

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux en génie civil

Présenté par :

MESSABHIA Tarek

MADI Abde Rrahim

**Thème : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR
L'INSTABILITE THERMIQUE DES BETONS
(PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUE)**

Sous la direction de : Dr ; AIDOUUD Assia

Septembre 2020

Remerciement

Avant d'exposer le contenu de ce travail, nous tenons à remercier "**ALLAH**" le tout puissant de nous avoir donné le privilège et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science et de la connaissance.

Nous remercions en particulier : Mme **AIDOUD Assia.**, Maitre conférences au Département des Génie civil et hydraulique, Université de Guelma, pour son engagement avec nous pour mettre à fin ce mémoire, pour ses sacrifices pour sa disponibilité ainsi que pour ses efforts, qu'elle puisse trouver ici l'expression de notre reconnaissance. Qui a bien voulu assurer notre encadrement et pour ses conseils et ses encouragements ainsi que sa gentillesse qu'elle nous a sans cesse prodigué tout au long de ce travail, Nous tenons à exprimer notre respect pour elle.

Nos remerciements vont aussi à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Nous remercions également Mme **Samira** ingénieure de laboratoire pour sa gentillesse et son encouragement.

Enfin je ne saurais bien sûr oublier d'assurer de ma gratitude à ceux trop nombreux pour être citer ici et qui ont participés de près ou de loin à ce travail

Dédicace

À l'aide d'Allah tout puissant, Nous avons pu réaliser ce modeste travail que je dédie : Aux êtres les plus chers qui ont tout sacrifiés pour mon bonheur, qui ont été toujours à mes côtés, dans la joie comme la tristesse, mes parents : mon père **Mohamed** et ma mère **Djohra** que j'aime énormément, pour leur soutien durant toute ma vie, qu'Allah les protège. Merci et mille fois merci

À mes chères sœurs

À mes nièces bien aimés **Ranime** et **Razane**

À ma très chère encadrante Mme : **Aidoud Assia**

À toute ma famille a tout mes oncles et tantes

À tous les enseignants qui ont contribué à mon apprentissage.

Je voudrais également associer à ces remerciements à mon binôme **Madi Abde**

Rahim

À tout mes amis et mes camarades et la promotion de Master 2 **Matériaux de construction 2020**

Une spéciale dédicace à mes chères amis **Doudou, kouji** et **Mirou**

Et à ceux qui m'ont donné un coup de main

Et pour tous les proches de mon cœur

Et pour tous ceux qui aiment la Génie civil.

Tarek

Dédicace

À l'aide d'Allah tout puissant, Nous avons pu réaliser ce modeste travail que je dédie : À mes plus chers êtres au monde. À mes chers parents ma mère **Chama** et mon père **Rachid** pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements

À mes chers frères.

Mes oncles, tantes et leurs familles.

À mon encadrante : Mme **Aidoud Assia**

À mon cher binôme **MESSABKA Tarek**.

À tous les enseignants qui ont contribué à mon apprentissage.

Une spéciale dédicace à mes chères amis **Sami, Amine et Khaled**.

À tous mes Amis sans exception.

À tous mes camarades de la promotion master 2020 pour les bons moments passés

Rahim

Résumé

Les éléments de structures en béton peuvent être soumis à des conditions accidentelles telles que les incendies. La sécurité des personnes, de la structure et des biens dépend donc entre autres de la stabilité thermique et des propriétés résiduelles du béton. Des dégradations du béton peuvent être observées à la suite des incendies de tunnels ou de bâtiments. Les travaux de recherche dans le domaine ont permis d'avoir des explications sur les phénomènes observés dans le comportement du béton chauffé.

L'objectif de ce travail, est d'effectuer une étude bibliographique sur le comportement du béton soumis à une température élevée (propriétés physico-chimique). D'une part, l'effet d'ajoutées des fibres de polypropylène au béton pour améliorer sa stabilité thermique, d'autre part, l'influence de l'élévation de la température sur les propriétés physico-mécanique le long des attaques chimiques. Pour cela les résultats comparés montrent que :

La perte de masse est légèrement influencée par l'élévation de la température, par contre la porosité, l'absorption, les masse volumique et la perméabilité sont les plus influencées surtout concernant les bétons fibrés au-delà de la température de fusion des fibres. Les résultats étudiés ont montré que la température élevée n'accélère pas nécessairement la dégradation due à l'attaque chimique (de sulfate de magnésium, le chlorure).

Mots clés : BHP, BFHP, haute température, fibres, propriétés physique, attaque chimique.

Summary

The elements of concrete structures may be subjected to accidental conditions such as fires. The safety of people, structure and property therefore depends, among other things, on the thermal stability and residual properties of concrete. Concrete degradation can be observed as a result of tunnel or building fires. Research in this field has provided explanations of the phenomena observed in the behaviour of heated concrete.

The aim of this work is to carry out a bibliographical study on the behaviour of concrete subjected to a high temperature (physico-chemical properties). On the one hand, the effect of the addition of polypropylene fibres to the concrete to improve its thermal stability, on the other hand, the influence of the rise in temperature on the physico-mechanical properties along the chemical attacks. For this the comparative results show that:

The loss of mass is slightly influenced by the temperature rise, but the porosity, absorption, density and permeability are the most influenced especially concerning fibrous concretes beyond the melting temperature of the fibres. The results studied showed that the high temperature does not necessarily accelerate the degradation due to chemical attack (magnesium sulphate, chloride).

Keywords: High performance concrete, High performance fiber concrete, high temperature, fiber, physical properties, chemical attack.

الملخص:

يمكن أن تتعرض العناصر الهيكلية الخرسانية لظروف عرضية مثل الحرائق، لذلك فإن سلامة الأشخاص والبنية والممتلكات تعتمد على الاستقرار الحراري والخصائص المتبقية للخرسانة، من بين أمور أخرى. يمكن ملاحظة تدهور الخرسانة نتيجة حرائق الأنفاق أو المباني. قدم العمل البحثي في هذا المجال تفسيرات للظواهر التي لوحظت في سلوك الخرسانة المسخنة. الهدف من هذا العمل إجراء دراسة ببليوغرافية لسلوك الخرسانة المعرضة لدرجة حرارة عالية (الخواص الفيزيائية والكيميائية). من ناحية أخرى، فإن تأثير إضافة ألياف البولي بروبيلين إلى الخرسانة لتحسين ثباتها الحراري، ومن ناحية أخرى، تأثير ارتفاع درجة الحرارة على الخواص الفيزيائية الميكانيكية على طول الهجوم الكيميائي. لهذا، تظهر النتائج المقارنة ما يلي:

يتأثر فقدان الكتلة بشكل طفيف بارتفاع درجة الحرارة، ومن ناحية أخرى، فإن المسامية والامتصاص والكثافة والنفذية هي الأكثر تأثراً، خاصة بالنسبة للخرسانة المقوات بالألياف فوق درجة حرارة انصهار الألياف. أظهرت النتائج التي تمت دراستها أن ارتفاع درجة الحرارة لا يؤدي بالضرورة إلى تسريع التدهور بسبب الهجوم الكيميائي (كبريتات المغنيسيوم، الكلوريد).

الكلمات المفتاحية: خرسانية عالية الأداء، خرسانة بالألياف عالية الأداء، حرارة عالية، الألياف، الخصائص الفيزيائية، الهجوم الكيميائي.

SOMMAIRE

Résumé	I
Abstract	I
ملخص	II
Sommaire	III
Principales notations et abréviations	VI
Liste des tableaux	VII
Liste des figures	VIII
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur les bétons

I-1- Introduction	3
I-2- Microstructure du béton	3
I-2-1- Description du béton	3
I-2-1-1- Le ciment hydraté	3
I-2-1-2- Granulats	4
I-2-1-3- Additions minérales	5
I-2-1-4- Adjuvants	5
I-2-1-5- L'eau	6
I-2-2- Microstructure du béton durci	6
I-2-2-1- Microstructure de la pâte de ciment	6
I-2-2-2- Interface pâte-granat	8
I-2-3- L'eau dans le béton durci	10
I-2-3-1- Classification de l'eau	11
I-2-3-2- Interaction eau-milieu poreux	13
I-2-4- Propriétés physico-chimiques du béton durci	15
I-2-4-1- Propriétés physiques	15
I-2-4-1-1- Absorption	15
I-2-4-1-2- Porosité	16
I-2-4-1-3- Masse Volumique	18
I-2-4-1-4- Perméabilité	20
I-2-4-2- Propriétés chimiques	20
I-2-4-2-1- Attaque par les acides	21
I-2-4-2-1-1- Définition	21
I-2-4-2-1-2- Les différents types des acides	21
I-2-4-2-1-3- Mécanisme d'attaque des acides	23
I-2-4-2-2- Attaque par les sulfates	23
I-2-4-2-2-1- Définition	23
I-2-4-2-2-2- Sources des sulfates	24
I-2-4-2-2-3- Mécanismes d'attaques	26
I-2-4-2-2-4- Processus d'attaque par les sulfates internes	26
I-2-4-2-2-5- Processus d'attaque par les sulfates externes	27
I-3- Conclusion	29

Chapitre II : Instabilité thermique des bétons

II-1- Généralités sur les BHP	30
II-1-1- Historique de l'évolution des bétons hydraulique	30
II-1-2- Définition du BHP	30
II-1-3- Applications des BHP	30
II-1-4- Les constituants du BHP	32
II-1-5- Formulation des BHP	32
II-2- Généralités sur les BFHP	33
II-2-1- Historique de l'évolution des bétons hydraulique fibré	33
II-2-2- Définition du BFHP	34
II-2-3- Les fibres	34
II-2-4- Les types des fibres	35
II-2-5- Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres	36
II-2-5-1- Les fibres métalliques	37
II-2-5-1-1- La longueur et l'élançement des fibres	38
II-2-5-1-2- Le Pourcentage et le dosage en fibre	38
II-2-5-1-3- Propriétés mécaniques des fibres métalliques	39
II-2-5-1-4- Rôle des fibres	39
II-2-5-2- Les fibres non métalliques	41
II-2-5-3- Les fibres de verre « E » et « AR »	41
II-2-5-3-1- Propriétés des fibres de verre	41
II-2-5-3-2- Rôle de fibre	41
II-2-5-3-3- Applications	42
II-2-5-3-4- Avantage	42
II-2-5-3-5- Désavantages	43
II-2-5-4- Fibres de polypropylène	43
II-2-5-4-1- Propriétés des fibres de polypropylène	44
II-2-5-4-2- Les bétons de fibres de polypropylène	44
II-2-5-4-3- Application	44
II-2-6- Fabrication de béton de fibres	44
II-2-7- Diverses applications de béton de fibre	45
II-3- Phénomènes physiques et chimiques dans le béton chauffé	45
II-3-1- Matrice cimentaire	46
II-3-2- Les granulats	47
II-3-3- L'interface pâte granulats	48
II-4- Éclatement des bétons sous sollicitations thermiques	48
II-4-1- Les différentes formes d'endommagement thermique	48
II-4-1-1 L'écaillage	48
II-4-1-2 L'éclatement	49
II-4-2- Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton à haute température	50
II-4-2-1- Mécanisme d'éclatement par déformations thermiques empêchées	50
II-4-2-2- Mécanisme d'éclatement par pression interne	51
II-4-2-3- Le couplage thermo-hydro-mécanique	55

II-4-3- Paramètres favorisant l'instabilité thermique	56
II-5- Moyens de prévention de l'éclatement	57
II-5-1- Fibres polypropylène	57
II-5-2- Protection thermique	59
II-6- Conclusion	60

Chapitre III : L'effet de la monter de la température sur les propriétés des bétons

III-1- Introduction	61
III-2- Comportement des bétons à hautes températures	61
III-2-1- L'effet sur les propriétés physiques.	61
III-2-1-1- Perte de masse	61
III-2-1-2- La masse volumique (absolue et apparente)	65
III-2-1-3- La perméabilité (à gaz et à l'eau)	66
A) Influence de la température et du séchage	66
B) Effet des fibres de polypropylène sur la perméabilité	69
III-2-1-4- La porosité	71
III-2-1-5- L'Absorption	71
III-2-2- L'effet sur les propriétés chimiques	73
III-2-2-1- Effet des milieux sulfaté sur les propriétés physiques	73
A) Porosité accessible à l'eau et masse volumique	73
B) L'absorption d'eau par capillarité	74
C) Mise en évidence du pH interne et externe du BFES	74
III-2-2-2- Influence de la température	75
A) Variation de la masse	76
B) Résistance à la compression	77
C) Porosité accessible à l'eau	77
D) Absorption capillaire	78
III-2-2-3- Effet de la température sur la profondeur de pénétration des chlorures	78
III-3- Conclusion	79

Liste des abréviations

AR : les fibres (alcali -résistantes)

B : Brucite

BFES : Bétons fibré conservés dans l'eau séléniteuse

BFHP : Bétons fibré à Hautes Performances

BHP : Bétons à Hautes Performances

BTHP : Bétons à très Hautes Performances

CEM I : type de Ciments numéro I

CEM II : type de Ciments numéro II

CEM III : type de Ciments numéro III

E : les fibres de verre classique

ESA : d'attaque sulfatique externe

FM : Fibre métallique

FPP : Fibre de polypropylène

Lf : longueur de fibres

MEB : la microscopie électronique à balayage

TSA : attaque par la formation de Thaumasite

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Principaux constituants d'un ciment ordinaire.....	04
Tableau I-2 : Définition des différents types de porosité d'un matériau.....	17
Tableau I-3 : les principaux types de béton ainsi que de leur masse volumique moyenne.....	19
Tableau I-4 : Composants du béton menacés par la corrosion.....	23
Tableau II-1 : Les différents types de fibres en fonctions de leurs caractéristiques respectives [Guerbas N. & Attalah O., 2017].....	36
Tableau II-2 : Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres.....	36
Tableau II-3 : Caractéristiques mécaniques des fibres reportes par [Truong B. T., 2016] et [Tlaji T., 2018].....	37
Tableau II-4 : Les caractéristiques mécaniques et physiques des fibres les plus utilisées.....	37
Tableau II-5 : Présente domaine d'application privilèges par type de fibres [Chouiter Y., 2016]..	42
Tableau II-6 : Application de divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment..	45
Tableau III-1 : Valeurs de A_{η} et η_0 en fonction du type de béton (béton B35).....	71

