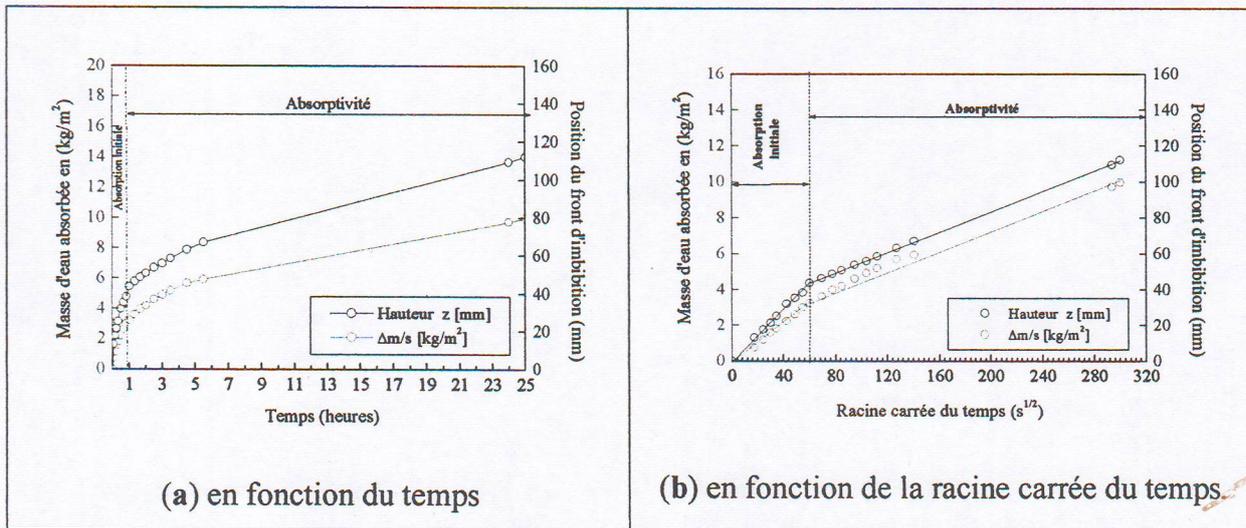


Figure III-5 : Cinétique d'absorption d'eau en fonction du temps et de la racine carrée du temps (Exemple : Béton B30 après 3 j de cure)

En se référant à la figure III-5.b on montre bien l'évolution linéaire de la cinétique d'absorption d'eau du béton en fonction de la racine carrée du temps (\sqrt{t}). Les équations des droites $z(\sqrt{t})$ et $i(\sqrt{t})$ où $i = \frac{\Delta M}{s}$ sont exprimées par:

$$z(t) = k_c \cdot \sqrt{t} + z_0 \tag{III-1}$$

Où k_c représente le coefficient capillarité. Ce coefficient caractérise la cinétique d'avancement du front d'imbibition capillaire [53].

$$i(t) = \frac{\Delta m(t)}{s} = S_c \sqrt{t} + i_0 \quad (\text{III-2})$$

Où $i(t)$ est la masse d'eau absorbée à l'instant t par unité de surface, S_c , est le coefficient de sorptivité ou absorptivité exprimé en $(\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2})$ ou $(\text{mm.s}^{-1/2})$, il caractérise la cinétique d'absorption d'eau par capillarité.

Le terme libre i_0 caractérise d'après Christopher H [9] l'absorption des pores ouverts en surface juste après le contact de la surface de l'éprouvette avec la nappe d'eau. Ce terme décroît en fonction de la compacité du béton.

Le remplissage des capillaires s'effectue en fonction du diamètre décroissant des pores. Autrement dit, les gros capillaires se remplissent les premiers suivis du remplissage des capillaires les plus fins.

Remarque : Les paramètres A_{b_i, z_i} , k_c et S_c ne peuvent en aucun cas être considérés comme des paramètres de transfert hydrique. Mais, ils sont d'une grande utilité dans la caractérisation du comportement de certains matériaux vis à vis de l'absorption capillaire ainsi que dans l'étude de la durabilité des matériaux de construction [53].

III.2.1 Influence de la durée de cure :

Les résultats de cette essai sont regroupés dans les deux tableaux III-3 et III-4 (voir Annexe). La figure III-6 ci-dessous présente les résultats de la cinétique d'absorption des différents bétons élaborés âgés de 28 jours, ayant subis une cure dans l'eau pendant 0 jours (témoin), 3, 7 et 28 jours. Ces résultats permettent de mettre en évidence l'effet bénéfique de la cure sur l'atténuation de l'absorption d'eau et l'avancement du front d'imbibition capillaire des bétons. En effet, la cure a pour effet de progresser les réactions d'hydratation qui conduisant au colmatage des capillaires (pores) existants. Le prolongement de la durée de cure de 0 à 28 jours diminue de presque la moitié le taux d'absorption initiale. A titre d'exemples pour le béton B30 on observe clairement l'influence de la cure sur la diminution de ce taux d'absorption. Elle est d'environ 21 %, 34% et 58% par rapport au béton témoin pour une cure de 3 jours, 7 jours et 28 jours respectivement. De plus, on remarque une diminution de la hauteur d'ascension du front d'imbibition pendant 1 heure pour le béton B30 de 13.%, 44 % et 56% par rapport au béton témoin, respectivement pour des cures de 3, 7 et 28 jours.

III.2.2 Influence du type de béton (E/C variable):

La figure III-7 regroupe les résultats de la cinétique d'absorption exprimée en terme de masse d'eau absorbée par unité de surface et en fonction de la hauteur d'ascension du front d'imbibition capillaire en fonction de la racine carrée du temps des différents types de bétons (E/C variable). Cette figure traduit également l'effet de la durée de cure humide sur la capacité d'absorption des différents bétons. Ces résultats mettent en évidence que l'absorption initiale (pendant 1 heure) est une fonction décroissante du dosage en ciment (tableau III-9, Figure III-8). Autrement dit, plus le rapport E/C augmente, plus le taux d'absorption initiale augmente. De plus, la cure humide joue le rôle d'atténuateur vis-à-vis de l'absorption capillaire est ce pour des dosages en ciment compris entre 300 et 400 kg/m³. Au-delà de ce dosage limite, la cure humide au contraire joue un rôle inverse. En effet, l'absorption initiale augmente en raison de microfissures créées par le retrait endogène dû au faible rapport E/C. Ceci conduit à des dépressions capillaires (des vides dans la pâte de ciment hydraté) assez importantes provoquées par la contraction LeChatelier [52]. A titre d'exemple l'augmentation du dosage en ciment de 300 à 350 kg/ m³ pour un béton soumis à une cure de 3 jours diminue le taux d'absorption d'eau d'environ 36%. Cette diminution est de l'ordre de 53% en augmentant le dosage en ciment de 300 à 400 kg/m³. Par contre, l'augmentation du dosage en ciment de 400 à 450 kg/m³ provoque une augmentation de taux d'absorption d'eau d'environ 17 %.

La deuxième partie des courbes d'absorption (au-delà d'une heure) traduit la continuité du processus de remplissage des capillaires des plus gros aux plus fins. On peut constater l'augmentation de la pente dans cette partie pour les faibles dosages en ciment. Ceci signifie que les bétons élaborés avec des rapports E/C élevé se caractérisent par une structure de porosité plus élevée.

L'augmentation de la durée de cure a un effet de même nature que l'accroissement du dosage en ciment. Ceci signifie que la durée de cure humide conduit à une diminution de la densité des plus gros capillaires due à l'hydratation croissante ou complète du ciment.

D'un point de vue pratique, un béton dosé à 350 kg/m³ de ciment ayant subi une cure dans l'eau de 28 jours se comporte vis-à-vis à l'absorption capillaire de la même manière qu'un béton dosé à 400 kg/m³, et ayant subi une cure de 7 jours.

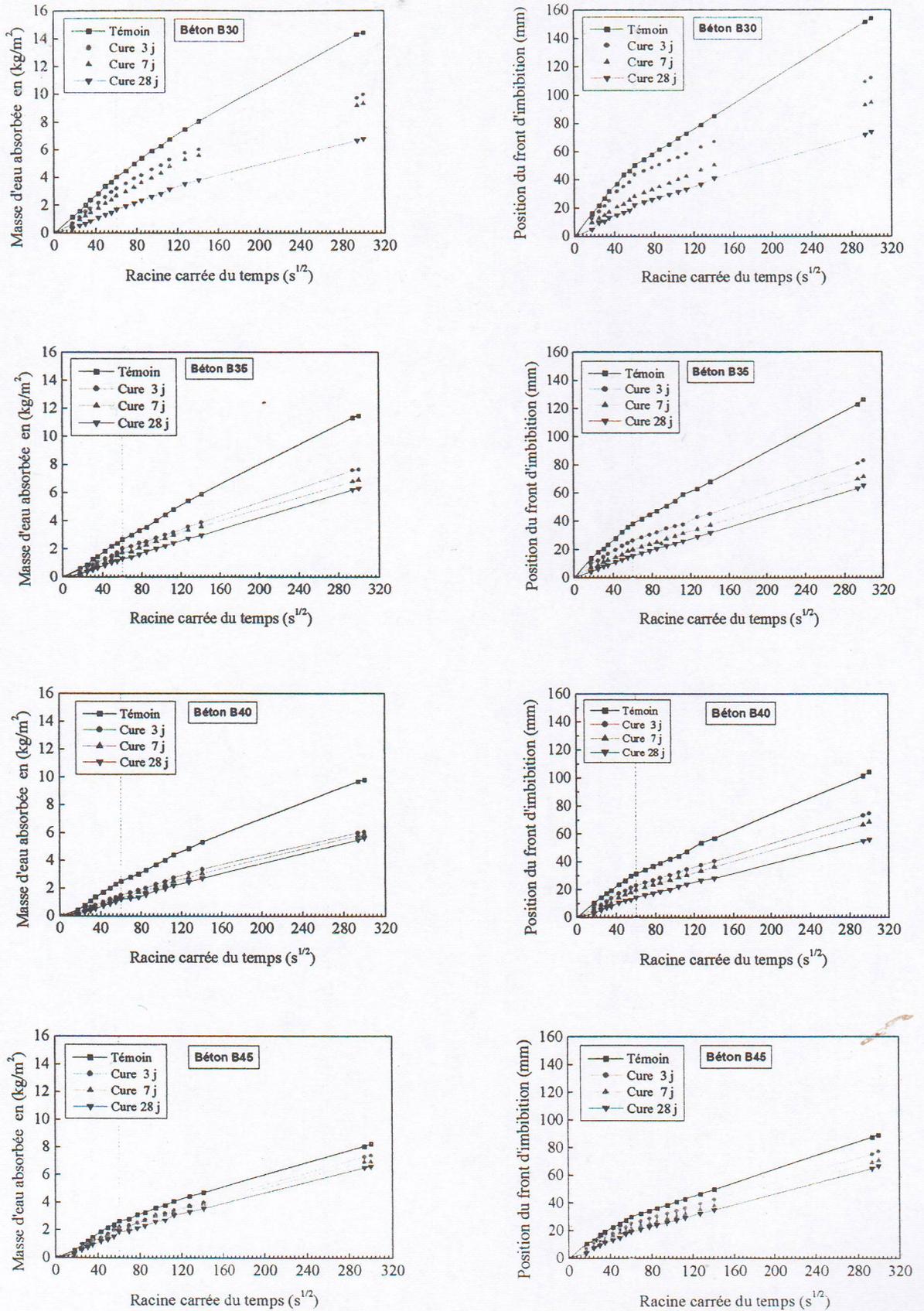


Figure III-6 : Evolution de l'absorption capillaire en fonction de \sqrt{t} à différents âges de cure des différents types de bétons (E/C variable)