Liste des figures

Figure I-1 : La diversité des formes du gel CSH [Aidoud A, 2018]	08
Figure I-2 : Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un BO : 1- couche continue de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 2 - couche de CSH, 3 - couche de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 4 - zone poreuse, 5 - pâte du ciment hors de l'auréole de transition, 6 - ettringite, [Diamond S., 1986] source [Aidoud A., 2018]	09
Figure I-3 : Microstructure de la zone de contact entre la pâte et le granulat [Hager, 2004] source [Aidoud A., 2018].....	10
Figure I-4 : Evolution de la zone de transition dans un BHP ($e/c=0,23$ et $e/c=0,15$) pendant l'hydratation [Kanema T.M., 2007] source [Aidoud A., 2018].....	10
Figure I-5 : Illustration de la répartition de l'eau adsorbée à la surface des (CSH). A et B sont deux exemples possibles [Aidoud A., 2018].....	13
Figure I-6 : Rayon des pores remplis d'eau à 20°C en fonction de l'humidité relative de l'aire.....	14
Figure I-7 : Illustration des seuils d'accès et de « l'effet bouteille d'encre » avec un fluide non mouillant.....	14
Figure I-8 : Montée capillaire (tiré de Samson (2008)).....	15
Figure I-9 : Mécanismes d'absorption d'eau par un béton.....	16
Figure I-10 : Différents types de porosité d'un matériau poreux d'après <i>J.P. Ollivier</i>	18
Figure I-11 : La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage [Boualleg S., 2004]	21
Figure I-12 : Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate.....	24
Figure I-13 : L'origine des sulfates (interne ou externe) [Kerbouche, 2009].....	25
Figure I-14 : L'attaque par les sulfates [Aidoud A., 2019].....	26
Figure I-15 : La formation de l'ettringite secondaire [Boualleg S., 2004].....	27
Figure I-16 : Eprouvette de béton dégradée après 5ans de contact avec des sols riches en sulfates. [Boualleg S., 2004] a) $E/C=0.5$ b) $E/C=0.39$	27
Figure I-17 : Mécanisme proposé d'attaque du sulfate de magnésium [Aidoud A., 2019].....	28
Figure II-1 : Modèle de composite à base de fibres [Rossi P., 1998] source [Bouaziz L., 2014]....	34
Figure II-2 : Géométrie des fibres métalliques.....	38
Figure II-3 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres [Koiman A.G., 2000] Source [Guerbas N. & Attalah O., 2017].....	40
Figure II-4 : Principe de couture d'une fissure [Grünewald S. & Walraven J.C.,2001] Source [Guerbas N. & Attalah O., 2017].....	40

Figure II-5 : Fibres de polypropylène.....	43
Figure II.6 : Les principales modifications se passent dans la pâte de ciment, en raison de la présence de l'eau sous différentes formes (libres, liée, absorbée) [Haniche R., 2011].....	46
Figure II-7 : Processus de déshydratation (a) / réhydratation(b) de la pâte de ciment exposée à haute température [Alonso C. & Fernandez L., 2004].....	46
Figure II-8 : Analyse thermogravimétrique des granulats calcaires (a), siliceux (b) et silex (c) [Xing Z., 2011], [Nguyen V., 2013].....	48
Figure II-9 : Ecaillage lors de l'incendie du tunnel mont blanc [Toumi B., 2010].....	49
Figure II-10 : Eclatement d'un poteau durant l'essai au feu [Toumi B., 2010].....	49
Figure II-11 : Eclatement par déformations thermiques empêchées [Toumi B., 2010].....	51
Figure II-12 : Première phase du processus thermo-hydrique : vaporisation de l'eau liquide (eau capillaire, adsorbée et provenant de la déshydratation des CSH) puis transport vers les zones à basse pression, illustration reprise de [Mindeguia J.C., 2009].....	51
Figure II-13 : Deuxième phase du processus thermo-hydrique : condensation de la vapeur dans les zones froides et formation d'une barrière étanche (zone saturée), illustration reprise de [Mindeguia J.C., 2009].....	52
Figure II-14 : Mesures de pression de vapeur dans une éprouvette de béton à hautes performances selon [Kalifa P. et al., 2001]. A gauche, évolution de la pression en fonction du temps : première phase d'augmentation de la pression suivie d'une phase de diminution. A droite, évolution des pressions mesurées en fonction de la température : les pressions suivant la courbe de pression de vapeur saturante.....	52
Figure II-15 : Simulations du profil de teneur en eau dans un béton chauffé à différents temps de calcul [Msaad Y., 2005]. Béton à haute performance à gauche et béton ordinaire à droite. Le pic de teneur en eau correspond à la formation de la barrière étanche.....	53
Figure II-16 : Schéma du dispositif de mesure du champ de teneur en eau d'une éprouvette en béton par spectrométrie à rayons gamma. A droite, profils de teneur en eau mesurée sur une éprouvette de béton à haute performance à différents instants de chauffage [Kalifa P. et Menneteau F. D., 2000]. 0 % sur l'axe des ordonnées correspond au béton sans eau libre.....	53
Figure II-17 : Schéma du dispositif de mesure du champ de teneur en eau d'une éprouvette en béton par résonance magnétique nucléaire. A droite, profils de teneur en eau mesurée sur une éprouvette de béton à différents instants de chauffage [Van Der Heijden et al., 2007].....	54
Figure II-18 : Mécanisme thermo-hydrique d'instabilité thermique par dépassement de la résistance en traction du béton, illustration reprise de [Mindeguia J.C., 2009].....	54

Figure II-19 : Estimation numérique des pressions dans un pore sous l'effet de l'expansion de l'eau liquide selon [Khoylou N. et England G. L., 1996]. A gauche dans le cas d'un béton ordinaire, à droite dans le cas d'un béton à hautes performances. Les courbes de pression sont calculées pour différents niveaux de saturation initiale.....	55
Figure II-20 : Séquences d'éclatement du béton [Toumi B., 2010].....	56
Figure II-21 : Observation au MEB d'une fibre de polypropylène dans un échantillon de béton à 20 °C (cliché de gauche) puis après chauffage à 200 °C (cliché de droite). La fibre n'apparaît plus après le cycle de chauffage [Kalifa P. et al., 2001].....	57
Figure II.22. Représentation simplifiée du passage de la pression de vapeur autour d'une fibre de polypropylène du fait de sa faible adhérence avec le squelette solide [Khoury G. A., 2008]... ..	58
Figure II-23 : Les courbes ATD et DTG pour les fibres polypropylène [Kalifa P. et al., 2000].....	58
Figure II-24 : Observation en épi-fluorescence d'un béton fibré (à gauche) et non fibré (à droite) après chauffage à 400 °C selon Kalifa P. et al. [2001]. Les zones les plus claires correspondent aux fissures.....	59
Figure II-25 : Deux illustrations expérimentales de l'efficacité de fibres de polypropylène vis- à vis du risque d'instabilité thermique du béton (pour chaque photo, à gauche formulation sans fibres, à droite formulation avec fibres) [Shuttleworth P., 2001] et de [Bilodeau A. et al., 2004].....	59
Figure II-26 : Installation d'une protection thermique rapportée sur la dalle d'un tunnel.....	60
Figure III-1 : (a) : perte de masse en fonction de la température selon Khoury 1985 [Khoury G.A. et al., 1985]. (b) : la perte de masse en fonction de la température selon [Kanema M. et al., 2007].....	62
Figure III-2 : La perte de masse des BHP (M100C), pré-séchés et sans prétraitement, chauffés à 600°C [Hager I.G., 2004].....	62
Figure III-3 : Perte de masse (à gauche) et la vitesse de perte de masse (à droite) en fonction de la température, bétons chauffés jusqu'à 600°C [Hager I.G., 2004].....	63
Figure III-4 : Perte de masse en fonction de la température et de temps, d'après [Zhang B.,2011].	64
Figure III-5 : Evolution de la perte de masse en fonction de la température du cycle de chauffage refroidissement pour (a) des bétons à haute performance sans fibres B et avec des fibres métalliques BM15, BM19.5 et BM39 (b) le béton sans fibres B1 et B2 et les bétons avec des fibres métalliques, B1M15, B1M19.5 et B1M39 [Belaribi H., 2019]..	64
Figure III-6 : Evolution de la perte de masse des bétons en fonction du cycle de chauffage – refroidissement [Nonna Y., 2015].....	65
Figure III-7 : Masse volumique apparente en fonction de la température.....	65
Figure III-8 : Masse volumique relative en fonction de la température.....	66
Figure III-9 : Variation de la masse volumique à l'état frais en fonction du dosage de fibre verre.	67

Figure III-10 : Variation de la perméabilité des bétons sans fibre en fonction de la température : valeur tiré de [Mindeguia J. C., 2009].....	67
Figure III-11 : Perméabilité en fonction de la température [Kanema M. et al., 2007].....	68
Figure III-12 : Augmentation de la perméabilité pour trois types de BHP en fonction de la température [Noumowe A. N. et al., 2009].....	68
Figure III-13 : Influence de dosage des fibres sur la perméabilité [Kalifa P. et al., 2001].....	69
Figure III-14 : Effet des fibres de polypropylène sur la perméabilité en fonction de la température [Mindeguia J. C., 2009].....	70
Figure III-15 : Evolution de la perméabilité intrinsèque résiduelle des bétons en fonction du cycle de chauffage-refroidissement [Nonna Y., 2015].....	70
Figure III-16 : Variation de l'absorption en fonction la température [Chouiter Y., 2016].....	72
Figure III-17 : Variation de l'ISAT en fonction de la température de chauffage (BHP) [Toumi B., 2010].....	72
Figure III-18 : Variation de la porosité accessible à l'eau et la masse volumique des différents bétons [Boutiba A. et al., 2013].....	73
Figure III-19 : Coefficient d'absorption capillaire des différents bétons.....	74
Figure III-20 : Evolution du pH du BFES.....	74
Figure III-21 : Etat des mortiers après 24 mois d'immersion dans 5% MgSO ₄ à différentes températures 5, 20 et 50 °C [Aziez M. N., 2017].....	75
Figure III-22 : Variations de la masse des échantillons pendant 24 mois d'immersion dans 5% de MgSO ₄ à (5°C, 20°C et 50 °C) [Aziez M. N., 2017].....	76
Figure III-23 : Résistance à la compression des échantillons pendant 24 mois d'immersion dans 5% de MgSO ₄ à (5, 20 et 50 °C) [Aziez M N., 2017].....	77
Figure III-24 : Porosité du mortier étudié à différentes températures [Aziez M. N., 2017].....	78
Figure III-25 : Coefficient d'absorption capillaire pour mortiers après 24 mois d'immersion dans 5% MgSO ₄ à (5 et 20 et 50 °C) [Aziez M. N., 2017].....	78
Figure III-26 : Variation de la profondeur de pénétration des ions chlores à travers [Belarouci A., 2011].....	79

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

La production journalière mondiale de béton est en moyenne de 16 393 442 m³. Ce matériau est utilisé dans la construction des immeubles d'habitation, des tunnels, des bâtiments d'activité industrielle et de commerce, des ouvrages d'art, etc..

Le béton est adapté pour rester robuste et durable pendant une longue période. Il est un matériau composite, hétérogène et particulièrement complexe et évolutif

Les évolutions actuelles que connaissent les bétons sont liées aux connaissances acquises sur ce matériau grâce aux nombreuses recherches menées. Ces recherches ont prouvé que les bétons en général, et les bétons à haute performance (BHP) en particulier, possèdent des caractéristiques mécaniques intrinsèques satisfaisantes. En effet, les bétons à haute performance sont différenciés des bétons ordinaires par leurs fortes densifications et leurs faibles porosités ce qui leur donne des bonnes caractéristiques mécaniques et une meilleure durabilité. Pour cette raison que les BHP sont plus utilisés dans des structures de grande envergure comme les ponts, les tunnels, les centrales nucléaires et les bâtiments.

Cette utilisation croissante du béton à haute performance suscite des interrogations concernant sa tenue au feu. C'est le cas des trois incendies dans le tunnel sous la manche en France (18/11/1996, 11/09/2008), le tunnel de Tauern en Autriche ou la tour Windsor en Espagne (14/02/2005) ou les éléments principaux (voussoirs, poteaux, dalles) de ces structures ont été fortement sollicités et gravement endommagés. , ce qui mis en évidence des lacunes sur la compréhension complète des phénomènes thermo-physiques qui interviennent lorsque le béton est soumis à des hautes températures et qui peuvent présenter certaines instabilités thermiques conduisant à l'écaillage ou à l'éclatement.

Aujourd'hui, il est important de pouvoir déterminer le danger que peut représenter un tel phénomène pour la bonne tenue de la structure durant et après un incendie. Une baisse de performance ou une perte de béton compromet la capacité portante des structures et réduit la fonction d'isolation thermique.

Afin de mieux comprendre le comportement des bétons à hautes températures et de connaître les principales causes des phénomènes d'instabilité thermique, ces dernières années, de nombreuses recherches ont été entreprises et des projets nationaux (BHP2000) et Européens (HITECO) ont étudié les risques d'instabilité thermique des bétons à haute performance. Les résultats de toutes ces recherches ont mis en évidence que les principaux paramètres affectant le risque d'instabilité thermique sont : la faible perméabilité due à la faible porosité des BHP, la présence de l'eau au sein du béton, la vitesse de chauffage ainsi que la température maximale atteinte.

La prise en compte réglementaire des risques d'instabilité thermique des bétons à haute température repose essentiellement sur des approches expérimentales. Alors qu'aucun calcul ne peut prédire le risque d'instabilité thermique. Ce manque de prévision est dû à la méconnaissance, malgré de nombreuses études expérimentales et numériques, des phénomènes physiques qui sont à l'origine de l'instabilité thermique des bétons. Deux processus peuvent décrire l'apparition du

phénomène d'éclatement : le processus thermomécanique où les dilatations thermiques et le gradient thermique peuvent générer des contraintes de compression dans la face exposée au feu et le processus thermo-hydrique qui explique la génération de pressions de vapeur d'eau plus élevées que la résistance en traction du béton, ces pressions sont liées aux mouvements hydriques au sein du béton (liquide ou vapeur) durant le chauffage. L'une des plus efficaces solutions proposées, d'après plusieurs recherches, pour éviter les risques d'éclatement des BHP, est l'utilisation des fibres de polypropylène en raison de leur comportement de fusion autour de 170°C qui semble améliorer les propriétés de transfert hydrique au sein des bétons.

Le travail présenté dans le cadre de cette mémoire concerne une étude bibliographique qui s'intéresse à l'influence de la montée de la température sur les propriétés physico chimiques des bétons et surtout les BHP et les BFHP. En effet, ce mémoire contribue aux autres recherches déjà réalisées auparavant dans la littérature.

Ce document est scindé en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, on a présenté les notions générales du béton qui a pour but principal de décrire le béton comme milieu poreux dans son état sein. En présentant dans un premier temps un rappel de la microstructure du béton, de ses principales caractéristiques à la température ambiante et les différentes formes d'eau présente dans le béton.

Le chapitre deuxième est en premier analyse bibliographique sur les définitions des BHP et BFHP, ainsi leurs méthodes de formulation (constituants, destinations.....). Et en deuxième il porte la vue sur le comportement de la matrice cimentaire, des granulats et de l'interface matrice-granulas. Ensuite, une synthèse des différentes formes d'instabilité thermique, le mécanisme d'écaillage ou d'éclatement et les paramètres favorisant l'instabilité thermique.

Dans le troisième chapitre, nous présentons une étude comparative des différents travaux de recherche sur le béton soumis à une température élevée en se basant sur les propriétés physiques et chimique du béton chauffé (perte de masse, masse volumique, porosité, absorption, attaque chimique.....).

Enfin une conclusion générale permet de faire un bilan sur les apports des principaux résultats obtenus par différents chercheurs vis-à-vis des problématiques posées.

CHAPITRE I :

Généralités sur les

bétons

CHAPITRE I : Généralités sur les bétons

I-1- Introduction

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collés entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre (sable, gravier, cailloux), le liant qui est généralement un ciment portland, et l'eau. Ce dernier constituant joue double rôles : assure l'hydratation du ciment, et participe activement à l'ouvrabilité du béton frais, qui lui donne une rhéologie satisfaisante. Le liant fait prise et durcit pour n'obtenir finalement une résistance plus ou moins élevée qui dépend de la nature propre du liant [Chouiter Y., 2016].

I-2- Microstructure du béton

I-2-1- Description du béton

Le béton est constitué de trois composants essentiels : le ciment, les granulats et l'eau. Peuvent être ajoutés divers additions et adjuvants afin de modifier les caractéristiques du matériau à l'état frais ou à l'état durci [Haniche R., 2011]. Chaque constituant joue un rôle bien défini, celui de liant hydraulique pour la pâte de ciment, et celui de remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) et source de résistance pour les granulats [Haniche R., 2011].

Le changement des propriétés physico-chimiques et mécaniques des bétons qui s'opèrent au cours d'un cycle thermique nécessite la connaissance des phases qui constituent la pâte de ciment à température ambiante [Kanema T.M., 2007].

I-2-1-1- Le ciment hydraté

Le ciment généralement utilisé dans le génie civil est le ciment "Portland" (Selon le nom du brevet déposé en 1824 par Joseph Apsdin). Ce ciment est composé :

- **de clinker** : obtenu dans les fours à ciment après la cuisson à haute température (1450 °C) d'un mélange finement broyé de calcaire et d'argile,
- **de gypse ($\text{CaSO}_4, 2 \text{H}_2\text{O}$)** : ajouté au ciment afin d'éviter le phénomène de "fausse prise" grâce à la formation d'un écran momentané de cristaux d'ettringite,
- **d'ajouts éventuels** : afin de réduire les consommations d'énergie imputées à la fabrication du ciment, certains produits sont ajoutés afin de remplacer une partie du ciment. On peut citer les laitiers de haut fourneau, les cendres volantes, les pouzzolanes naturelles ou artificielles, les fillers calcaires, etc.

La composition minéralogique des principaux composants anhydres du ciment portland sont rassemblés dans le Tableau I.1 [Saadi I., 2017].

Tableau I.1. Principaux constituants d'un ciment ordinaire.

Désignation	Formule chimique exacte	Formule chimique simplifiée	Proportion dans un ciment ordinaire
Le silicate tricalcique (ou alite)	3CaO, SiO ₂	C ₃ S	60 à 65%
Le silicate bicalcique (ou bélite)	2CaO, SiO ₂	C ₂ S	20 à 25%
L'aluminate tricalcique (Oucélite)	3CaO, Al ₂ O ₃	C ₃ A	8 à 12%
L'alumino-ferrite tétracalcique	4CaO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	8 à 10%

Le ciment doit permettre au béton d'atteindre une classe de résistance donnée, tout en assurant une bonne maniabilité et une finition de qualité. Les performances des ciments commerciaux en termes de rhéologie et de résistance sont en effet très variables et seules quelques-uns possèdent simultanément de bonnes performances de résistances finales et de bonnes performances rhéologiques. Il existe des solutions qui permettent de pallier aux manques de performances des ciments commerciaux, (utilisation de superplastifiants réducteurs d'eau, additions minérales, etc.) [Aidoud A., 2018].

I-2-1-2- Granulats

Les granulats utilisés pour la fabrication du béton sont généralement d'origine naturelle. Ils proviennent essentiellement de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartzs et quartzites, ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites ou les porphyres.

Indépendamment de leur nature, les granulats peuvent être alluvionnaires (dits granulats roulés) ou de carrière (dits granulats concassés).

Des granulats artificiels peuvent être également utilisés : sous-produits industriels (laitier granulé de haut fourneau), granulats industriels (granulats réfractaires, allégés par expansion ou par frittage, etc.), granulats issus du recyclage des déchets de construction ou granulats très légers (billes de polystyrène, caoutchouc, fibres de bois, ...).

Dans les bétons courants, les granulats utilisés doivent avoir une bonne résistance mécanique et leur courbe granulométrique doit être optimisée afin de remplir le plus possible de vides dans le béton. C'est la raison pour laquelle on utilise plusieurs classes granulaires dans un même béton : depuis le sable (0 / 4 mm), en passant par les gravillons (4 / 32 mm) jusqu'aux graves (> 32 mm). En ce qui concerne les propriétés thermiques de l'agrégat, il faut remarquer qu'ils n'ont pas tous un bon comportement à haute température. En général on cherche des agrégats avec un faible coefficient d'expansion thermique. Dans le cas contraire, on peut générer des contraintes et donc des fissurations. De plus, les agrégats ont la capacité d'absorber de la chaleur, spécialement lorsque les agrégats en question sont sujets à des transformations endothermiques à haute température : par exemple, les agrégats d'origine calcaire absorbent, entre 700°C et 900°C, 1420

kJ/kg pour la décomposition du carbonate de magnésium et 1800 kJ/kg pour la décomposition du carbonate de calcium [Saadi I., 2017].

Les agrégats peuvent donc interagir avec le processus de chauffage en ralentissant l'élévation de température dans le béton [Saadi I., 2017].

I-2-1-3- Additions minérales

Le rôle d'un ajout cimentaire est d'améliorer les caractéristiques du matériau à l'état frais, pour faciliter sa mise en œuvre, ou à l'état durci pour augmenter sa résistance et sa durabilité. Parmi les principales additions on peut citer :

- **Filler calcaires** : Les fillers calcaires sont des produits secs, très fins, issus du broyage, du sciage, de la taille ou du travail de la roche calcaire naturelle. Ils permettent d'améliorer les propriétés du béton (meilleure pompabilité et résistance à la ségrégation, augmentation de la résistance en compression, réduction de la porosité, meilleure qualité de surface, ...).

- **Cendres volantes** : Ce sont des particules très fines récupérées par le système de dépoussiérage des centrales thermiques. L'utilisation des cendres volantes entraîne une réaction pouzzolanique entre la phase vitreuse des cendres et la portlandite (CH) produite par l'hydratation du ciment, ce qui conduit à la formation de gel de (CSH), et donc à l'augmentation de la résistance en compression surtout à long terme [Ladaoui W., 2010].

- **Fumée de silice** : C'est un sous-produit, composé essentiellement de silice, issu de la fabrication du silicium et de différents alliages de silicium. Ce sont des ultrafines de silice récupérées par dépoussiérage des fumées. La silice représente environ 90% de la composition chimique, les particules ont une forme sphérique de diamètre compris entre 0,1 μm et 2 μm . La dimension moyenne est 100 fois plus faible que celle des grains de ciment. La fumée de silice se caractérise par une extrême finesse 15000-25000 m^2/kg (déterminée par adsorption d'azote). D'après [Aidoud A., 2018] les principaux résultats des réactions pouzzolaniques de la fumée de silice sont : la plus faible libération de chaleur et le développement de résistance, la consommation de la chaux et une petite distribution de taille des pores. En outre, sa grande finesse procure un effet physique de remplissage. L'incorporation de la fumée de silice réduit le ressuage interne et externe. La combinaison des différents modes d'action de la fumée de silice dans le béton contribue à la formation d'une microstructure très dense.

I-2-1-4- Adjuvants

L'utilisation des adjuvants dans les bétons se fait généralement en faible quantité ne dépassant pas 5% de la masse du ciment. On les trouve sous forme de composés organiques aqueux formulés spécialement pour les applications béton. Les adjuvants ont pour rôle d'améliorer les propriétés du matériau à l'état frais (ouvrabilité) ou à l'état durci.

- **Plastifiants et superplastifiant** : Ils sont utilisés pour fluidifier un mélange ou pour réduire la quantité d'eau utilisée (jusqu'à 30% au moins dans le cas d'une bonne compatibilité entre l'adjuvant et le ciment).

- **Accélérateur / Retardateur de prise** : Les retardateurs de prise sont utilisés pour ralentir la vitesse de prise du matériau. Ils sont pratiques pour des transports de bétons frais sur de longues distances.

Les accélérateurs de prise ont un effet inverse de celui des retardateurs. Ils sont utilisés par temps froid ou en usine de préfabrication où il est parfois nécessaire d'accélérer la prise du béton pour procéder à un démoulage plus rapide.

- **Entraineurs d'air** : Le béton, une fois malaxé et mis en place, contient un certain volume d'air résiduel dont la fraction volumique est généralement de 2 à 5%. Le rôle d'un entraineur d'air est de créer un volume d'air occlus supplémentaire (sous forme de pores de petites tailles voisines les unes des autres), jusqu'à une fraction de l'ordre de 5%, avec pour objectif de rendre le matériau résistant à l'action du gel.

I-2-1-5- L'eau

L'eau est introduite afin de déclencher les réactions d'hydratation du ciment et de permettre une bonne maniabilité du béton frais. Elle peut provenir du réseau d'eau potable, d'un système de pompage, etc. L'impact chimique que peut avoir l'eau sur les critères de durabilité du béton (corrosion des armatures, tâches, chute des propriétés mécaniques) et sur le comportement au jeune âge (retard de prise, retrait, gonflement) impose de ne pas utiliser l'eau de mer ou de l'eau trop impure (chlorures, sulfates, sucres, phosphates, etc.).

L'eau va donc jouer un rôle essentiel dans le comportement de matériau durci non seulement du point de vue de son comportement mécanique mais aussi de la durabilité. Dans le béton presque la moitié de l'eau de gâchage est consommée par les réactions d'hydratation, environ 40% se trouve dans les pores des hydrates, 10% se loge dans les vides présents dans la matrice. L'état hydrique dépend essentiellement de l'humidité relative, du degré d'hydratation, donc de l'âge et du type et de la taille des pores [Hager I.G., 2004] d'après [Aidoud A., 2018].

D'autres composés peuvent être ajoutés au béton de base : fumée de silice, adjuvants (superplastifiant, retardateur ou accélérateur de prise, entraineur d'air), fibres (métalliques, polypropylène), etc. Ces produits sont nécessaires à la fabrication de bétons aux performances (à l'état frais et/ou durci) élevées.

I-2-2- Microstructure du béton durci

I-2-2-1- Microstructure de la pâte de ciment

La microstructure de la pâte de ciment durcie est constituée d'un solide poreux et de phases liquide et gazeuse présentes dans les pores. Elle est constituée de différents composés chimiques, tels que les différents C S H, la portlandite, qui sont obtenus par réactions entre l'eau et les constituants du ciment. Elle est composée aussi de pores à différentes échelles, connectés ou non, contenant de l'eau et de l'air. Pour un béton donné, les quantités de C-S-H et de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formées dépendent essentiellement du rapport E/C et du temps de réaction. En moyenne, une pâte de ciment durcie ordinaire contient 50-70% de CSH et 25-27% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Dans le cas des pâtes de ciment à haute performance, la quantité de phase CSH est encore plus importante, ce qui induit une augmentation de la résistance. La microstructure de la pâte de ciment est très compliquée à cause de sa finesse. Elle peut être caractérisée par la microscopie électronique à balayage MEB et la diffraction au rayon x. L'analyse de la microstructure se fait également indirectement, à partir de la porosimétrie au mercure ou des isothermes de sorption et de désorption.