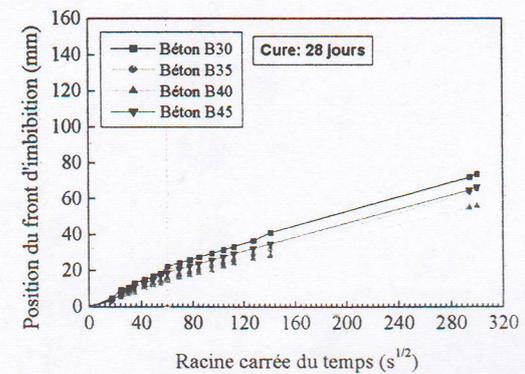
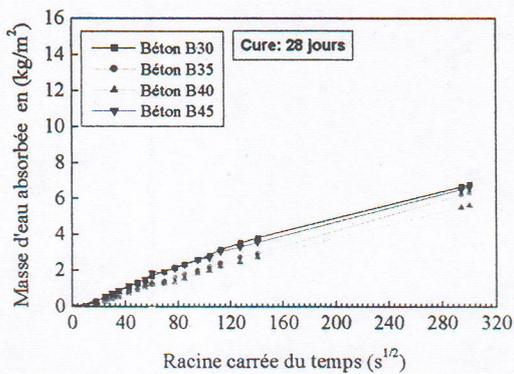
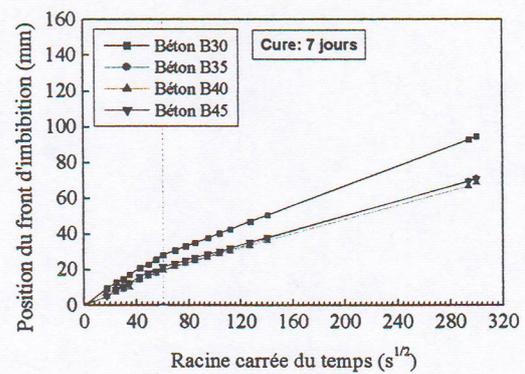
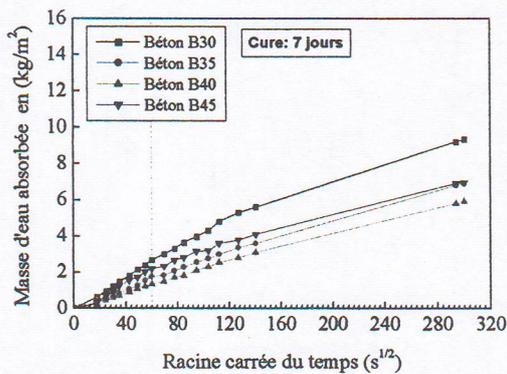
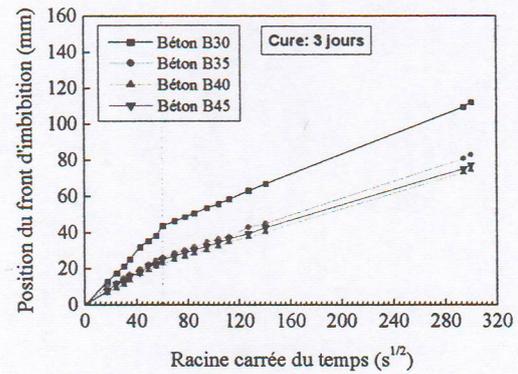
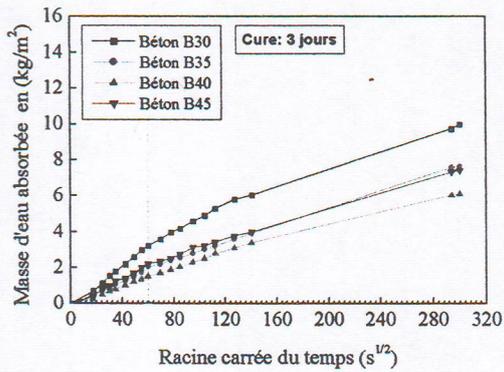
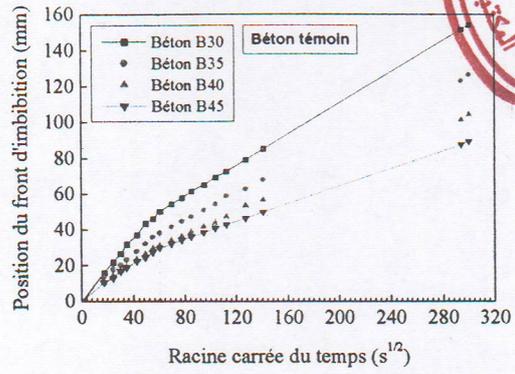
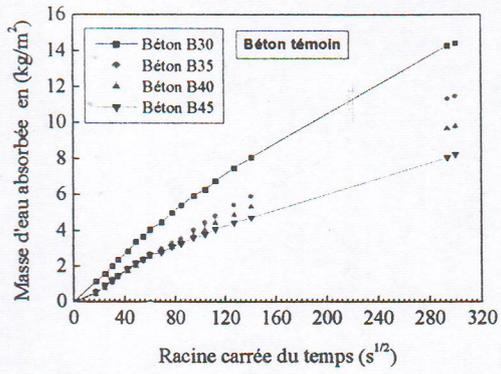


Figure III-7 : Evolution de l'absorption capillaire en fonction de \sqrt{t} des différents bétons élaborés pour différentes durées de cure

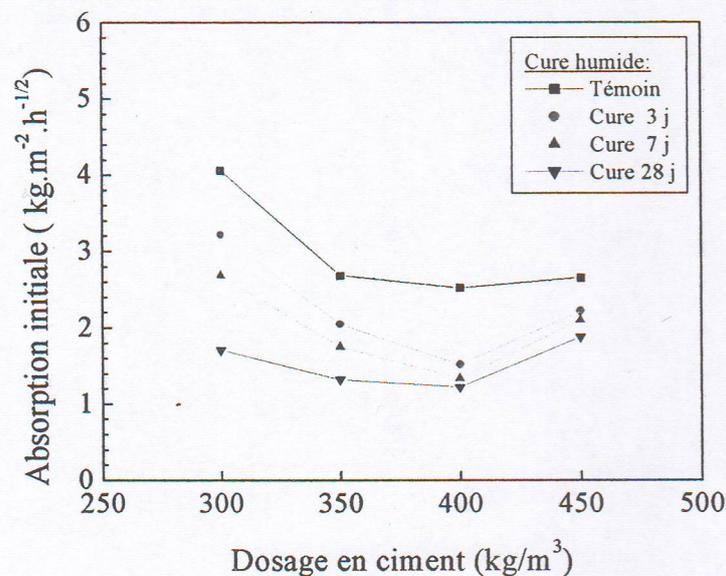


Figure III-8 : Effet de la cure sur l'absorption initiale des différents types de bétons élaborés (E/C variable)

III.2.3 Coefficients de sorptivité et de capillarité:

Les résultats de calcul des coefficients de sorptivité et de capillarité des différents bétons élaborés sont donnés dans le tableau III-5. L'illustration graphique des résultats représentés par la figure III-9 montre que les coefficients de sorptivité S_c et de capillarité k_c décroît en fonction du dosage en ciment. Le taux de décroissance diminue en fonction de la durée de cure et se stabilise pratiquement pour une durée de cure de 28 jours. Ce résultat nous laisse penser qu'on peut obtenir le même comportement vis-à-vis de l'absorption capillaire (ou durabilité vis-à-vis des agents agressifs) d'un béton dosé à 400 kg/m^3 avec une durée de cure de 3 jours en utilisant un dosage de 300 kg/m^3 avec une durée de cure de 28 jours.

Tableau III-5 : Coefficients de sorptivité et de capillarité des différents types de béton en fonction de la durée de cure

Type de béton	k_c [mm.h ^{-1/2}] et S_c [mm.h ^{-1/2}]							
	Témoin		Cure 3 j		Cure 7 j		Cure 28 j	
	k_c	S_c	Kc	S_c	k_c	S_c	k_c	S_c
B30	25,95	2,56	16,99	1,62	16,56	1,61	12,82	1,27
B35	21,86	2,20	14,10	1,43	12,83	1,29	12,38	1,26
B40	18,09	1,86	12,88	1,14	12,10	1,14	10,39	1,12
B45	14,81	1,38	13,01	1,30	12,30	1,22	11,85	1,20

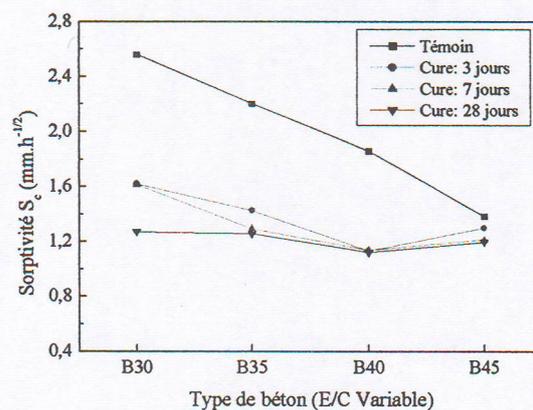
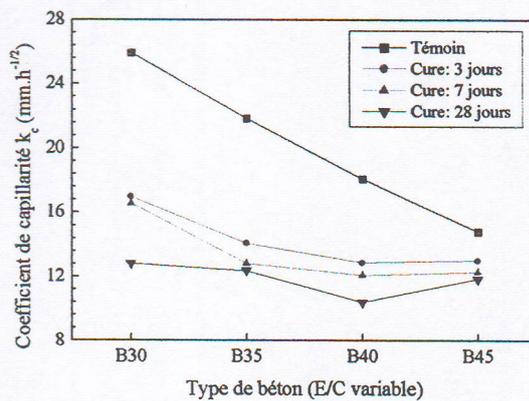


Figure III-9: Influence de la cure sur les coefficients d'absorption des différents bétons élaborés

D'après les résultats du tableau III-6, on constate que le rapport C entre le coefficient de capillarité k_c et la sorptivité S_c est pratiquement constant pour le même dosage en ciment et la même durée de cure. Sa valeur moyenne est d'environ 10, ceci explique que la vitesse d'ascension du front d'imbibition capillaire est presque 10 fois plus grande que la vitesse de remplissage des capillaires.