D'après [Bouabdallah M.A., 2006] Ces constituants du ciment présentent des réactions hydrauliques, c'est-à-dire qu'ils se transforment en présence d'eau en hydrates qui se précipitent et s'organisent en une structure mécaniquement résistante. On appelle hydratation l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre l'eau et le ciment. La prise est un passage entre l'état de suspension à celui du solide. Les principaux hydrates simples formés sont les suivants : silicate de calcium hydraté CaO , SiO_2 , H_2O [CSH] (appelés aussi « gel » de CSH à cause de leur structure colloïdale), portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (ou hydroxyde de calcium qui se cristallise en plaquettes hexagonales), aluminates de calcium hydraté, ettringite ($3\text{CaO}\cdot\text{A}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$) etc. La réaction principale de l'hydratation du ciment peut être présentée de façon simplifiée :

C_3S silicate tricalcique



C_2S silicate bicalcique

Si on prend pour les CSH, un rapport molaire C/S=1,5 cette équation s'écrit :



Au cours du temps, les produits d'hydratation se forment en diminuant la porosité initiale et en créant un réseau poreux. Quelques heures après le gâchage, le matériau fait prise : il passe, de l'état de suspension à celui de solide. L'hydratation continue longtemps après la prise, ce qui permet le durcissement ; l'évolution des caractéristiques physiques et mécaniques, très rapide dans les heures qui suivent la prise, continue pendant plusieurs mois, mais de plus en plus lentement [Aidoud A., 2018].

La quantité de (CSH) est plus importante dans les bétons à haute performance (BHP) que dans un béton ordinaire (BO). Les quantités de (CSH) et de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dépendent essentiellement de la quantité de l'eau de gâchage [Haniche R., 2011].

D'après [Saadi I., 2017] Pour un ciment donné, les quantités de CSH et de Portlandite formés dépendent du rapport E/C et du temps de réaction. Dans une pâte de ciment ordinaire durcie, on trouve en moyenne, 50 à 70 % de CSH et 25 à 27 % de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Le CSH est l'hydrate qui participe le plus aux performances mécaniques. De par sa grande solubilité dans l'eau et sa faible participation à la résistance mécanique de la pâte de ciment durcie, on cherche à éliminer la Portlandite dans les bétons à hautes performances. Pour ceci, on peut par exemple incorporer de la fumée de silice (environ 10 % de la quantité de ciment) pour transformer la Portlandite en CSH selon la réaction pouzzolanique suivante :



Les observations microscopiques des particules de CSH ont permis de les classer en quatre types morphologiques (classification de [Diamond S., 1986]) citée par [Hager I.G., 2004] :

- ❖ **Type I** : ils se présentent en feuillets très minces qui s'enroulent sur eux-mêmes en formant des tubes creux rayonnant autour des grains de ciment ; cette forme est visible pendant les premiers âges de l'hydratation, et sont constitués de fibres de 2 μm au plus.
- ❖ **Type II** : ils se présentent sous forme alvéolaire (nids d'abeilles)
- ❖ **Type III** : il apparaît sous une forme de petits disques ou de sphères assemblées pour former des particules plus massives d'environ 300 nm. On les observe majoritairement à long terme.
- ❖ **Type IV** : structure dense et amorphe moins remarquable que les précédentes, et que l'on observe en général sur des pâtes de ciment vieilles.

Les CSH de type I et II cristallisent au début de la prise, dans l'espace disponible entre les grains anhydres. Les types III et IV sont les hydrates tardifs (appelés les hydrates internes) qui peuvent occuper la place des grains anhydres d'origine. Les différentes formes du gel CSH sont présentes sur la **Figure I.1**

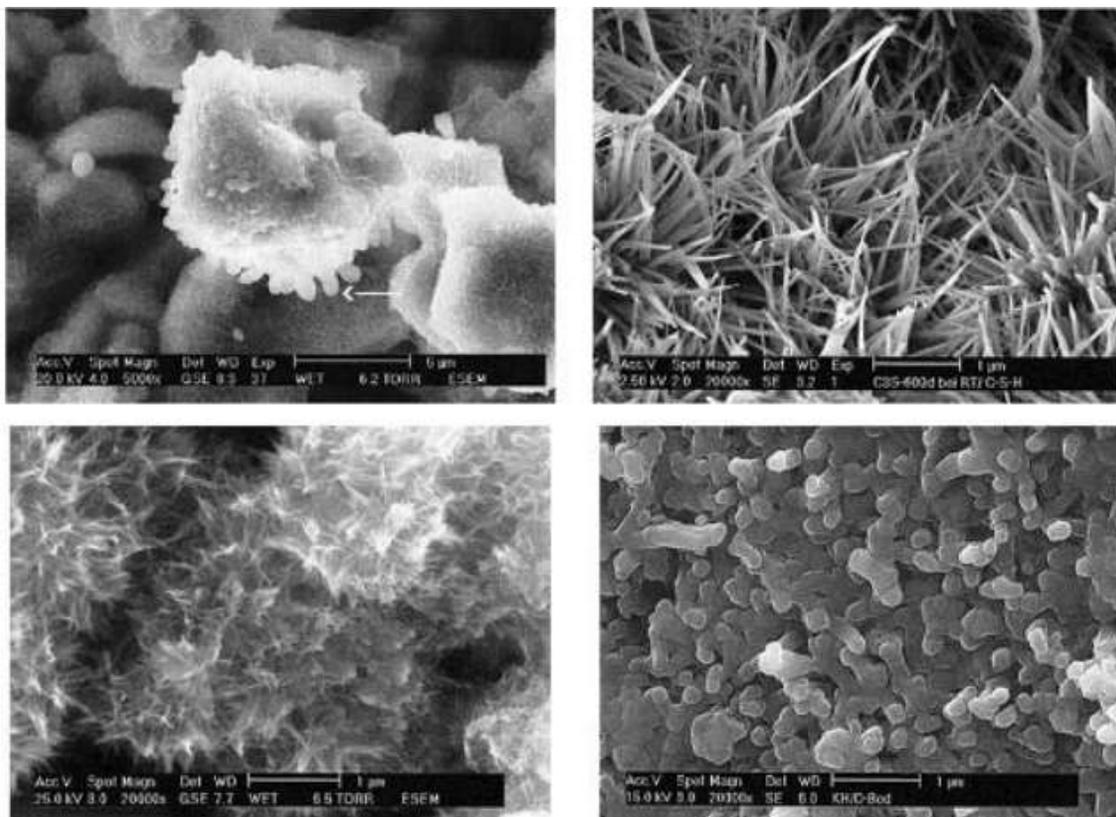


Figure I.1. La diversité des formes du gel CSH [Aidoud A., 2018]

I-2-2-2- Interface pâte-granulat

L'interface pâte-granulat est considérée comme l'interface la plus importante dans le béton. Lors de l'hydratation du ciment, une liaison s'établit entre la pâte de ciment et les granulats qu'elle enrobe. Elle dépend de la nature des deux phases en présence, de la teneur en ciment de la pâte de ciment et des conditions de conservation. On observe ainsi autour des granulats une zone de pâte hydratée particulière appelée auréole de transition ou zone de transition interfaciale notée ITZ (Interfacial Transition Zone). Cette ITZ présente un rapport E/C plus élevé

que le reste de la pâte, ce qui rend sa porosité plus élevée que celle de la pâte [Diamond S., 2001]. Du point de vue mécanique, l'ITZ présente une résistance plus faible que la pâte de ciment elle-même. Les pores, plus grossiers dans cette zone, deviennent un réseau de cheminement privilégié pour les fluides dans la masse. L'épaisseur de l'ITZ augmente avec le diamètre du granulat et avec la quantité d'eau d'hydratation (i.e. avec le rapport E/C), elle est de l'ordre de 30 μm [Diamond S. et al., 1990]. La quantification de la porosité dans l'ITZ a été exécutée au moyen de deux techniques principales : observation par techniques d'imagerie et porosimétrie à mercure [Ollivier J.P. et al., 1995]. La nature et la porosité des granulats peuvent influencer l'auréole de transition. Dans le cas des granulats très poreux, l'ITZ se caractérise par une première couche en contact, intimement liée aux granulats par des liaisons de type physique et peut-être de type chimique suite à une dissolution superficielle du granulat (à l'exception des matériaux micacés avec lesquels aucune liaison ne s'établit) [Ollivier J.P. et al., 1995], et une deuxième couche caractérisée par une porosité plus grande, des produits d'hydratation mieux cristallisés et orientés, moins de grains de ciment anhydre [Baroghel-Bouny V., 1994].

Ainsi d'après [Aidoud A., 2018] la zone de transition entre les granulats calcaires et la pâte de ciment est plus résistante et de perméabilité plus faible [Kanema T.M., 2007]. L'augmentation de la résistance du matériau béton réalisée avec les granulats de cette nature a été observée [Hager I.G., 2004]. A l'opposé, les granulats de type siliceux sont neutres vis-à-vis de la pâte de ciment et l'interface qu'il forme avec la pâte présente une résistance mécanique plus faible et une perméabilité aux gaz plus accrue. Il est à souligner également que la forme des granulats joue un rôle très important car on observe des liaisons plus rigides, au niveau de l'auréole de transition, pour des granulats concassés que pour des granulats roulés [Kanema T.M., 2007].

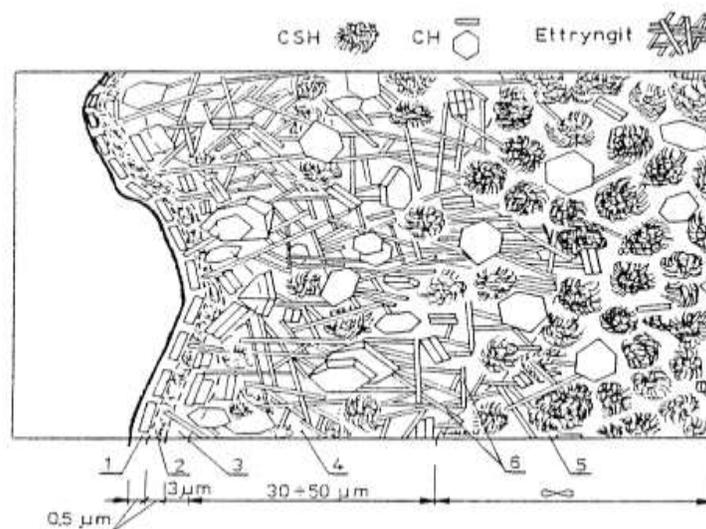
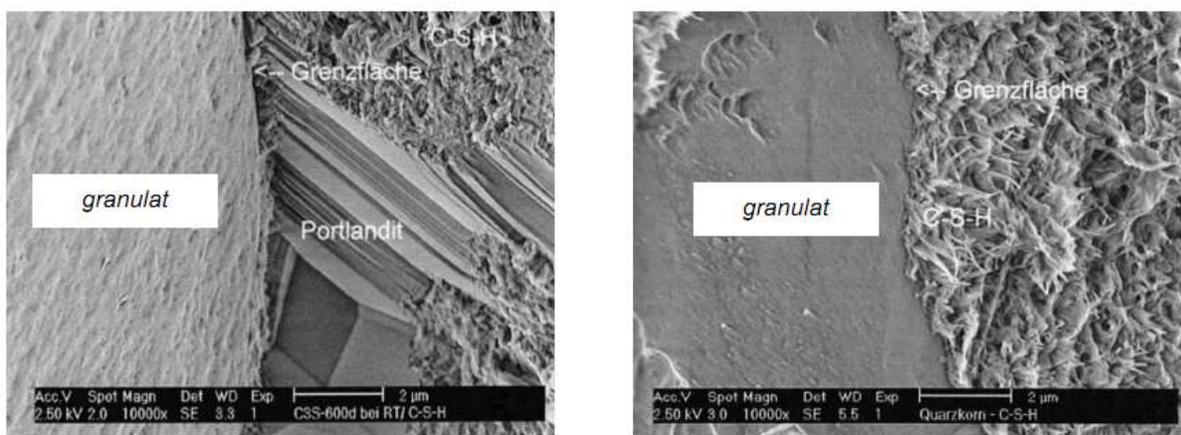


Figure I.2. Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un BO : 1- couche continue de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 2 - couche de CSH, 3 - couche de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 4 - zone poreuse, 5 - pâte du ciment hors de l'auréole de transition, 6 - ettringite, [Diamond S., 1986] source [Aidoud A., 2018]

D'après [Aidoud A., 2018] pour les bétons à haute performance, modifiés par l'ajout de fumée de silice, on a une réduction de la porosité et de l'épaisseur de cette zone (**figure I.3**). En comparant avec le (BO), où l'auréole de transition est d'environ 50 µm, son épaisseur pour les (BHP) est limitée à 12 µm. Certaines sources [Hager I.G, 2004], signalent absence de la zone de contact dans les bétons à haute performance (figure I.4) où l'ajout de la fumée de silice permet la consommation de la portlandite, en densifiant la structure du matériau, tout en améliorant ses performances mécaniques [Hager I.G, 2004] en réduisant considérablement la porosité et en améliorant la liaison entre la pâte et les granulats [Kanema T.M., 2007].



(a) béton sans fumée de silice

(b) béton avec fumée de silice

Figure I.3. Microstructure de la zone de contact entre la pâte et le granulat [Hager I.G., 2004] source [Aidoud A., 2018].

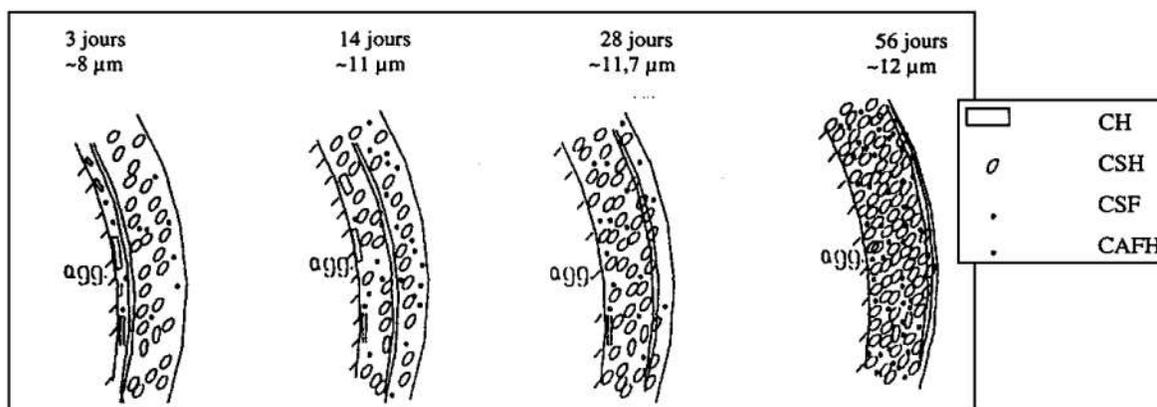


Figure I.4. Evolution de la zone de transition dans un BHP ($e/c=0,23$ et $e/c=0,15$) pendant l'hydratation [Kanema T.M., 2007] source [Aidoud A., 2018].

I-2-3- L'eau dans le béton durci

Dans un béton durci, l'eau peut se présenter sous formes d'eau libre, capillaire, adsorbée, chimiquement liée et absorbée par les granulats. L'eau remplit plus ou moins d'eau tous les vides

de la matrice et son mouvement est responsable de l'apparition de phénomènes comme : retraits de dessiccation, gonflement, fissuration du béton, etc... L'eau va donc jouer un rôle essentiel dans le comportement de matériau durci, non seulement du point de vue de son comportement mécanique, mais aussi de la durabilité [Toumi B., 2010].

Dans le béton, presque 50% de l'eau de gâchage est consommée par les réactions d'hydratation, environ 40% se trouvent dans les pores des hydrates et 10% se logent dans les vides présents dans la matrice. L'état hydrique dépend essentiellement de l'humidité relative, du degré d'hydratation et de la taille des pores [Toumi B., 2010].

I-2-3-1- Classification de l'eau

D'après [Aidoud A., 2018]

a) L'eau libre et capillaire

L'eau soustraite des forces d'attraction superficielle à la surface des solides est appelée eau capillaire ou libre et obéit aux lois de la capillarité. Elle se situe généralement dans les pores de dimension supérieure à 10 μm , où la phase liquide est séparée de la phase gazeuse par un ménisque. [Khoury G.A. et al. 1985] démontre que pour une vitesse de montée en température fixée à 1°C/min, seulement 3 % d'eau s'évapore à 100°C, alors qu'elle augmente à 9 % lorsque cette vitesse est réduite à 0,2°C/min. Ainsi on observe que la vitesse de chauffage joue un rôle important dans le phénomène de dessiccation du béton. Cette eau fortement ionisée par rapport aux autres éléments présents dans le béton est la première à migrer et à s'éliminer [Baroghel-Bouny V., 1994], [Kanema T.M., 2007], [Hager I.G., 2004].

b) L'eau adsorbée

L'eau est dite absorbée lorsqu'il apparaît des forces intermoléculaires ou des forces électrostatiques entre la molécule d'eau et la surface solide. Elle est dite physique ou chimique suivant le type de liaison qu'elle entretient avec la particule solide [Kanema T.M., 2007].

Eau adsorbée physiquement :

L'eau adsorbée physiquement est le résultat de l'apparition d'une liaison de type Van de Waals entre les granulats, les grains de ciments et l'eau, suite à la condensation de la vapeur d'eau présente dans le matériau [Oberholster R.E., 1986]. L'apparition de cette liaison ne modifie pas la structure de la molécule d'eau d'où le terme d'absorption physique. Cette eau s'empile sur la surface solide sous forme de couches successives, de moins en moins ordonnées, du fait de la décroissance de l'énergie de liaison au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface des éléments solides [Baroghel-Bouny V., 1994]. Le nombre de couches adsorbées n'excède pas cinq et dépend du taux d'humidité relative présent dans les pores capillaires. Dès l'augmentation de la température, les liaisons se détruisent et les molécules d'eau se libèrent [Kanema T.M., 2007].

Le diamètre d'une molécule d'eau étant d'environ 2,6 Å, il faudrait que l'espace inter – lamellaire soit de 26 Å pour que l'adsorption physique se déroule de manière libre. Cette espace n'étant en réalité de 17 Å, l'eau ne peut être adsorbée librement. Cette région est appelée zone d'adsorption empêchée. L'eau y est présente sous une forte pression, de l'ordre de 130 MPa [Bazant Z.P. &

Najjar L.J., 1972], dite de disjonction. Cette pression s'oppose aux forces d'attraction qui s'exerce entre particules solides des (CSH) et qui permettent le maintien de la structure du squelette solide. Cette eau est ainsi un élément structurel à part entière du matériau, capable de transmettre localement les contraintes [Kanema T.M., 2007].

Eau adsorbée chimiquement :

Elle est constituée de l'eau hydroxylique, faisant partie de la structure des hydrates et de l'eau contenue dans les nano pores du gel [Haniche R., 2011]. L'eau est adsorbée chimiquement lorsqu'elle est combinée à d'autres composants dans les hydrates. [Baroghel-Bouny V., 1994]. Sa structure s'en trouve alors modifiée par la dissociation de la liaison covalente (O-H). Contrairement à l'eau adsorbée physiquement, l'adsorption chimique s'effectue uniquement sur des sites privilégiés (par exemple sur les défauts cristallins) et sur une couche de molécule d'eau [Kanema T.M., 2007].

c) Eau de constitution

L'eau de constitution représente l'eau qui a chimiquement réagi avec les éléments anhydres du ciment pour former de nouveaux éléments, tels que le silicate de calcium hydraté et la Portlandite. C'est une eau entièrement intégrée à la structure solide des hydrates. D'après les études menées sur la structure des (CSH), [Sierra R., 1982] identifie trois grandes classes d'eau dans les (CSH), et les présente suivant l'ordre décroissant des énergies de liaisons. Ainsi nous retrouvons l'eau hydroxylique, l'eau inter - feuillet et l'eau inter – lamellaire [Kanema T.M., 2007].

L'eau hydroxylique est liée à des atomes de silice ou de calcium présents sur la surface interne et externe des feuillets par une association d'un groupement hydroxyle. Cette eau est parfois appelée eau chimiquement liée [Kanema T.M., 2007].

L'eau inter – lamellaire est l'eau contenue dans les micropores, liée à la surface externe des feuillets ou à des molécules d'eau par des ponts hydrogènes. Cette eau est structurelle car elle est liée à des groupements hydroxyliques ou à d'autres molécules d'eau [Kanema T.M., 2007].

L'eau inter - feuillet se situe dans l'espace interfolière et possède un très faible degré de liberté. Ces molécules d'eau interfolières sont liées triplement par des ponts hydrogènes comme dans la structure de la glace et interviennent directement dans la cohésion intrinsèque de la lamelle. D'après [Diamond S., 1986] seul un puissant séchage permet d'extraire ces molécules d'eau et ceci de manière irréversible [Kanema T.M., 2007].

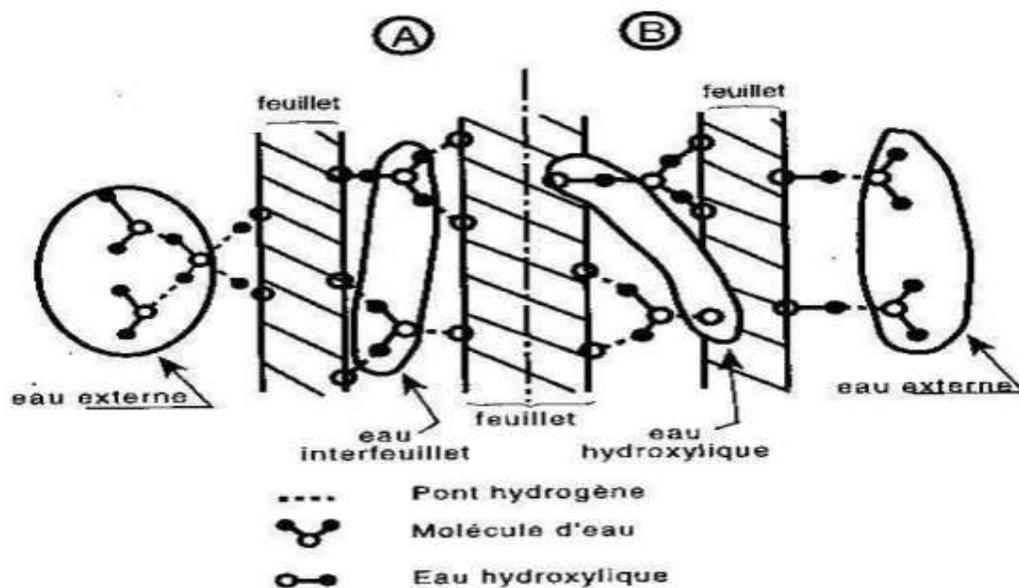


Figure I.5. Illustration de la répartition de l'eau adsorbée à la surface des (CSH). A et B sont deux exemples possibles [Aidoud A., 2018].

Il faut cependant noter que cette distinction de l'eau en catégories n'est pas très bien définie et même parfois purement fictive. [Brouwers H.J., 2004] quant à lui, fait une distinction entre eau évaporable (dite : « libre ») et eau non - évaporable (dite : « liée »). Eau non - évaporable étant l'eau qui reste dans le matériau après un séchage suivant la méthode de D-drying (évaporation sous vide à très basse température -79°C). L'eau évaporable provient pour une part, des pores capillaires et d'autre part, des pores du gel. De même, il est courant de distinguer deux types d'eau sur des courbes d'analyses thermiques en considérant une température seuil autour de 100°C [Castellote M. et al., 2004]. La perte d'eau en dessous de cette température correspond à l'évaporation d'eau libre, alors que la perte d'eau entre 100°C et 200°C correspond à l'eau liée des (CSH). Toutefois, certains produits hydratés telle que l'ettringite perdent la majorité de leur eau structurale dès 80°C [Kanema T.M., 2007], D'après [Aidoud A., 2018].

I-2-3-2- Interaction eau-milieu poreux

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, 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).

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.

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. La figure ci-après illustre la relation entre le rayon des pores remplis d'eau liquide à 20°C et l'humidité relative de l'air.

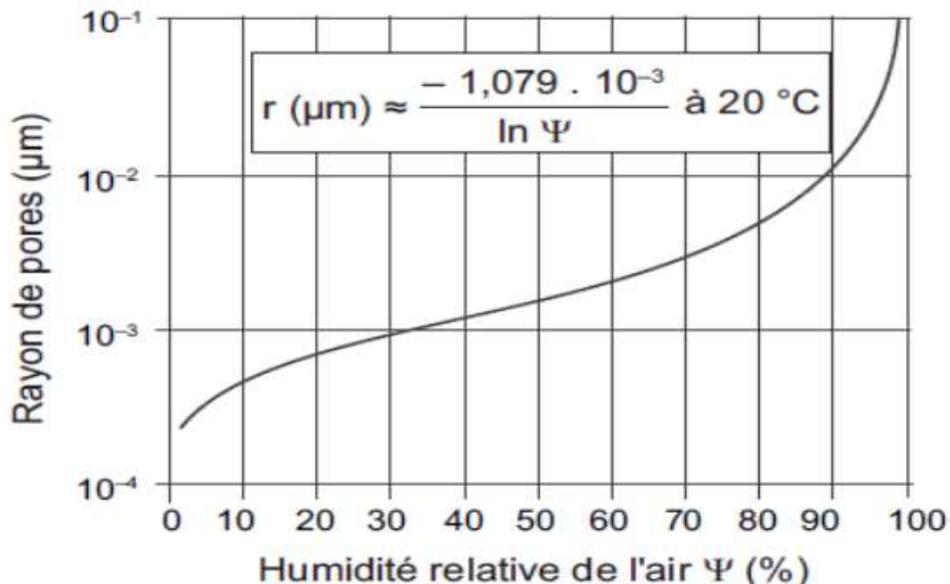


Figure I.6. Rayon des pores remplis d'eau à 20°C en fonction de l'humidité relative de l'air.

La géométrie des pores influence sur les propriétés de transfert d'humidité dans le réseau poreux des matériaux cimentaires. L'exemple de l'effet « bouteille d'encre » illustre l'importance de la géométrie de la porosité sur les capacités d'absorption et de rétention des liquides du matériau poreux et composite qu'est le béton. La figure I.7 met en évidence l'importance des tailles des seuils d'accès aux pores et de leur répartition qui peut induire un effet de piégeage du liquide.

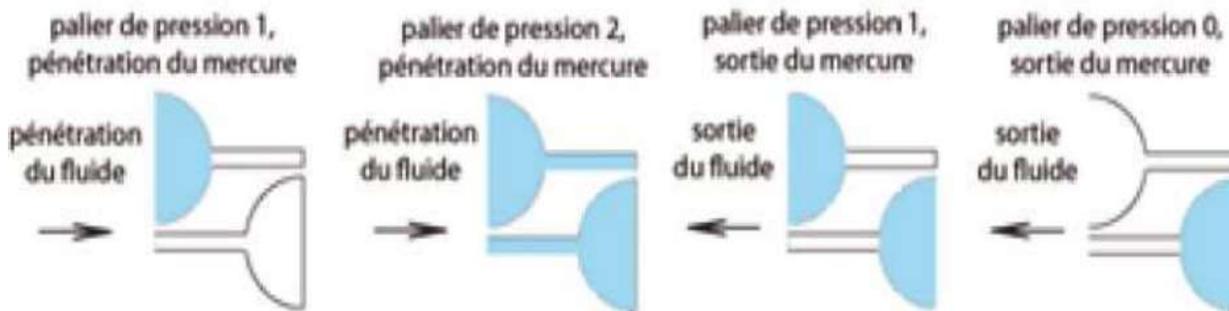


Figure I.7. Illustration des seuils d'accès et de « l'effet bouteille d'encre » avec un fluide non mouillant.