Tableau III-6 : Relation en k_c et S_c

Type de béton	Dosage en ciment (kg/m ³)	Valeurs de la Constante $C = \frac{k_c}{S_c}$			
		Témoin	Cure 3 j	Cure 7j	Cure 28 j
B30	300	10,13	10,49	10,26	10,08
B35	350	9,92	9,88	9,91	9,84
B40	400	9,73	11,36	10,63	9,25
B45	450	10,69	9,98	10,12	9,89
	C_{moy}	10.12	10.43	10.23	9.76
	Écart type	0.36	0.58	0.26	0.31

III.3 Carbonatation des bétons élaborés:

III.3.1 Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction de la durée d'exposition au gaz CO₂ :

Le tableau III-7 regroupe les résultats de mesure de l'épaisseur de la zone carbonatée des différents types de béton en fonction de la durée d'exposition au gaz carbonique. L'effet de la durée de cure humide sur la carbonatation étant également représenté sur le même tableau.

Le facteur principal qui influe sur l'avancement du front de carbonatation est bien sûr la porosité de la zone du béton de peau, celle-ci est une fonction décroissante du dosage en ciment (E/C décroissant) et de la durée de cure. En effet, la représentation graphique de la profondeur de carbonatation en fonction du dosage en ciment, pour différentes durées de cure illustrée sur la figure III-10 montre que l'épaisseur carbonatée décroît en fonction du dosage en ciment. Cette figure montre aussi que la profondeur de carbonatation croît linéairement en fonction de la durée d'exposition au CO₂.

A titre d'exemples pour le béton **B30** on observe clairement l'influence de la durée d'exposition sur l'augmentation de la profondeur de carbonatation, celle-ci augmente de plus de 18% dans l'intervalle [60 jours, 120 jours] et de plus de 29% dans l'intervalle [60 jours, 180 jours].

Tableau III-7 : Evolution de la profondeur de carbonatation (*mm*) des différents types de bétons tenant compte de l'effet de la durée de cure humide.

Cure humide	Durée d'exposition au CO ₂ : 60 jours			
	B30	B35	B40	B45
Témoin (0 j)	5,20 ± 0.02	3,05 ± 0.06	2,50 ± 0.13	2,10 ± 0.05
Cure 3 j	4,10 ± 0.02	2,10 ± 0.03	1,35 ± 0.06	1,88 ± 0.04
Cure 7 j	3,10 ± 0.02	1,10 ± 0.04	0,85 ± 0.08	1,25 ± 0.17
Cure 28 j	1,20 ± 0.04	0,50 ± 0.02	0,30 ± 0.04	0,50 ± 0.07
Cure humide	Durée d'exposition au CO ₂ : 120 jours			
	B30	B35	B40	B45
Témoin (0 j)	7,40 ± 0.15	4,57 ± 0.13	2,97 ± 0.02	2,59 ± 0.02
Cure 3 j	5,65 ± 0.12	2,54 ± 0.02	1,76 ± 0.04	2,38 ± 0.02
Cure 7 j	4,19 ± 0.07	1,68 ± 0.08	1,53 ± 0.03	1,60 ± 0.01
Cure 28 j	1,49 ± 0.11	0,95 ± 0.02	0,68 ± 0.02	0,85 ± 0.02
Cure humide	Durée d'exposition au CO ₂ : 180 jours			
	B30	B35	B40	B45
Témoin (0 j)	11,00 ± 0.11	7,00 ± 0.05	5,00 ± 0.16	4,50 ± 0.04
Cure 3 j	9,00 ± 0.17	4,00 ± 0.08	3,00 ± 0.05	3,50 ± 0.02
Cure 7 j	7,75 ± 0.02	3,00 ± 0.06	2,00 ± 0.03	2,30 ± 0.05
Cure 28 j	4,00 ± 0.08	2,00 ± 0.03	1,30 ± 0.04	1,70 ± 0.04

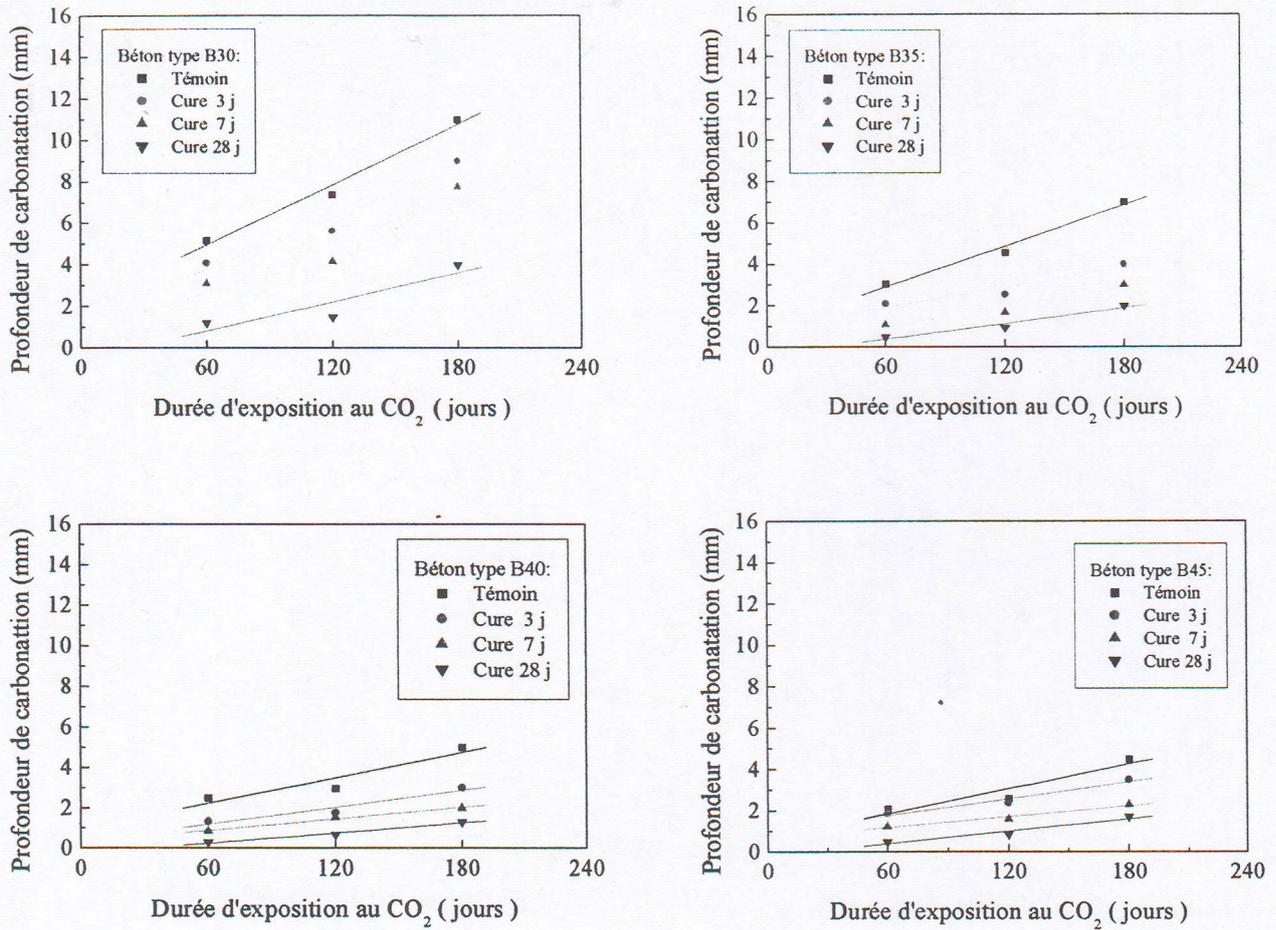


Figure III-10 : Evolution de la profondeur de carbonatation des différents types de bétons en fonction de la durée d'exposition au gaz CO₂.

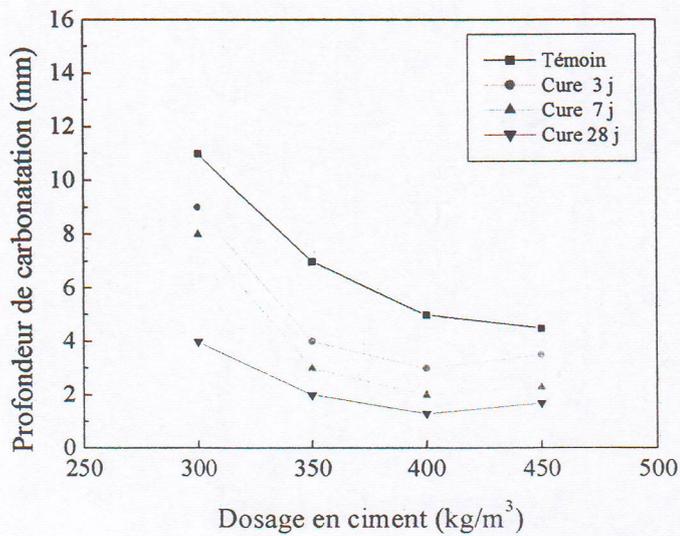


Figure III-11 : Variation de la profondeur de carbonatation à l'âge de 180 jours en fonction du dosage en ciment pour différentes durées.

III.3.2 Influence de la carbonatation sur la résistance à la compression à 180 jours :

L'essai de compression est effectué à l'âge de 180 jours sur deux types d'éprouvettes de la même composition :

- a) Eprouvettes conservées dans l'ambiance du laboratoire après la durée de cure.
- b) Eprouvettes conservées dans la salle de carbonatation après la durée de cure.

Les résultats de cet essai sont rassemblés dans le tableau III-8.

Tableau III-8: Effet de la carbonatation sur la résistance à la compression des bétons élaborés

Dosage en ciment (en kg/m ³)	Résistances à la compression des bétons non carbonatés (MPa)			
	Témoin	Cure 3 j	Cure 7 j	Cure 28 j
300	23.03 ± 0.80	26.70 ± 1.06	28.27 ± 0.33	31.10 ± 0.30
350	32.80 ± 0.46	35.20 ± 0.86	36.83 ± 0.26	40.07 ± 0.31
400	38.37 ± 0.93	43.25 ± 0.85	44.65 ± 0.85	45.07 ± 0.41
450	41.20 ± 1.08	44.23 ± 0.88	45.17 ± 0.98	45.45 ± 0.05
Dosage en ciment (en kg/m ³)	Résistances à la compression des bétons carbonatés (MPa)			
	Témoin	Cure 3 j	Cure 7 j	Cure 28 j
300	25.16 ± 0.05	27.85 ± 1.37	29.49 ± 0.25	31.45 ± 1.75
350	34.13 ± 0.31	36.15 ± 2.28	37.83 ± 2.16	40.78 ± 0.41
400	39.57 ± 0.45	43.96 ± 1.51	45.17 ± 0.43	45.53 ± 0.25
450	42.14 ± 1.26	44.80 ± 0.39	45.69 ± 0.65	46.02 ± 0.11

La figure III-12 ci-dessous présenter l'effet de la carbonatation sur la variation de la résistance de compression en fonction du dosage en ciment pour les différentes conditions de cure.