La capacité d'un réseau poreux à piéger un fluide peut être évaluée à l'aide d'un liquide non-mouillant, puisque celui-ci ne pourra pas, au vu de ses propriétés, ressortir du matériau.

I-2-4- Propriétés physico-chimiques du béton durci

I-2-4-1- Propriétés physiques

I-2-4-1-1-Absorption

Un certain recul scientifique est nécessaire à la compréhension de l'absorption capillaire. La distribution des molécules d'eau est régie par des forces dites de cohésion et d'adhésion. Les forces de cohésion sont déterminées par le frottement entre les molécules d'un même liquide, alors que les forces d'adhésion sont celle générées entre les molécules de deux milieux distincts. Si les forces d'adhésion entre un liquide et une surface solide sont supérieures aux forces de cohésion du liquide, ce dernier s'étendra jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint [Conciatori D., 2005]. Ce phénomène, appelé tension de surface, est responsable de la montée d'eau dans les tubes capillaires, tel que présenté sur le schéma de la figure I.8.

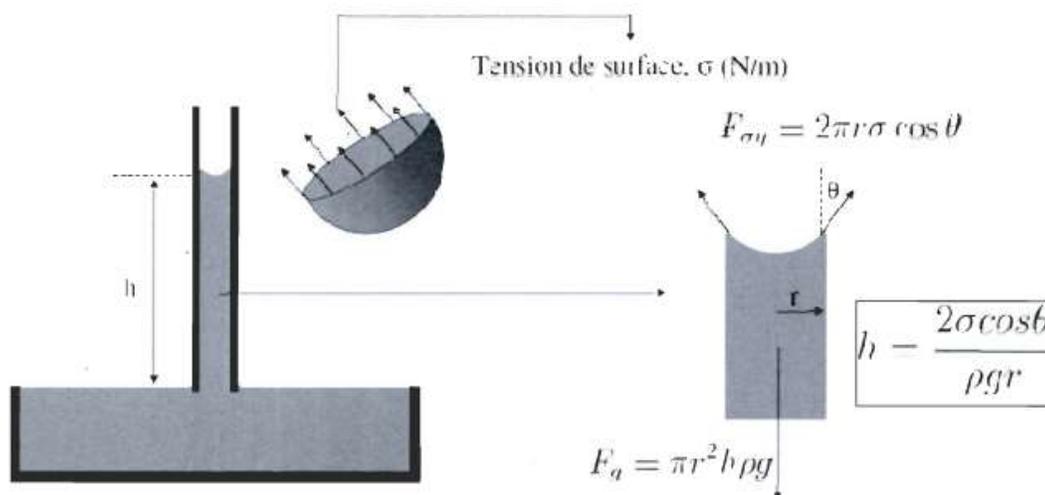


Figure 1.8. Montée capillaire (tiré de Samson (2008))

Le même phénomène se produit dans les pores du béton, mais étant donné que la porosité est complexe et évolutive, il est difficile de modéliser avec précision les mouvements capillaires d'eau dans les matrices cimentaires. [Fagerlund G., 1993] explique que l'absorption d'eau par un béton suit deux étapes distinctes. Premièrement, l'eau remplit les vides capillaires ayant un diamètre inférieur à environ 0,10 micromètres. Le liquide est absorbé sous l'effet des ménisques qui résultent des tensions interfaciales gaz/liquide/solide. Suite à cette étape, seule la porosité grossière demeure insaturée. Cette dernière est constituée des bulles d'air entraîné, des fissures et des vides de compaction. Il est toutefois impossible pour l'eau d'atteindre ces vides par capillarité. En effet, comme le rayon des pores s'agrandit, les ménisques ne peuvent exercer la pression nécessaire pour pénétrer les macropores. Ainsi, pour que le béton continue d'absorber l'eau, on doit passer à la deuxième étape qui consiste en un processus diffusionnel, par lequel l'air contenu dans les macropores se dissout dans l'eau interstitielle pour diffuser vers les endroits où la pression est plus faible, soit à l'extérieur de la matrice ou dans les pores de dimension supérieure. L'eau remplit

donc lentement l'espace laissé par l'air. [Fagerlund G.,1993] rapporte que plus le rayon des pores est grand, plus le processus est lent. La figure I.9 montre clairement les deux étapes décrites précédemment.

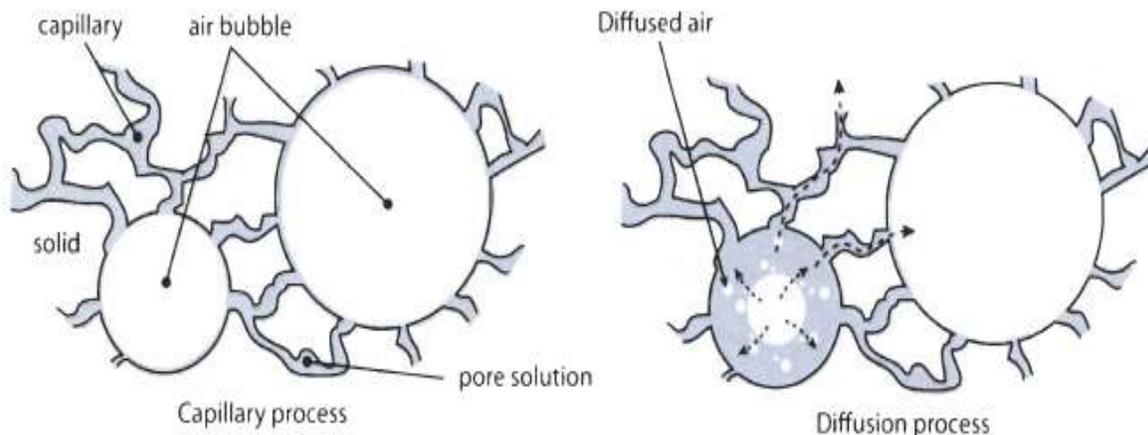


Figure I.9. Mécanismes d'absorption d'eau par un béton

I-2-4-1-2- Porosité

La phase poreuse du béton peut être séparée en quatre types de vides : les pores de gel, les pores capillaires, les bulles d'air entraîné et les vides de compaction.

Les pores de gel sont ceux ayant la plus petite taille avec un diamètre de l'ordre de quelques nanomètres. Ils correspondent aux interstices laissés entre les feuillettes, et aux espaces vides laissés entre les particules et autres formes solides. Les pores de gel forment toujours un réseau de vides interconnectés. De plus, la porosité du gel est fixe et égale à environ 28%, soit un peu moins du tiers du volume total du gel. Cette valeur est indépendante du rapport E/L et des conditions d'hydratation.

À une échelle supérieure, les vides capillaires représentent le volume de la pâte occupé initialement par l'eau de gâchage, et qui n'est pas rempli par les hydrates. Ces pores ont des formes variables, et [Neville A.M., 2000] rapporte que leur diamètre médian est d'environ 1,3 μm . Ils forment au départ (début de l'hydratation) un système de vides interconnectés distribués aléatoirement dans la pâte. Ce système de pores capillaires est le principal responsable de la perméabilité dans la pâte durcie, et de sa vulnérabilité au gel-dégel [Neville A.M., 2000]. Dans les pâtes denses où l'hydratation est suffisamment avancée, le système de pores capillaires est bloqué de sorte que l'interconnectivité ne subsiste qu'entre les vides du gel. Pour avoir cette condition, la pâte doit avoir un rapport E/L assez faible et la période de cure doit être assez longue et adéquate [Neville A.M., 2000].

Les bulles d'air entraîné sont créées par l'ajout au mélange d'un adjuvant entraîneur d'air, qui a également pour rôle de stabiliser le réseau de vides sphériques ayant un diamètre compris entre 1 μm et 200 μm .

Enfin, les vides de compaction sont engendrés par une mise en place inadéquate, une mauvaise consolidation du matériau, ou une formulation inadéquate. Leur forme est donc indéfinie et leur taille peut être de l'ordre du centimètre [Bolduc L.S., 2009].

Le réseau poreux du béton est plus ou moins continu. Cette porosité est divisée en deux types en fonction de sa position par rapport au milieu extérieur (Tableau et Figure ci-dessous), **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 ρ_o :

Tableau I.2. Définition des différents types de porosité d'un matériau.

Porosité	Définition
totale	Ensemble des vides fermés et ouvertes
Résiduelle	Ensemble des vides fermés
Accessible	Ensemble des vides ouvertes
Libre	Partie de la porosité accessible où les fluides librement circuler
Piégée	Partie de la porosité accessible ne permettant pas la récupération des fluides
Primaire	Ensemble des vides présentes dès la mise en place du matériau (air occlus)
Secondaire	Ensemble des vides fermés après la mise en place du matériau

Les vides fermés n'interviennent pas dans les propriétés de transfert, contrairement aux vides ouvertes. La porosité primaire se forme au moment de la mise en place de la pâte, ce sont des vides quasi-sphériques dus à l'air occlus, c'est-à-dire l'air entrant dans la pâte au moment du malaxage. La porosité secondaire se forme lors de la déshydratation du matériau, avec l'évaporation de l'eau interstitielle et l'apparition de fissures.

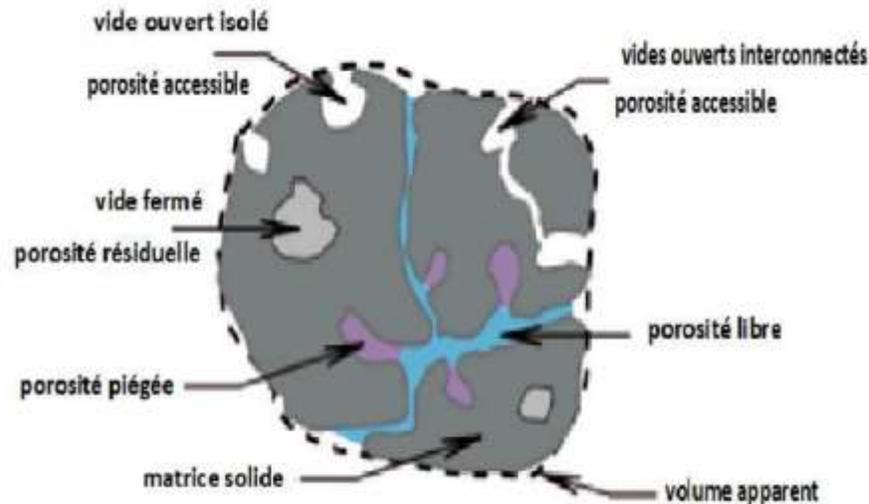


Figure I.10. Différents types de porosité d'un matériau poreux d'après J.P. Ollivier

I-2-4-1-3- Masse Volumique

La masse volumique est une grandeur physique, notée ρ ou encore μ . ρ est toutefois la notation la plus utilisée. Il s'agit du rapport de la masse du matériau béton par unité de volume. La masse du matériau est exprimée "m" et le volume "v".

La masse volumique se compte généralement en kg.m^3 quand il s'agit de béton, mais son unité peut tout à fait varier. Aussi, on peut estimer une masse volumique en g/cm^3 , kg / L ... La valeur reste cependant la même quelle que soit l'unité.

A. Masse volumique en fonction du type de béton

Il faut noter que la masse volumique du béton n'est pas une grandeur stable. Celle-ci varie en fonction de sa masse (ou poids), qui peut elle-même varier considérablement. Ainsi, la formulation du béton (donc son dosage en sable, ciment, eau...) impacte énormément sur sa masse volumique :

- Masse volumique des granulats : environ $1\,500 \text{ kg/m}^3$ (dépendamment de leur nature),
- Masse volumique du sable : environ $1\,600 \text{ kg/m}^3$,
- Masse volumique du ciment : environ $1\,100 \text{ kg/m}^3$ (1 m^3 de ciment en poudre est environ égal à $1\,800 \text{ kg}$).

Bien évidemment, le béton ordinaire n'est pas le seul du marché. Le tableau I-3 montre les principaux types de béton ainsi que de leur masse volumique moyenne.

Tableau I.3. les principaux types de béton ainsi que de leur masse volumique moyenne

Type de béton	Caractéristiques du béton	Masse volumique moyenne
Béton léger	Les graviers du béton sont ici remplacés par des billes de polystyrène ou encore de schiste expansé. Ces granulats ont un diamètre et un poids inférieur aux graviers du béton traditionnel. Ainsi, leur masse volumique est fortement réduite, (jusqu'à 10 fois moins importante), et celle du béton en lui-même également. Le béton léger est principalement utilisé en rénovation, pour l'isolation d'un bâtiment ou le coulage de fondations ou de chapes	Entre 300 et 1 800 kg / m-3
Béton cellulaire	Disponible en blocs, le béton cellulaire est un isolant remarquable, utilisé en construction. Sa composition comporte de la pâte (ou poudre) d'aluminium ainsi que de nombreux trous d'air. Sa masse volumique est donc inférieure au béton traditionnel	Entre 300 et 650 kg / m-3
Béton traditionnel	Sa masse volumique est susceptible de varier selon formulation. Les granulats utilisés sont à granulométrie variable, et certains bétons traditionnels sont davantage dosés en ciment.	2 200 kg / m-3
Béton bitumineux	Ce béton intègre une ou plusieurs couches de liant hydrocarboné (typiquement du goudron ou bitume)	2 350 kg / m-3
Béton armé	Le béton armé est renforcé au moyen de fibres métalliques à forte masse volumique. Ainsi, sa masse volumique totale est supérieure à celle du béton ordinaire.	3 000 kg / m-3

B. Les différents types de masses volumiques :

On a vu que le béton selon sa composition, dispose d'une masse volumique variable. Mais ce n'est pas tout. Le béton n'est pas un matériau homogène, en cela qu'il est constitué de grains de sable et de graviers ainsi que de minuscules interstices d'air. Ainsi, pour le même béton, on distingue généralement la masse volumique apparente et la masse volumique réelle.