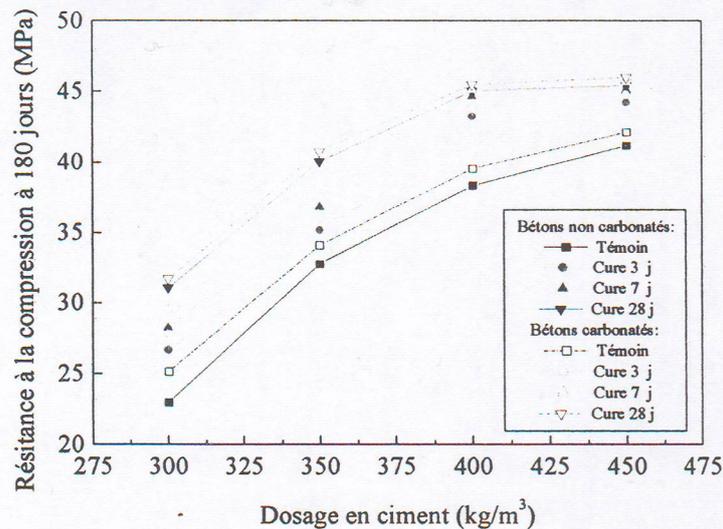


Figure III-12: L'effet de la carbonatation sur la variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en ciment pour les différentes conditions de cure.

En observe d'après la figure III-12 une légère augmentation de la résistance à la compression due à la carbonatation, ceci est expliqué par l'effet de la calcite CaCO_3 qui a tendance à augmenter la compacité du béton en raison du colmatage des pores dans la zone du béton de peau [21].

III.3.3 Influence de la carbonatation sur l'absorption capillaire à 180 jours :

L'essai de d'absorption est effectué à l'âge de 180 jours sur deux types d'éprouvettes de la même composition :

- a) Eprouvettes conservées dans l'ambiance du laboratoire après la durée de cure.
- b) Eprouvettes conservées dans la salle de carbonatation après la durée de cure.

Les résultats de l'essai d'absorption initiale sont rassemblés dans le tableau III-9.

Les résultats de cet essai sont exprimés en fonction du type de béton (E/C variable) et pour les différentes durées de cure:

Tableau III-9: la variation de l'absorption initiale à 180 jours en fonction du dosage en ciment et de la durée de cure humide

Dosage en ciment (en kg/m ³)	absorption d'eau initiale (mm.h ^{-1/2}) des bétons non carbonatés A_{bi}/z_i			
	Témoin	Cure 3 j	Cure 7 j	Cure 28 j
300	4.063/50.50	3.218/43.80	2.690/39.00	1.710/22.41
350	2.685/38.30	2.050/26.40	1.750/20.00	1.320/15.50
400	2.527/31.60	1.520/23.10	1.336/19.90	1.222/14.50
450	2.655/30.00	2.221/25.00	2.098/21.70	1.878/19.00
Dosage en ciment (en kg/m ³)	absorption d'eau initiale (mm.h ^{-1/2}) des bétons carbonatés A_{bi}/z_i			
	Témoin	Cure 3 j	Cure 7 j	Cure 28 j
300	3,23/40.16	2,58/35.12	2,20/31.90	1,39/18.22
350	2,21/31.52	1,73/22.28	1,53/17.49	1,16/13.62
400	2,09/26.14	1,30/19.73	1,19/17.71	1,11/13.17
450	2,24/25.34	1,92/21.61	1,87/19.34	1,73/17.50

La figure III-13 représente l'effet de la carbonatation sur le taux d'absorption d'eau initiale A_{bi} en fonction du dosage en ciment pour les différentes durées de cure humide. Cette figure montre que la carbonatation tend à réduire le taux d'absorption initiale. Ceci est dû à la réduction des diamètres des gros capillaires du béton de peau. En effet, une proportion des vides des capillaires vient d'être occupée par la calcite CaCO_3 qui résulte de la réaction de carbonatation [36], ce qui implique une réduction des dimensions des capillaires.

Remarque : Un résultat remarquable a pu être divulgué, c'est que la différence entre la hauteur du front d'imbibition initial du béton non carbonaté et du béton carbonaté est presque équivalent à la profondeur de carbonatation P_c comme le montre les résultats du tableau III-10.

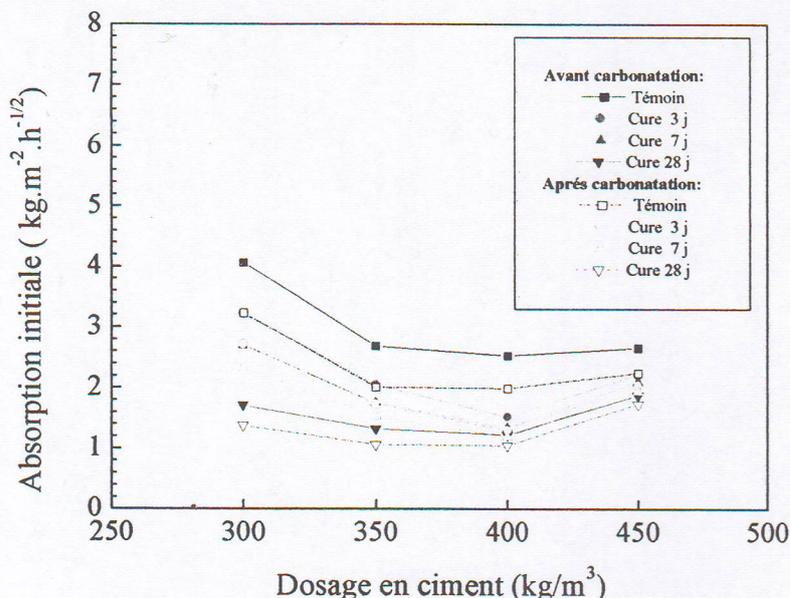


Figure III-13: L'effet de la carbonatation sur l'absorption-d'eau initiale des différents types de bétons en fonction des conditions de cure.

Tableau III-10 : Relation entre la différence de la hauteur d'imbibition initial Δz_i (mm) des bétons carbonatés et non carbonatés et la profondeur de carbonatation P_c (mm)

	B30				B35			
	Témoïn	Cure 3j	Cure 7j	Cure 28j	Témoïn	Cure 3j	Cure 7j	Cure 28j
Δz_i (mm)	10,34	8,68	7,10	4,19	6,78	4,12	2,51	1,88
P_{c1} (mm)	11,00	9,00	7,75	4,00	7,00	4,00	3,00	2,00
	B40				B45			
	Témoïn	Cure 3j	Cure 7j	Cure 28j	Témoïn	Cure 3j	Cure 7j	Cure 28j
Δz_i (mm)	5,46	3,37	2,19	1,33	4,66	3,39	2,36	1,50
P_{c1} (mm)	5,00	3,00	2,00	1,30	4,50	3,50	2,30	1,70

III.4 Relations entre la résistance à la compression, la profondeur de carbonatation et l'absorption initiale :

III.4.1 Relation entre la résistance à la compression à 28 j et l'absorption initiale A_{bi} :

La figure III-14 représente la variation de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'absorption initiale des différents types de bétons élaborés. A noter que le

coefficient d'absorption initiale A_{bi} est une fonction décroissante de la durée de cure humide pour chaque type de béton.

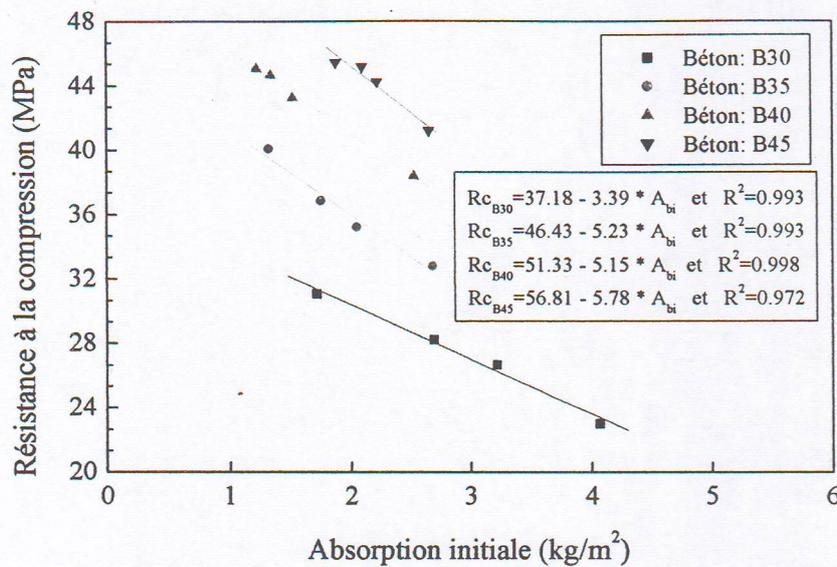


Figure III-14 : la variation de la résistance à la compression à 28 j en fonction de l'absorption initiale (enregistrée en 1 heure) (kg/m^2).

Ces Résultats montrent que la résistance à la compression à 28 j est une fonction décroissante de l'absorption initiale. Une tentative de modélisation de la résistance à la compression en fonction de l'absorption initiale a permis de représenter R_{c28} comme une fonction linéaire de A_{bi} telle que :

$$R_{c28} = R_{c0} - \alpha \cdot A_{bi} \quad (\text{III-3})$$

Où R_{c0} et α des coefficients de régression linéaire pour chaque type de béton. Ces coefficients sont reliés empiriquement au dosage en ciment par :

$$\begin{aligned} R_{c0} &= 12.5 \left(\frac{D_c}{100} \right) \\ \alpha &= 1.1 \left(\frac{D_c}{100} \right) \end{aligned} \quad (\text{III-4})$$

Avec D_c est le dosage en ciment du béton exprimé en kg/m^3 .

Le tableau III-11 donne une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs estimées à partir du modèle (III-3) de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du coefficient d'absorption initiale A_{bi} .

Tableau III-11 : Valeurs expérimentales et estimées de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'absorption initiale A_{bi} ($\text{kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1/2}$ ou $\text{mm.h}^{-1/2}$)

R_{c28} (MPa)	B30				B35			
	Témoin	Cure 3j	Cure 7j	Cure 28j	Témoin	Cure 3j	Cure 7j	Cure 28j
Estimée	24,09	26,88	28,62	31,86	33,41	35,86	37,01	38,67
Mesurée	23,03	26,7	28,27	31,1	32,8	35,2	36,83	40,07
Erreur relative (%)	4,40	0,67	1,22	2,39	1,83	1,84	0,49	3,62
R_{c28} (MPa)	B40				B45			
	Témoin	Cure 3j	Cure 7j	Cure 28j	Témoin	Cure 3j	Cure 7j	Cure 28j
Estimée	38,88	43,31	44,12	44,62	43,11	45,26	45,86	46,95
Mesurée	38,37	43,25	44,65	45,07	41,2	44,23	45,17	45,45
Erreur relative (%)	1,31	0,14	1,20	1,01	4,43	2,28	1,50	3,19

L'erreur relative $\left| \frac{DR_{c28}}{R_{c28(\text{estimée})}} \right| = \left| \frac{R_{c28(\text{mesurée})} - R_{c28(\text{calculée})}}{R_{c28(\text{calculée})}} \right|$ calculée pour les différents points

expérimentaux est généralement inférieure à 4.5%, ce qui nous permet de conclure qu'une bonne estimation de la résistance à la compression à 28 jours peut être déduite en déterminant seulement l'absorption capillaire de l'échantillon pendant **1 heure** (absorption initiale).

III.4.2 Relation entre la résistance à la compression à 28 j et l'absorption initiale z_i :

De la même manière on peut estimer la résistance à la compression à 28 jours en déterminant la hauteur initiale du front d'imbibition capillaire z_i , en utilisant une relation similaire à (III-3), soit :

$$R_{c28} = R_{c0} - \beta.z_i \quad (\text{III-5})$$

Où

$$R_{c0} = 12.5 \left(\frac{D_c}{100} \right) \quad (\text{III-6})$$

$$\beta = 0.10 \left(\frac{D_c}{100} \right)$$

On remarque que $\alpha \neq 10\beta$ étant donnée que $z_i = 10A_{bi}$ selon (§ III.2.3.1).

La figure III-15 représente la variation de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'absorption initiale exprimée en hauteur du front d'imbibition z_i des différents types de bétons élaborés.

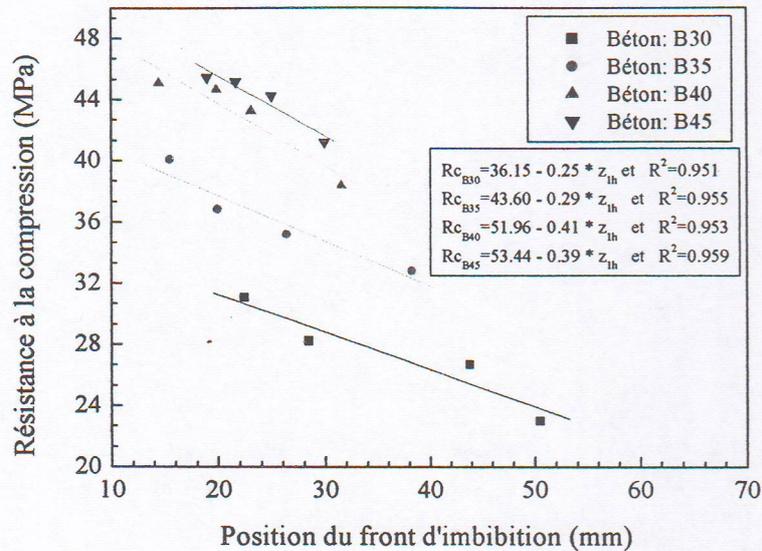


Figure III-15: la variation de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la hauteur initiale d'imbibition capillaire z_i (mm).

Le tableau III-12 donne une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs estimées à partir du modèle (III-5) de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du coefficient d'absorption initiale z_i .

Tableau III-12 : Valeurs expérimentales et estimées de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'absorption initiale z_i ($\text{mm.h}^{-1/2}$)

R_{c28} (MPa)	B30				B35			
	Témoin	Cure 3j	Cure 7j	Cure 28j	Témoin	Cure 3j	Cure 7j	Cure 28j
Estimée	22,35	24,36	25,80	30,78	30,35	34,51	36,75	38,33
Mesurée	23,03	26,70	28,27	31,10	32,80	35,20	36,83	40,07
Erreur relative (%)	3,04	9,61	9,57	1,05	8,09	2,00	0,22	4,55
R_{c28} (MPa)	B40				B45			
	Témoin	Cure 3j	Cure 7j	Cure 28j	Témoin	Cure 3j	Cure 7j	Cure 28j
Estimée	37,36	40,76	42,04	44,20	42,75	45,00	46,49	47,70
Mesurée	38,37	43,25	44,65	45,07	41,20	44,23	45,17	45,45
Erreur relative (%)	2,70	6,11	6,21	1,97	3,63	1,71	2,83	4,72

L'erreur relative $|\Delta R_{c28}/R_{c28} \text{ (estimée)}|$ calculée pour les différents points expérimentaux est généralement inférieure à 10 %, ce qui nous permet de conclure qu'une bonne estimation de la résistance à la compression à 28 jours peut être encore déduite en déterminant seulement la hauteur initiale d'imbibition capillaire z_i de l'échantillon pendant 1 heure (absorption initiale).

III.4.3 Relation entre de la profondeur de carbonatation et la résistance à la compression à 28 jours :

La figure III-16 représente la relation entre la profondeur de carbonatation à l'âge de 180 jours et la résistance à la compression à 28 jours des différents types de bétons élaborés.

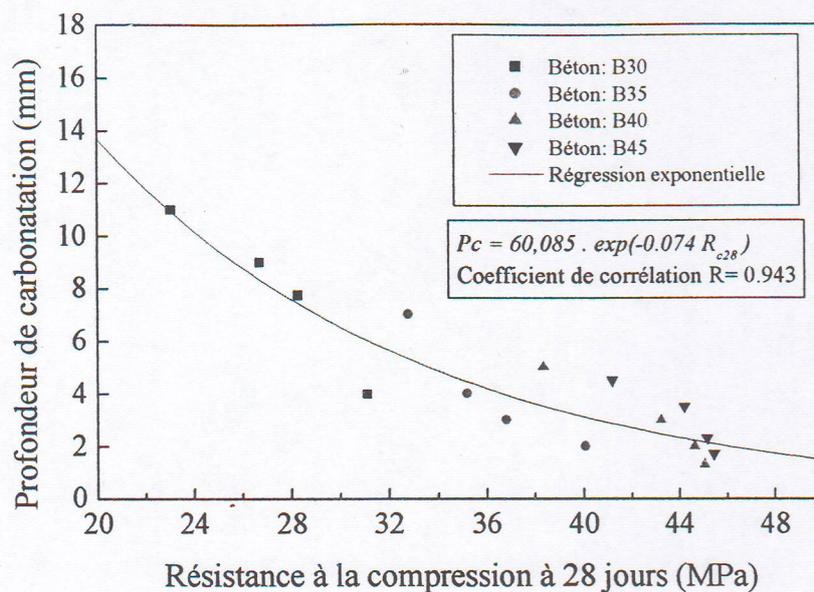


Figure III-16: Relation entre la profondeur de carbonatation à l'âge de 180 jours et la résistance à la compression à 28 jours.

On remarque que, la profondeur de carbonatation est une fonction décroissante de la résistance à la compression à 28 jours, cette dernière propriété dépend de la porosité du matériau qui est fonction de sa composition et de son mode de conservation. la mesure de cette propriété constitue un indicateur fidèle de sa susceptibilité à la carbonatation, celle-ci devient très faible lorsque R_{c28} atteint 50 MPa .

Les résultats trouvés indiquent que la profondeur de carbonatation est une fonction exponentielle de la résistance de compression à 28 jours, soit :

$$P_c = 60.085.e^{(-0.074R_{c28})} \quad (\text{III-7})$$

Avec une coefficient de corrélation $R=0.934$.

où P_c est la profondeur de carbonatation en (mm) et R_{c28} , la résistance à la compression à 28 jours en (MPa).

Selon Parrott [54], la profondeur de carbonatation relevée sur des ouvrages en béton âgés de 30.ans dans les pays d'Europe du nord (Grande Bretagne, Allemagne) en fonction de la résistance à la compression à 28 jours est donnée par l'expression :

$$P_c = 125.e^{(-0.05.R_{c28})} \quad (\text{III-8})$$

On trouve presque la même évolution de la profondeur de carbonatation en fonction de la résistance de compression que celle trouvée par Parrott [54].

D'après ces résultats, on peut conclure que la résistance à la compression à 28 jours constitue un indicateur fidèle de la durabilité du béton vis - à - vis à la carbonatation.

III.4.4 Relation entre de la profondeur de carbonatation et l'absorption initiale:

La figure III-17 présenter l'effet dosage en ciment et de la cure sur la variation de la profondeur de carbonatation en fonction de l'absorption initiale [exposées par les variations de quantité d'eau absorbée] à l'âge de 180 jours.

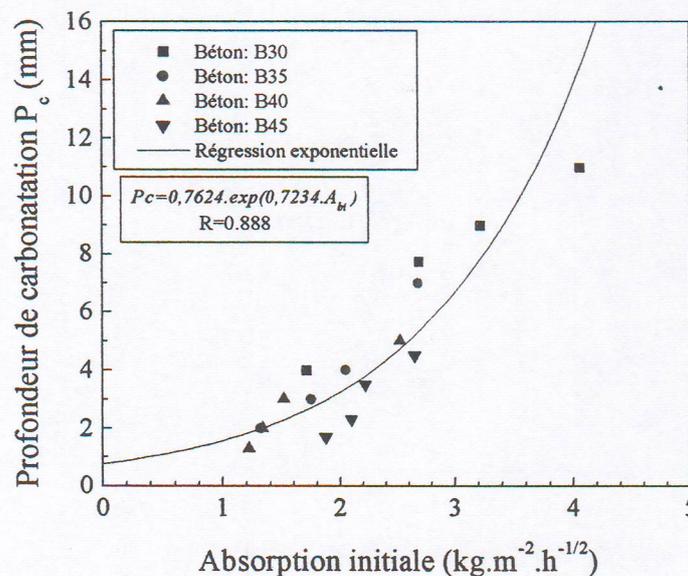


Figure III-17: la variation de la profondeur de carbonatation en fonction de l'absorption initiale A_{bi} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1/2}$) à l'âge de 180 jours

D'après la figure (III-17), on remarque que la profondeur de carbonatation P_c croît en fonction de l'absorption initiale A_{bi} , cette dernière propriété dépend de la porosité (taille des plus gros pores) du matériau résultant de sa composition et de sa conservation. Les résultats trouvés indiquent que l'évolution de la profondeur de carbonatation P_c (mm) est une fonction exponentielle de l'absorption initiale A_{bi} ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1/2}$), soit :

$$P_c = 0,7624 \cdot \exp(0,7234 \cdot A_{bi}) \quad (\text{III-9})$$

avec un coefficient de corrélation $R = 0,888$.

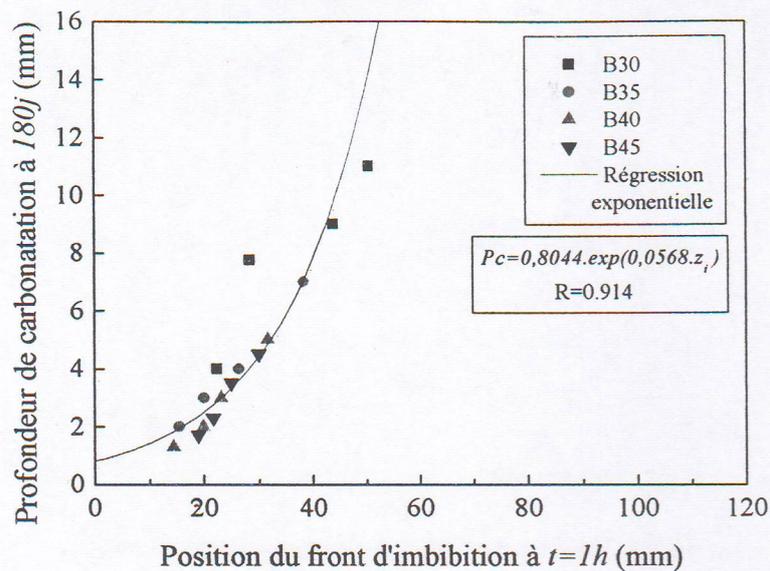


Figure III-18: Relation entre la profondeur de carbonatation estimée à 180 jours et la position du front d'imbibition capillaire localisée en 1 heure.