La première est le rapport de la masse sur le volume apparent (constaté à l'œil nu, vides entre particules inclus). La deuxième décrit la masse volumique par rapport au volume réel des grains (les vides sont exclus, on fait la somme des volumes élémentaires des particules).

Par exemple pour les granulats, il faut préciser si la masse volumique dont on parle est celle du granulat (ensemble de grains y compris les vides entre eux), ou du grain constituant ce granulat (y compris leurs pores si celui-ci est plus ou moins poreux), ou de la matière pleine (sans aucun pores). On distinguera donc la **masse volumique apparente**, la **masse volumique réelle** et la **masse volumique absolue**.

- **La masse volumique apparente** :(encore appelée masse volumique en vrac) est le rapport entre la masse de matériau et le volume apparent de l'ensemble des grains (volume qui comprend

la porosité inter et intra-granulaire). La masse volumique apparente est la plus fréquemment utilisée pour qualifier la densité du béton et de ses constituants.

- **La masse volumique absolue** : (encore appelée masse spécifique) est le rapport entre la masse du matériau et le volume de matière pleine sans aucun vide entre dans les grains (volume absolu de la matière).

- **La masse volumique réelle** : La masse volumique réelle étant le rapport entre la masse du matériau et le volume réel des grains (somme des volumes de chaque grain y compris leur pores internes).

C. La masse volumique des constituants du béton

La masse volumique du béton est directement liée à la masse volumique des matériaux qui le compose : ciment, sable, gravillon, eau, et autres ajouts (adjuvants, colorants, fibres, ...).

La variation des masses volumiques **apparentes** des constituants du béton est :

- **Le ciment** : masse volumique du ciment est de 900 à 1200 kg/m³ en fonction du type de ciment.
- **Le sable** : la masse volumique du sable sec non compacté est de l'ordre de 1600 kg/m³.
- **Les gravillons** : la masse volumique d'un gravillon sec non compacté est de 1500 kg/m³.
- **L'eau** : la masse volumique de l'eau est de 1000 kg/m³.
- **Les adjuvants** : masse volumique de 900 à 1300 kg/m³.
- **Les colorants** : masse volumique apparente de 300 à 1200 kg/m³.
- **Les fibres métalliques** (en acier) : masse volumique de 7800 kg/m³ [URL].

I-2-4-1-4- Perméabilité

La perméabilité est définie comme la capacité d'un milieu poreux à être traversé par des fluides sous gradient de pression. La perméabilité est indépendante des propriétés du fluide saturant contrairement à la conductivité hydraulique. La perméabilité du béton est fortement influencée par les paramètres du milieu poreux comme la porosité, la tortuosité et la connectivité [Dana E., 1999 ; Dullien F.A.L., 1992]. En effet, plus la porosité augmente ou est connectée, plus la résistance au flux est faible ; moins la tortuosité est prononcée et plus la perméabilité est grande. La perméabilité d'un béton dépend également fortement de ses constituants, la nature des granulats, du sable, des additifs etc.

I-2-4-2- Propriétés chimiques

La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques mécaniques pour le matériau béton. Cette propriété est définie (dans un cadre très général) par la capacité du matériau à maintenir ses caractéristiques physiques et performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de services existantes et de l'environnement dans lequel il évolue. Le paramètre régissant la durabilité est bien entendu la perméabilité. Plus cette dernière est réduite et mieux sa durabilité en sera augmentée.

Pour évaluer la durabilité « potentielle » d'un béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation, et la résistance du matériau vis-à-vis de ces dégradations.

Les principaux processus chimiques à la base des dégradations du béton, pour la majorité des attaques chimiques, sont généralement regroupés en trois catégories :

- A- L'hydrolyse ou la lixiviation (dissolution) des hydrates.
- B- Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif.
- C- La formation de produits expansifs à l'intérieur du béton.

I-2-4-2-1- Attaque par les acides

I-2-4-2-1-1- Définition

Les attaques acides se font principalement suivant un mécanisme de dissolution. Suivant le cas, le phénomène de dissolution peut être accompagné de la précipitation du sel formé lors de la réaction base + acide si le sel est peu soluble. Ce sel peut avoir un effet colmatant et ralentir les réactions de dissolution.

Le produit final de dégradation par un acide peut-être un gel de silice résultant de la décalcification totale des C-S-H qui, selon [Grube H. & Rechenberg W.,1989] peut avoir un rôle protecteur à la surface du béton et ralentir les réactions. Ces auteurs insistent également sur le fait que les conditions de transport de l'agent agressif sont plus importantes que sa concentration.



Figure I.11. La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage.
[Boualleg S., 2004]

I-2-4-2-1-2- Les différents types des acides

• Les pluies acides (cas extrême des eaux douces) :

Les pluies dites « propres » ont généralement un pH compris entre 5,6 et 7. Elles n'ont pas d'effets nocifs sur le béton réalisé suivant les règles de l'art. Par contre, les pluies dites « acides », dont le pH peut descendre jusqu'à 4 et parfois moins, sont agressives. L'occurrence de ce type de pluies est en relation principalement avec la pollution par les oxydes de soufre SO_x d'origine industrielle ou domestique (combustion des charbons, fiouls, carburants) qui représentent environ un tiers de

tous les oxydes de soufre de l'atmosphère. Le résultat est la formation d'acide sulfurique très hygroscopique qui se condense rapidement en gouttelettes susceptibles de contenir des métaux lourds (mercure, plomb, argent, cadmium) et des sulfates (d'ammonium, de sodium). Les oxydes d'azote NOx également présents se transforment en acide nitrique. La composition et le pH des pluies peuvent varier en fonction de la saison et des conditions locales.

Les pluies acides peuvent provoquer des dégradations superficielles suivant des processus plus ou moins complexes faisant entrer en jeu des phénomènes de dissolution dus aux acides (sulfurique, nitrique, carbonique) et d'expansion dus à la cristallisation de sels, tels que le gypse (salissures des façades) ou l'ettringite.

• Les acides minéraux :

Les acides chlorhydrique et nitrique, acides minéraux forts qui par réaction avec la chaux du ciment donnent naissance respectivement, au chlorure de calcium CaCl_2 et au nitrate de calcium $(\text{NO}_3)_2\text{Ca}$, sels très solubles, sont très agressifs vis-à-vis des ciments Portland.

L'acide sulfurique H_2SO_4 , formé, par exemple, lors de l'oxydation de l'hydrogène sulfuré produit dans les réseaux d'assainissement ou par condensation à partir du SO_2 atmosphérique, est doublement agressif par son acidité et par l'anion SO_4^{2-} qui peut conduire à la formation de sels expansifs tels que le gypse et l'ettringite.

L'acide phosphorique H_3PO_4 , qui entraîne la précipitation de phosphates de calcium très peu solubles, est modérément agressif, mais provoque une désintégration lente du béton.

• Les acides organiques :

On les rencontre fréquemment dans les effluents rejetés par les industries chimiques (fabriques d'engrais, papeteries, teintureries, tanneries...) et agroalimentaires (vinaigreries, laiteries, fromageries, distilleries, conserveries, élevages...).

Ils sont généralement moins agressifs que les acides minéraux. Ils peuvent dans certains cas avoir un effet colmatant sur le béton : c'est le cas par exemple, de l'acide tartrique (cuves à vin) ou de l'acide oxalique. Les acides organiques tels que les acides acétique, lactique, butyrique, formique, contenus dans certaines eaux usées, attaquent les constituants calciques du ciment.

Ces acides faibles, peu dissociés, sont généralement modérément agressifs et provoquent des dégradations lentes. Toutefois leur neutralisation par les ions alcalins (Na^+ , K^+) et alcalino-terreux (Ca^{2+}) entraîne la permanence de la dissociation de l'acide et corrélativement une augmentation de son agressivité par production cumulée d'ions H^+ . Des dégradations importantes du béton ont pu être observées en milieu agricole dans des silos ou cuves destinés à contenir les fourrages, fumiers, purins et sur des dallages d'étables (érosion, déchaussement des granulats, pertes de masses, mise à nu des aciers...) [Olivier J.P., 2008].

De façon générale, l'attaque chimique du béton prend la forme d'une décomposition des produits de l'hydratation et de la formation de nouveaux composés qui, s'ils sont solubles peuvent être lessivés et qui, s'ils sont insolubles, peuvent être préjudiciables in situ. Le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est l'hydrate

le plus vulnérable, mais les C-S-H peuvent aussi être attaqués. Les granulats calcaires sont également vulnérables.

Le béton est aussi attaqué par l'eau contenant de CO_2 libre, telles les eaux minérales, qui peuvent aussi contenir du sulfure d'hydrogène. Tout le CO_2 n'est pas agressif par ce qu'une partie de ce CO_2 est nécessaire pour former et stabiliser le bicarbonate de calcium dans la solution.

Quoique les eaux usées domestiques elles-mêmes soient alcalines et n'attaquent pas le béton, on a observé dans plusieurs cas, d'importants désordres dans des égouts, en particulier à des températures assez élevées, lorsque des composés contenant du soufre sont transformés en H_2S par des bactéries anaérobies. Ce composé n'est pas en lui-même un agent destructeur, mais il est dissout par le mince film d'humidité recouvrant la surface du béton et subit une oxydation par les bactéries anaérobies, ce qui produit finalement de l'acide sulfurique. L'attaque apparaît donc au-dessus de l'eau à l'intérieur de la canalisation. La pâte de ciment durci est dissoute graduellement provoquant une détérioration progressive du béton. Une forme d'attaque assez similaire peut survenir sur les réservoirs de stockage pétroliers en haute mer [Grube H. & Rechenberg. W, 1989].

I-2-4-2-1-3-Mécanisme d'attaque des acides

Le béton est très alcalin en nature, il est extrêmement susceptible à l'attaque de l'acide. Le mécanisme pour ce processus est très simple. De façon générale, les réactions chimiques et/ou l'élimination physique n'endommage qu'un ou deux composants de la pâte de ciment. Le tableau I.4 mentionne les composants du béton menacés par la corrosion.

Tableau I.4. Composants du béton menacés par la corrosion.

Composants du béton	Désignation	Formule chimique
Pâte de ciment	Hydroxyde de calcium (CH)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
	Silicate de calcium hydraté (CSH)	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
	Aluminate de calcium hydraté	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	Aluminate de calcium ferrique hydraté	$6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Granulats	Calcaire (Carbonate de calcium)	CaCO_3
	Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	Grès amorphe	$\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$

I-2-4-2-2- Attaque par les sulfates

I-2-4-2-2-1-Définition de l'attaque sulfatique

La résistance du béton aux attaques des sulfates est l'un des facteurs les plus importants pour sa durabilité. Le problème est aussi ancien que le béton et on a commencé à l'étudier il y a déjà près de 100 ans. L'attaque sulfatique est accompagnée d'une précipitation de produits sulfatés dits « secondaires » dont la formation est postérieure à l'hydratation du ciment, d'une expansion importante et de détériorations chimico-mécaniques (modification des propriétés de transport et de la porosité, fissures, pertes de résistance et de

cohésion). Ceci conduit à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé.



Figure I.12. Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate.

I-2-4-2-2-2-Sources des sulfates

On distingue deux types d'attaques : les attaques par les sulfates externes présents dans l'environnement du béton et les attaques sulfatiques internes pour lesquelles les sulfates proviennent des composants du béton lui-même [Chihaoui R., 2008].

Lorsqu'il s'agit d'une attaque par les sulfates provenant de l'extérieur, il y a formation de couches de gypse et d'ettringite secondaire ainsi que la thaumasite à partir de la surface exposée aux sulfates. L'attaque par les sulfates externes est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les C-S-H ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée. -Lorsqu'il s'agit d'une attaque interne par les sulfates, ces derniers proviennent presque uniquement des sulfates de calcium qui se trouvent dans le béton dès sa confection. Par conséquent, ces sulfates sont uniformément répartis dans la pâte hydratée et le seul produit expansif de la réaction est l'ettringite. L'ettringite secondaire qui est le résultat d'une attaque par les sulfates externes, n'est pas seule à endommager le béton, c'est plutôt la formation du gypse qui contribue à la fissuration, la lixiviation et le délaminage des couches superficielles [Kerbouche A., 2009].

Comme le montre La figure I-12, l'origine des sulfates peut être : externe (environnement) ou interne (composants du béton).

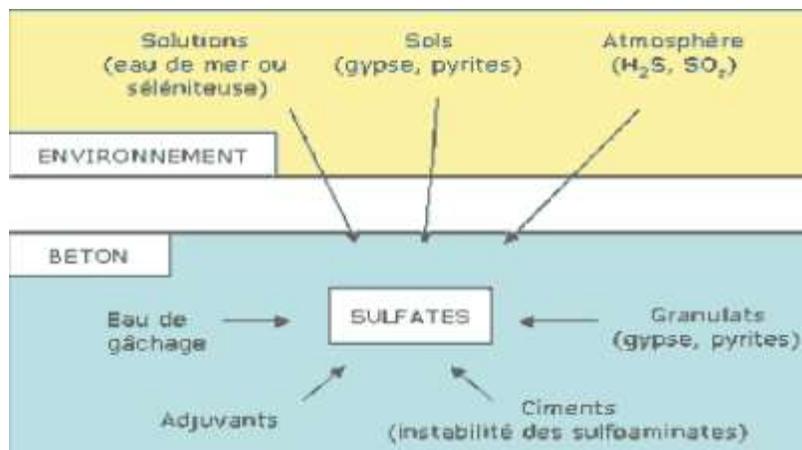


Figure I.13. L'origine des sulfates (interne ou externe) [Kerbouche A., 2009].