La figure III-18 ci-dessous présente la variation de la profondeur de carbonatation à l'âge de 180 jours en fonction de la hauteur initiale du front d'imbibition capillaire z_i .

D'après la figure (III.18), On remarque que la profondeur de carbonatation P_c est une fonction croissante de la position initiale du front d'imbibition z_i ($mm \cdot h^{-1/2}$). Une relation exponentielle permet une corrélation satisfaisante des résultats expérimentaux. La courbe théorique $P_c(z_i)$ a la forme:

$$P_c = 0,8044 \cdot \exp(0,0568 \cdot z_i) \quad [mm] \quad (III-10)$$

avec un coefficient de corrélation $R=0.914$.

où P_c est la profondeur de carbonatation (mm) et z_i , la position du front d'imbibition capillaire localisée après une heure d'imbibition dans l'eau (mm). On conclut donc que les coefficients A_i ($kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1/2}$) et z_i ($mm \cdot h^{-1/2}$) constituent eux aussi des indicateurs fidèles de l'estimation de la profondeur de carbonatation.

**Conclusions Générales et
recommandations**

Conclusions Générales et recommandations

Ce travail avait pour objectif, la contribution à la caractérisation de la porosité ouverte de la zone d'enrobage en utilisant les essais d'absorption capillaire étant donné que cette zone affecte directement les performances mécaniques et la durabilité des bétons. L'idée d'utiliser les essais d'absorption capillaire est motivée par le fait que la plupart des infiltrations dans les matériaux de construction sont d'origine capillaire. L'étude des liens réciproques entre la porosité ouverte caractérisée par l'absorption initiale de la zone de peau, la résistance mécanique et la profondeur de carbonatation a été également entamée en tenant compte de l'influence du rapport E/C et du mode de cure. Les résultats expérimentaux recueillis dans ce travail ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- En fixant le même critère d'ouvrabilité (affaissement comprise entre 6 et 8cm), on a pu confectionner plusieurs types de bétons avec des rapport E/C variables de 0.67% (B30), 0.57 (B35), 0.50 (B40) et 0.45 (B45) afin de faire varier la porosité du béton. Ceci étant réalisé en jouant sur le rapport G/S qui vaut respectivement 1.83, 1.91, 1.99 et 2.09. La méthode de formulation de Dreux Gorisse s'avère très intéressante pour la recherche de telles formulations.
- La résistance mécanique à 28 jours des bétons élaborés croît en fonction du dosage en ciment, cette croissance est d'autant plus importante en passant du dosage 300 (B30) à 400 kg / m³ (B40), à partir de ce dosage limite, l'augmentation de la quantité de ciment n'apporte pas d'amélioration significative à la résistance mécanique. A titre d'exemple, on a enregistré un taux de croissance de la résistance à la compression pour le béton témoin de 42% en augmentant le dosage en ciment de 300 à 350 kg/m³, alors qu'il n'est que de 7% en passant de 400 à 450kg/m³. On signale également l'effet bénéfique de la cure, la prolongation de celle -ci augmente la résistance mécanique, notamment, pour les dosages en ciment variant de 300 à 400 kg/m³. Au-delà de ce dosage on remarque que le prolongement de la cure humide n'a pas d'influence remarquable sur l'amélioration de la résistance à la compression. En prenant le béton *B35* comme exemple, une cure de 3 jours dans l'eau peu améliorer la résistance à la compression par rapport au béton témoin de plus de 7%, elle est de plus de 22% pour une cure dans l'eau de 28 jours. Alors qu'une cure humide de 28 jours pour un béton B45 ne peu améliorer cette résistance que de 10%. En effet, la cure humide favorise l'hydratation qui a pour effet de colmater les capillaires (les pores) existants et renforcer les liaisons inter granulaires. Pour des dosages élevés en ciment (supérieur à 400 kg/m³), les microfissures créées par l'augmentation du retrait endogène peuvent stopper ou diminuer l'évolution de la résistance mécanique.

- Les résultats des essais d'absorptions capillaires mettent en évidence l'effet bénéfique de la cure et du dosage en ciment sur le taux d'absorption initiale et ce pour des dosages inférieures à 400 kg/m^3 , au-delà de 400 kg/m^3 on remarque un regain dans l'absorption initiale, ceci est due à l'augmentation de la porosité induite par la microfissuration engendrée par le retrait endogène, celle-ci est d'autant plus importante lorsque la durée de cure augmente. A ce titre, pour un béton B30 par exemple, on a enregistré une diminution du taux d'absorption initiale par rapport au béton témoin de presque 21, 34, et 58% respectivement pour des cures humides de 3, 7 et 28 jours. Pour la hauteur d'ascension capillaire initiale (en 1 heure), elle est réduite de 13, 44 et 56%. On peut conclure là-dessus que la cure humide joue le rôle d'atténuateur vis-à-vis de l'absorption capillaire. Autrement dit, la porosité ouverte de la zone d'enrobage est proportionnelle au rapport E/C et inversement proportionnelle à la durée de cure humide. De plus, pour la même quantité en eau, un surdosage en ciment au-delà de 400 kg/m^3 est déconseillé pour garantir la durabilité d'un béton.
- Les mesures de la profondeur de la zone carbonatée montrent que celle-ci évolue en fonction de la durée d'exposition au gaz carbonique CO_2 , et que plus la durée de cure et le dosage en ciment augmentent (E/C diminue) plus la profondeur de carbonatation diminue. Ceci est dû aux produits de gel qui augmentent en fonction du dosage en ciment et de la durée de cure et qui ont tendance à colmater les espaces inter granulaires rendant ainsi la zone de peau plus imperméable à la pénétration des agents agressifs. On a remarqué également qu'à partir du dosage en ciment de 400 kg/m^3 , la cure humide favorise l'avancement du front de carbonatation. A titre indicatif, on a enregistré une diminution dans l'épaisseur de la zone carbonatée de 54% en augmentant le dosage en ciment de 300 à 400 kg/m^3 pour un béton conservé dans l'air, elle n'est que de 10% en augmentant le dosage de 400 à 450 kg/m^3 . Pour une cure dans l'eau de 3 jours, on a enregistré une diminution dans l'épaisseur de la zone carbonatée de presque 67% en augmentant le dosage en ciment de 300 à 400 kg/m^3 . Par contre, cette épaisseur a tendance à augmenter de presque 17% lorsqu'on augmente le dosage de 400 à 450 kg/m^3 . Ce résultat réaffirme qu'un surdosage en ciment au-delà de 400 kg/m^3 n'est plus bénéfique pour la réalisation d'un béton durable.
- Les résultats expérimentaux de la résistance à la compression des bétons après carbonatation à l'âge de 180 jours mettent en évidence que la carbonatation entraîne une augmentation de la résistance à la compression et une diminution de l'absorption initiale, Ceci est dû à la réduction des diamètres des gros capillaires du béton de peau. En effet, une proportion des vides des capillaires vient d'être occupée par la calcite CaCO_3 qui résulte de la réaction de carbonatation, ce qui implique une réduction des dimensions des capillaires et augmente par la suite la compacité du béton.

- Une tentative de modélisation de la résistance mécanique à la compression R_{c28} et de l'épaisseur de la zone carbonatée P_c en fonction de l'absorption initiale (A_{bi} et z_i) a été entamée. A cet effet, les résultats expérimentaux sont corrélés par des fonctions de corrélation de type linéaires et non linéaire. Par exemple, la résistance à la compression à 28 jours est reliée à l'absorption initiale par la fonction :

$$R_{c28} = R_{c0} - \alpha A_{bi}$$

$$R_{c28} = R_{c0} - \beta z_i$$

Où R_{c0} , α et β sont des coefficients de régression fonction du dosage en ciment D_c (kg/m^3) :

$$R_{c0} = 12.5 \left(\frac{D_c}{100} \right)$$

$$\hat{\alpha} = 1.10 \left(\frac{D_c}{100} \right) \text{ et } \beta = 0.10 \left(\frac{D_c}{100} \right)$$

A noter que $z_i \approx 10 A_{bi}$ ce qui fait que $\alpha \approx 10 \beta$.

La profondeur de carbonatation P_c à 180 jours est reliée à la résistance à la compression à 28 jours moyennant l'expression :

$$P_c = 60,085 \cdot \exp(-0,074 R_{c28}) \text{ avec } R=0.943$$

A signaler ici que Parrot [22] a estimé la profondeur de carbonatation des ouvrages en béton armé âgés de 30 ans en fonction de leurs résistances à 28 jours en proposant l'expression :

$$P_c = 125 \cdot \exp(-0,05 R_{c28})$$

Quant à la relation entre la profondeur de carbonatation et l'absorption initiale enregistrée après une heure de contact avec l'eau, les résultats expérimentaux ont permis de proposer les expressions théoriques suivantes pour estimer l'épaisseur de la zone de peau carbonatée P_c en fonction du taux d'absorption initial exprimé en A_{bi} (kg/m^2) et z_i (mm) :

$$P_c = 0,7624 \cdot \exp(0,7234 \cdot A_{bi}) \dots\dots\dots R=0.888$$

$$P_c = 0,8044 \cdot \exp(0,0568 \cdot z_i) \dots\dots\dots R=0.914$$

A travers cette étude nous pensons que la caractérisation de la zone de peau du béton en utilisant l'essai d'absorption capillaire, notamment, le coefficient d'absorption initiale peut être d'une très grande utilité pour estimer le comportement mécanique du béton et dévoiler sa durabilité à la carbonatation. Néanmoins, cette étude n'est guère achevée et mérite d'être complétée par une étude physicochimique et microstructurale du béton de peau afin d'appuyer les interprétations évoquées dans cette étude. Une étude à part entière peut être entamée sur la modélisation du transport du CO_2 dans les bétons et sa relation avec le processus de carbonatation. Enfin, on espère avoir atteint notre objectif et que cette étude a ouvert d'autres perspectives de recherche dans le domaine de la durabilité de béton en vue d'un développement durable.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] GLASER H. Grafisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen, *Kältetechnik* N°11, 1959, pp-345-355.
- [2] KRISHER O. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer Verlag, 1992.
- [3] PHILIP J.R., DE VRIES D.A. Moisture movement in porous materials under temperature gradient., *Trans.Am.Geo.Union*, vol.38, N°2, avril 1957-pp.222-232.
- [4] LUIKOV A.V. Heat and mass transfer in capillary porous bodies, Pergamon Press (1966).
- [5] J-F.DAIAN, J-P.LAURANT. Capillary water transfer in stone materials: Theoretical and experimental aspects. LTHE, rapport d'étude. Grenoble -France.
- [6] J-P.LAURANT. Physique de transfert d'eau dans la pierre. In : Géo mécanique Environnementale, vol .2 : B.SCHREFIER, P.DELAGE. Risques naturels et conservation du patrimoine. Ed, Hermès, pp.237-265,2001.
- [7] J-F.DAIAN, J-P.LAURANT. Structure poreuse et transport d'humidité dans les roches. LTHE, cours. Grenoble -France.
- [8] Philip J.R. The theory of infiltration: 4.Sorptivity and algebraic infiltration equation.*Soil Sci*, 84, pp257-264.
- [9] CHRISTOPHER H. Water movement in porous building materials –VII. The sorptivity of the mortar, *Building and Environment*, Vol.21,N°2, pp113-118, 1986.
- [10] CHRISTOPHER H, THOMAS K.T. Water movement in porous building materials –I Unsaturated flow theory and its applications, *Building and Environment*, 12, pp117-125, 1974.
- [11] RILEM, CPC 11.1. Absorption of water by immersion, CPC 11. 2 Absorption of water by capillarity, *Materials and Structures*, 7, pp.291-297,1974.
- [12] J.-P.BALAYSSAC, CH.-H. DETRICHE, J. GRANDET. Intérêt de l'essai d'absorption d'eau pour la caractérisation du béton d'enrobage, *Materials and Structures*, 1993, Vol. 26, pp 226-230.
- [13] VERONIQUE BAROGHEL-BOUNY, ABDELKRIM AMMOUCHE, HUGUES HORNAIN .Analyse de la microstructure et propriétés de transfert, In : VERONIQUE BAROGHEL-BOUNY . Transferts dans les bétons et durabilité, *Revue de génie civil*. Hermes, France, Vol 5, N°2-3, 2001, pp149-177.

- [14] ARNAUD CASTEL , GINETTE ARLIGUIE, VERONIQUE BAROGHEL-BOUNY. La microfissuration superficielle a-t-elle une influence sur la profondeur de carbonatation des bétons, In : VERONIQUE BAROGHEL-BOUNY . Transferts dans les bétons et durabilité, Revue de génie civil. Hermes, France, Vol 5, N°2-3, 2001, pp231-248.
- [15] N. KADOUM, A. HANNANI, K. MADANI, A. MERATI. Dégradation et réparation du béton; réhabilitation du béton par la technique de protection cathodique, 1^{ère} Congrès International sur La technologie et la durabilité du béton ; les 24, 25, 26 Mai 2004, USTHB, Alger, Algérie, article N°19,9p.
- [16] M.THIERY, G.VILLAIN, P.DANGLA, G.PLATRET. La technologie et la durabilité du béton. 2004 Mai., USTHB, Alger, algérie: laboratoire central des ponts et chaussées, division bétons et composites cimentaires, paris, 2004, N°22,8p (Modélisation du processus de carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires).
- [17] M.BUIL, J-P.OLLIVIER. Conception des bétons : la structure poreuse. In : BARON , J.OLLIVIER. La durabilité des bétons, Presses ENPC .Paris, 1992, pp.57-99.
- [18] R.DUVAL. La durabilité des armatures et du béton d'enrobage. In : BARON, J.OLLIVIER. La durabilité des bétons, Presses ENPC .Paris, 1992, pp.173-225.
- [19] VALSARAJ, K.T. Elements of environmental Engineering — thermodynamics and kinetics. New York: Lewis Publishers, 1995, 649 p.
- [20] KOBAYASHI, K., SUZUKI, K., UNO, Y. Carbonation of concrete and decomposition of C- S-H, Cement and Concrete Research, 1994, vol. 24, pp. 55-61.
- [21] AL-KADHIMI, T.K.H. BANFILL, P.F.G., MILLARD, S.G. et al. An accelerated carbonation procedure for studies on concrete, Cement and Concrete Research, 1996, Vol. 8, N° 30, pp. 47-59.
- [22] NISHIKAWA, T., SUZUKI, K., ITO, S. et al. Decomposition of synthesized etringite by carbonation, Cement and Concrete Research, 1992, vol. 22, p 6-14.
- [23] ROBERTS, M.H. Carbonation of concrete made with dense national aggregates. watford :Building Research Establishment, non paginé.
- [24] MATSUSATO, H., OGAWA, K., FUNATO, M. et al. Studies on the carbonation of hydrated cement and its effect on microstructure and strength, Proceedings of the 9th International Congress on the chemistry of cement. New Dehli. Vol. 5, 1992, pp. 363-369
- [25] A.LASHEB. La corrosion des armatures du béton arme, CTC centre Alger N°12 ,pp7-9 .
- [26] R.DUVAL La durabilité des armatures et du béton d'enrobage. In : BARON, J.OLLIVIER. La durabilité des bétons, Presses ENPC .Paris, 1992, pp.173-225.

- [27] **PAPADAKIS, V.G** , **VAYENAS, C.G. FARDIS, M.N. A.** Reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation, *AICHE Journal*, October 1989, Vol. 35, N° 10, pp.1639- 1650.
- [28] **SAETTA, A.V. SCHREFLER, B.A. VITALIANA, R.V.** The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials, *Cement and Concrete Research*, 1993, Vol. 23, pp. 761-772.
- [29] **DUVAL, R., HORNAIN, H.** La durabilité des bétons vis-à-vis des eaux agressives. In «Durabilité des bétons». J. Baron et J.P. Ollivier (Eds). Paris: Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1992, pp. 351-394.
- [30] **WIERIG, H.J.** Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure. RILEM Seminar on durability, Hanover, Germany, 1984, pp. 239-249.
- [31] **NGALA, V.T., PAGE, C. L.** Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement paste, *Cement and Concrete Research*, 1997, vol. 27, N°7, p 995-1007.
- [32] **PARROTT, L.J.** Factors influencing relative humidity in concrete, *Magazine of Concrete Research*, 1991, 43, N° 154, Mar., pp. 45-52.
- [33] **PATEL, R. G., PARROTT, L. J., MARTIN, J. A. et al.** Gradients of microstructure and diffusion properties in cement paste caused by drying, *Cement and Concrete Research*, 1985, Vol. 15, pp. 343-356.
- [34] **LEA, F.M.** The chemistry of cement and concrete, Third edition, London: Edward Arnold L.T.D, 1980, 237 p.
- [35] **LANGE, L. C., HILLS, C. D., POOLE, A. B.** Preliminary investigation into the effects of cabonation on cement-solidified Hazardous wastes, *Environ. Sci. Technol.*, 1996, Vol. 30, N° 1, pp. 25-30.
- [36] **SMITH, R.W, WALTON, J.C.** The effect of calcite solid solution formation on the transient release of radionuclide from concrete barriers, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 1998, Vol. 212, pp. 403-409.
- [37] **MALIER, Y.** Les bétons hauts performances, caractérisation, durabilité, applications. 2ème édition, Paris: Presse de l'Ecole National des Ponts et Chaussées, 1992, 673 p.
- [38] **DIEZ, J. M., MADRID, J., MACIAS, A.** Characterization of cement-stabilized Cd Wastes, *Cement and Concrete Research*, 1997, vol. 27, N° 3, pp. 337-343.
- [39] **ADAM M. NEVILLE.** Le Ciment Portland».In: **ADAM M. NEVILLE.** Propriétés des bétons, Ed, Eyrolles, 2000, p.1-52.

- [40] AFNOR, P 18-555. Granulats - Mesures des Masses Volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des granulats, Paris, dec 1990.
- [41] E.N.V., P 196-6. Méthodes d'essais des ciments –Partie 6: Détermination de la finesse, Paris 1990.
- [42] E.N.V., P 196-3. Méthodes d'essais des ciments –Partie 3: Prise de Ciment, Paris 1990.
- [43] AFNOR, P 18-431. Granulats –Analyse granulométrique par tamisage, Paris, sep,1990 .
- [44] DREUX.G.,FESTA. J., Nouveau guide du béton et de ces constituants, Eyrolles ,1998.
- [45] AFNOR, P 18-598. Granulats –Equivalent de sable, Paris, 1990.
- [46] AFNOR, P 18-303. Liants hydrauliques –l'eau de gâchage, Paris, 1990.
- [47] AFNOR, P 18-404. Béton –Confection du béton , Paris, 1990.
- [48] AFNOR, P 18-400. Béton –Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques, Paris,dec, 1981.
- [49] AFNOR, P 18-406. Béton –Essai de compression, Paris, 1990.
- [50] AFNOR, P 18-407. Béton –Essai de traction par flexion trois points, Paris, 1990
- [51] AFNOR, P 10-502. Pierre - Essai d'absorption d'eau », Paris, 1990.
- [52] TAZAWA, E.;MIYAZAWA, S. ET KASAI . Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste, Cement and Concrete Research, Vol 25, No, p.288-292.
- [53] L.HANZIC, R. ILIÉ. Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete, .Cement and concrete Research, N °33, 2003, pp 1385-1388.
- [54] PARROTT L.J., A review of carbonation in reinforced concrete, Cement and concrete Association, Ed, Slough, 1987.
- [55] M-S. GOUAL. Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation de co-produits argileux. Cas du béton argileux cellulaire obtenue par réaction avec l'alumine pulvérulent : caractérisation et comportement thermo hydrique. Thèse de doctorat GC. ENP Alger, 2001.

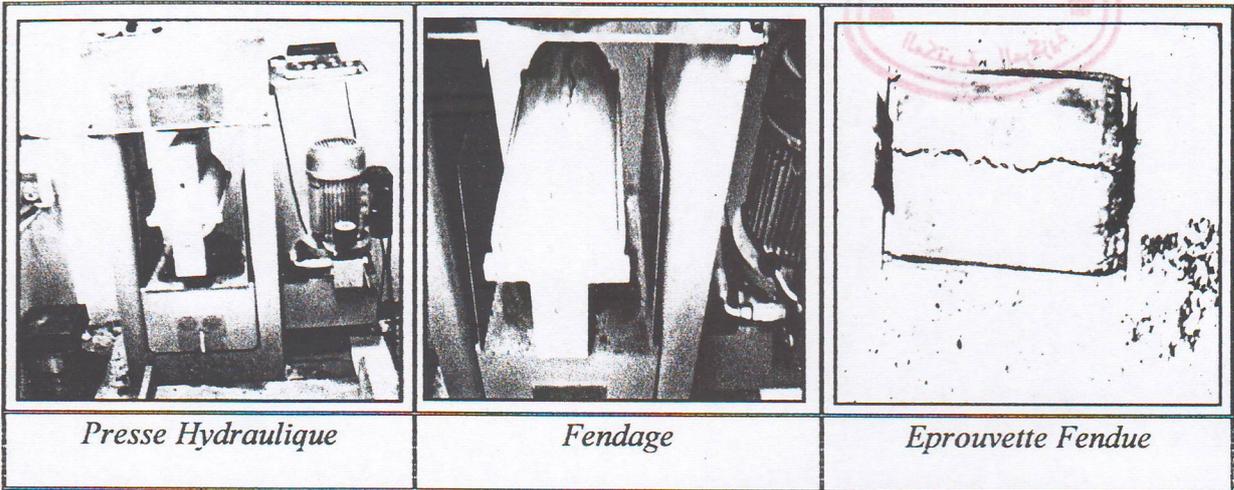
Annexe

**Tableau III -3 : Influence de type du béton sur les cinétiques
D'absorption d'eau (kg/m²) pour les différentes durées de cure.**

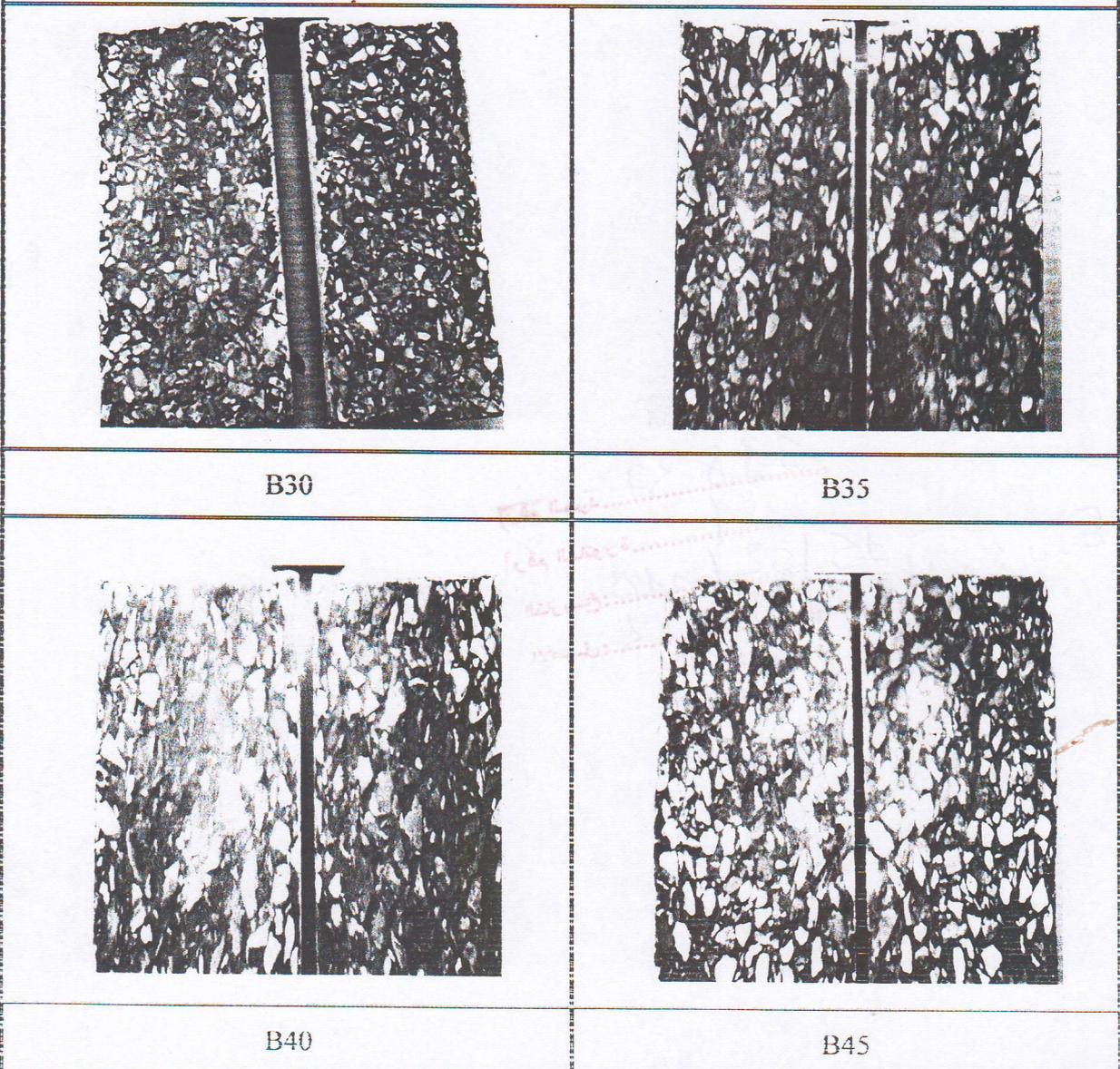
Cure humide	Variations de quantité d'eau absorbée en (kg/m ²)							
	Témoin				Cure 3 j			
Temps (s ^{1/2})	B30	B35	B40	B45	B30	B35	B40	B45
00.00	0,000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17.34	1.162	0.611	0.447	0.538	0.706	0.497	0.280	0.393
24.48	1.591	0.880	0.788	0.956	1.151	0.744	0.520	0.818
30.00	2.024	1.290	1.120	1.199	1.561	0.887	0.687	0.997
34.62	2.391	1.455	1.390	1.483	1.790	1.073	0.808	1.258
42.42	2.855	1.861	1.721	1.891	2.198	1.295	1.031	1.425
48.96	3.391	2.210	2.025	2.174	2.600	1.501	1.229	1.713
54.78	3.673	2.413	2.318	2.381	2.973	1.744	1.357	2.018
60.00	4.063	2.685	2.527	2.655	3.218	2.050	1.520	2.221
69.30	4.473	2.998	2.835	2.795	3.586	2.187	1.705	2.347
77.46	5.007	3.308	3.052	3.115	3.953	2.420	1.878	2.517
84.84	5.413	3.545	3.320	3.275	4.175	2.524	2.042	2.737
94.86	5.944	4.030	3.726	3.590	4.588	2.790	2.297	3.123
103.92	6.290	4.438	4.053	3.790	4.893	3.015	2.500	3.227
112.26	6.774	4.814	4.420	4.090	5.302	3.190	2.784	3.423
127.26	7.488	5.415	4.888	4.436	5.796	3.591	3.092	3.769
140.70	8.088	5.907	5.334	4.720	6.037	3.890	3.393	3.998
293.94	14.306	11.335	9.694	8.078	9.735	7.592	6.024	7.320
300.00	14.429	11.478	9.816	8.259	9.980	7.653	6.104	7.402
Cure humide	Cure 7 j				Cure 28 j			
Temps (s ^{1/2})	B30	B35	B40	B45	B30	B35	B40	B45
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17.34	0.622	0.280	0.228	0.315	0.319	0.220	0.164	0.280
24.48	0.971	0.516	0.413	0.700	0.545	0.380	0.283	0.580
30.00	1.230	0.675	0.562	0.923	0.690	0.520	0.414	0.769
34.62	1.483	0.846	0.696	1.215	0.870	0.660	0.534	0.929
42.42	1.810	1.073	0.889	1.537	1.110	0.850	0.762	1.177
48.96	2.155	1.260	1.069	1.730	1.340	1.060	0.905	1.320
54.78	2.400	1.543	1.228	2.010	1.490	1.150	1.057	1.545
60.00	2.690	1.750	1.336	2.198	1.710	1.320	1.222	1.878
69.30	3.005	1.828	1.481	2.326	1.940	1.423	1.295	1.932
77.46	3.304	2.079	1.720	2.653	2.161	1.622	1.367	2.124
84.84	3.647	2.283	1.820	2.816	2.363	1.817	1.554	2.318
94.86	3.970	2.549	2.105	3.163	2.626	2.030	1.845	2.606
103.92	4.319	2.755	2.300	3.205	2.856	2.218	2.010	2.709
112.26	4.813	2.997	2.545	3.612	3.180	2.426	2.223	3.076
127.26	5.305	3.356	2.799	3.785	3.548	2.750	2.480	3.309
140.70	5.609	3.592	3.105	4.089	3.826	2.958	2.752	3.566
293.94	9.204	6.796	5.814	6.931	6.673	6.204	5.508	6.512
300.00	9.349	6.898	5.929	6.971	6.796	6.306	5.639	6.622

**Tableau III -4 : Influence de type du béton sur les cinétiques
D'absorption d'eau (mm) pour les différentes durées de cure.**

Cure humide	Positions du front d'imbibition capillaire (mm)							
	Témoin				Cure 3 j			
Temps (s ^{1/2})	B30	B35	B40	B45	B30	B35	B40	B45
0.00	0	0	0	0	0	0	0	0
17.34	16.3	13.9	10.5	10.7	13.1	10.3	7.1	8
24.48	22.1	18.1	14.5	13.1	17.7	12.1	9.3	11.7
30.00	26.9	20.5	17.3	17	21.5	14.7	11.5	13.3
34.62	32.1	23.5	19.5	19.1	25.3	16.9	13.9	15.9
42.42	37.3	28	23.7	22.5	32	19.7	17.3	18.1
48.96	43.8	32.5	26.7	24.7	35.3	22.5	19.3	21.5
54.78	46.3	36	30	27.5	38.3	24.5	21.5	22.5
60.00	50.5	38.3	31.6	30	43.8	26.4	23.1	25
69.30	54.55	41.7	34.4	32.3	46.45	28.6	25.1	27
77.46	57.95	44.7	36.9	34.3	48.7	30.5	26.8	28.9
84.84	61.78	47.4	39.2	36.2	50.8	32.2	28.5	30.5
94.86	65.23	51	42.1	38.5	53.7	34.9	30.5	32.5
103.92	69.51	54.5	44.1	40.9	55.9	36.6	32.5	34.5
112.26	72.77	59	47.5	42.9	58.61	37.7	34.7	36.5
127.26	79.25	63	53.7	46.6	63.3	43	37.6	39.7
140.70	85.3	68	56.9	50	67.1	45.3	40.5	42.7
293.94	151.7	123	101.5	87.7	109.5	81	73.3	75.3
300.00	154.3	126.5	104.5	89.3	112.2	83.1	74.7	77.5
Cure humide	Cure 7 j				Cure 28 j			
Temps ((s ^{1/2}))	B30	B35	B40	B45	B30	B35	B40	B45
0.00	0	0	0	0	0	0	0	0
17.34	9.7	7.3	5.2	5.3	5	4.3	3.1	3.9
24.48	13	8.9	7.5	8.9	9.7	6.2	5.2	7.4
30.00	15	11.5	9.1	10.3	10.7	8.1	7.1	9.3
34.62	17.3	12.7	10.3	12.5	13.3	9	8	11.3
42.42	21	14.5	14.3	16.2	15.2	11.1	10.7	13
48.96	23	16.5	16.5	18.4	16.9	12.7	12	15
54.78	25.8	18.9	17.9	19.3	18.5	14.3	12.8	17.5
60.00	28.4	20	19.9	21.7	22.41	15.5	14.5	19
69.30	30.97	22	21.8	23.6	24.38	17.4	16.1	20.9
77.46	33.2	23.7	23.5	25.3	26.05	19.1	17.5	22.5
84.84	35.29	25.3	25	26.8	27.68	20.7	18.7	24
94.86	37.9	27.7	27	28.9	29.75	22.5	20	25.9
103.92	40.5	29.5	29	30.6	31.65	24.2	22.3	27.7
112.26	42.65	31.5	30.5	32.2	33.5	25.9	24	29.5
127.26	47.05	34.5	33.5	35.5	36.9	28.9	26.7	32.5
140.70	50.7	37.5	36.5	38.3	41.3	31.9	28.3	35
293.94	92.87	69.8	66.7	69.5	72	63.3	55	65
300.00	94.7	71.6	68.8	71	73.9	65.3	56	66.7



Photos A : Les étapes d'essais de fendage (Eprouvette 16x32)cm²



Photos B : Exemples d'essais des mesures de la profondeur de carbonatation effectuée après 60j de conservation dans une salle saturée en Co₂. (Pour les différents types de Béton Témoin)