Les sulfates peuvent avoir différentes origines :

- Ils peuvent d'abord provenir du régulateur de prise ajouté au ciment (gypse, hémihydrate, anhydrite) auquel s'ajoutent, en proportions variables, les sulfates contenus dans le clinker lui-même : sulfates alcalins (arcanite K_2SO_4 , aphtitalite $K_3Na(SO_4)_2$, langbeinite $Ca_2K_2(SO_4)_3$) et solutions solides dans les silicates de calcium.
- Ils peuvent également provenir de l'utilisation de granulats pollués par des sulfates d'origine naturelle ou artificielle (gypse, plâtre, anhydrite ou encore pyrites).
- Ils peuvent venir du milieu extérieur où ils se trouvent sous forme solide (sols gypseux), liquide (eaux naturelles percolant à travers les sols et solutions plus ou moins concentrées d'origine diverses), ou gazeuse (pollution atmosphérique par le SO_2) :
 - Dans les sols où ils constituent un élément nutritif des plantes, leur concentration moyenne est comprise entre 0,01 % et 0,05 % en masse de sol sec. Des concentrations beaucoup plus importantes (> 5 %) peuvent se rencontrer dans les sols contenant du gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ou de l'anhydrite $CaSO_4$. La décomposition biologique aérobie des matières organiques et l'utilisation d'engrais sont également une source possible de sulfates. Le sulfate d'ammonium $SO_4(NH_4)_2$, provenant des engrais, est particulièrement agressif. Les sols peuvent parfois contenir des sulfures de fer (pyrites) qui, par oxydation, peuvent donner naissance à l'acide sulfurique H_2SO_4 , puis au gypse s'ils sont en contact de carbonate de calcium ou de chaux.
 - Les eaux d'infiltration peuvent se charger en ions SO_4^{2-} au contact des sols ou des remblais contenant des sulfates.
 - Dans les environnements industriels et urbains, l'atmosphère peut contenir de l'anhydride sulfureux SO_2 provenant des gaz de combustion (charbon, carburants divers). En présence d'humidité ces gaz sont susceptibles de s'oxyder pour donner de l'acide sulfurique très agressif.

- Les fermentations anaérobies qui se produisent dans les ouvrages d'assainissement conduisent également à la formation d'acide sulfurique à partir de l'hydrogène sulfuré dégagé [Olivier J.P., 2008].

- L'eau de mer contient des sulfates en solution.

I-2-4-2-2-3-Mécanismes d'attaques

Le schéma suivant résume les différentes étapes de l'attaque sulfatique.

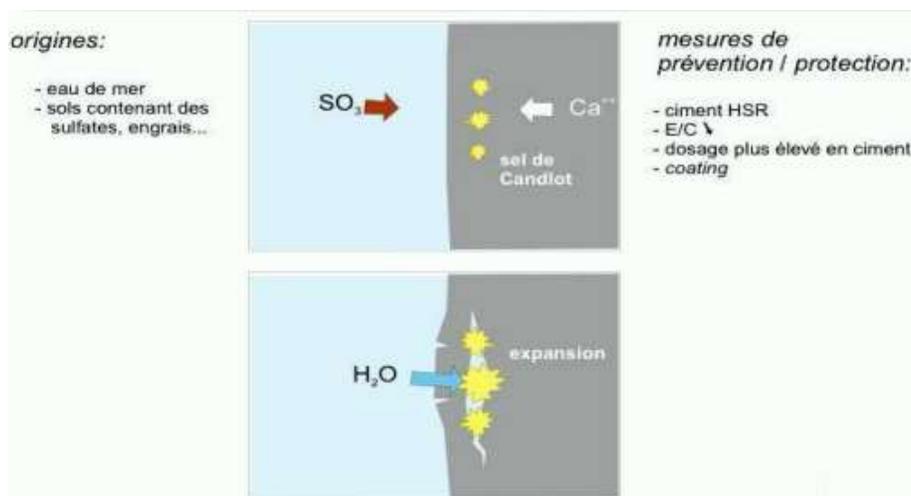


Figure I.14. L'attaque par les sulfates [Aidoud A., 2019].

Les sulfates peuvent détériorer le béton selon deux mécanismes physico-chimiques :

- Expansion.
- Perte des propriétés liantes des C-S-H.

Les aluminates et la portlandite sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque par les sulfates.

I-2-4-2-2-4-Processus d'attaque par les sulfates internes

La dégradation des bétons par les sulfates est due principalement à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation d'ettringite, dite ettringite secondaire. La formation de cette ettringite expansive est à distinguer de l'ettringite primaire, obtenue au premier stade de l'hydratation des ciments portland par réaction du gypse, car cette ettringite primaire n'est jamais expansive. Schématiquement, la formation de l'ettringite est résumée ciaprès :

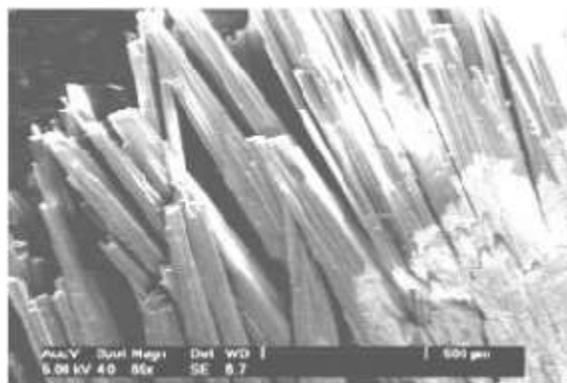


Figure I.15. La formation de l'ettringite secondaire [Boualleg S., 2004].

Formation de gypse dit secondaire par opposition au gypse primaire ajouté au ciment comme régulateur de prise, la formation du gypse secondaire résulte d'une réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate de sodium.

A- Réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment forment l'ettringite, plusieurs scénarios sont envisageables :

- Soit à partir de reliquats de C_3A anhydre :
- $C_3A + 3CaSO_4 \cdot 2H_2O + 24-26H_2O \rightarrow C_3A \cdot CaSO_4 \cdot H_{30-32}$.
- Soit à partir de l'aluminate tétracalcique hydraté C_3AH_13 ou du monosulfoaluminate de calcium $C_3ASO_4H_{12}$.

L'action des sulfates peut aussi engendrer une perte de résistance et une perte de masse du béton de surface. Ces effets sont dus à l'altération des propriétés liantes de certains hydrates.

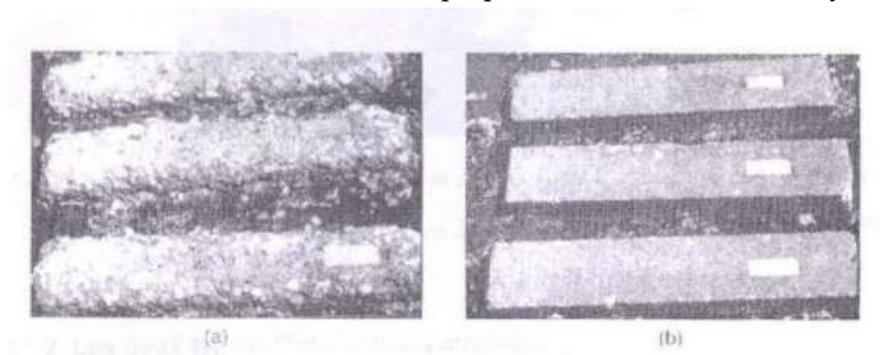


Figure I.16. Epreuve de béton dégradée après 5ans de contact avec des sols riches en sulfates. [Boualleg S., 2004] a) E/C=0.5 b) E/C=0.39

I-2-4-2-2-5-Processus d'attaque par les sulfates externes

Les sulfates sont associés à différents cations nous citons Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . Souvent la nature de ce cation peut accentuer l'action de l'ion sulfate sur les matériaux cimentaires. Selon la littérature, plusieurs chercheurs montrent que les sulfates de magnésium présentent les dommages les plus sévères. A cet effet nous, présenterons par la suite

uniquement les mécanismes d'attaque sulfatique associée à l'ion Magnésium. La Figure ci-dessous synthétise les quatre étapes de ce mécanisme :

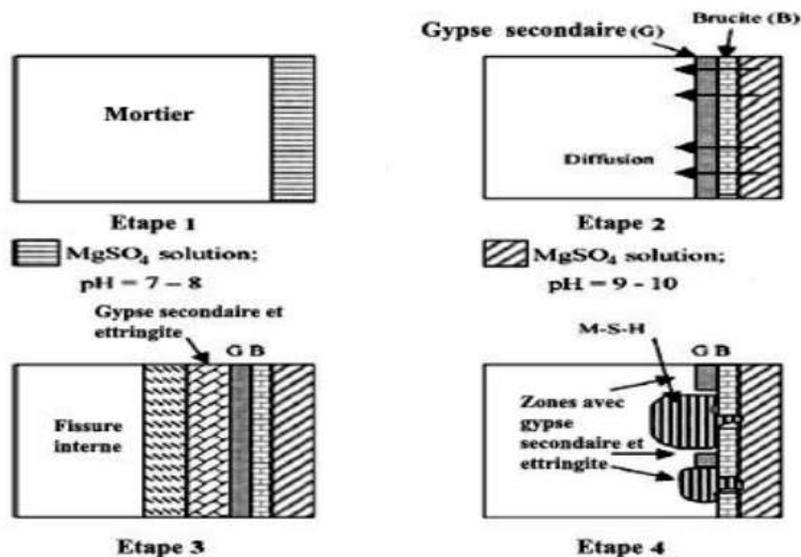


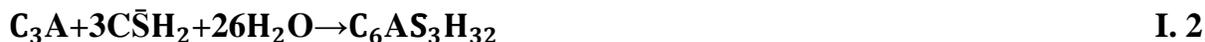
Figure I.17. Mécanisme proposé d'attaque du sulfate de magnésium [Aidoud A., 2019].

Le mécanisme d'attaque sulfatique externe (ESA) d'un matériau cimentaire associé au Mg^{2+} suit les quatre étapes suivantes :

La première étape : se déclenche avec la lixiviation de la portlandite (CH) où les sulfates (SO_4^{2-}) et les ions (Ca^{2+}) vont précipiter pour former de gypse secondaire CSH_2 , les ions (Mg^{2+}) réagissent quant à eux avec (OH^-) pour former l'hydroxyde de magnésium appelé Brucite (B). La solubilité de la brucite est très faible de l'ordre de 0,01 g/l et sa présence fait chuter le PH de la solution interstitielle à des valeurs proches de 10,5, induisant par la suite la décomposition du CSH [Aidoud A., 2019].



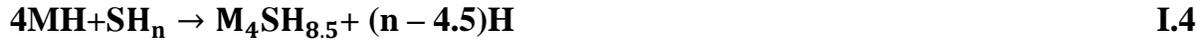
La deuxième étape : Le gypse secondaire CSH_2 résultant de (équation I.1) va réagir avec les aluminates tricalciques C_3A pour former l'ettringite secondaire selon équation I. 2, produit très expansif [Aidoud A., 2019].



La troisième étape : Lors de la consommation de la portlandite (CH), le PH de la solution interstitielle chute ce qui déclenche la décalcification des C-S-H. Alors les ions (Mg^{2+}) et (SO_4^{2-}) vont réagir pour produire ainsi du gypse, la brucite (B) et le gel de silice (S_2H) comme illustré dans l'équation I. 3 [Aidoud A., 2019].



La quatrième étape : La brucite formée (B) va réagir avec les hydrosilicates (S₂H) produisant ainsi le silicate de magnésium hydraté (M-S-H), qui n'ont aucune propriété de liaison et vont conduire à la désintégration de la pâte (équation I. 4) [Aidoud A., 2019].



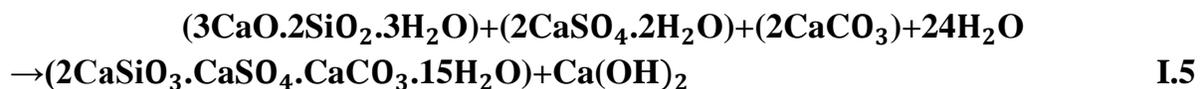
- **Mécanisme d'attaque de la Thaumasite (TSA) :**

Lors des attaques sulfatiques externes (ESA) un autre mécanisme appelé attaque par la formation de Thaumasite (TSA) se déclenche si les conditions suivantes sont réunies :

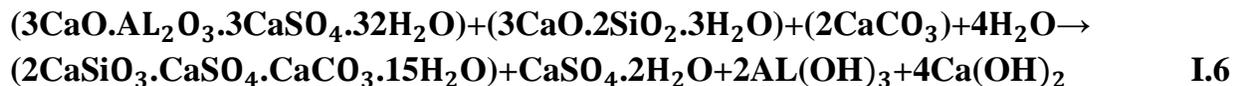
- Une température basse (<15 °C) ;
- Une humidité relative élevée ;
- Une source d'ions calcium (chaux, silicate de calcium hydraté (CSH)...);
- Une source de carbonate (CO₂) atmosphérique, fines calcaire...) [Aidoud A., 2019].

Le mécanisme de la formation Thaumasite pourrait être obtenu par une formation directe ou indirecte :

A- La formation directe : la Thaumasite se forme par une réaction entre le C-S-H, gypse, carbonate de calcium et l'eau (voir équation. I.5).



B- La formation indirecte : connue sous le nom DE woodfordite, la Thaumasite peut se forme par la réaction entre l'ettringite, C-S-H et des ions carbonate en présence d'un excès d'eau, selon (équation.1.6) [Aidoud A., 2019] :



I-3- Conclusion

Le béton est un matériau hétérogène constitué d'une matrice cimentaire, fabriquée à partir d'eau et de ciment, et de granulats. Il crée un réseau poreux dans lequel les mouvements d'eau et les transferts de gaz sont possibles. Ainsi, les capacités de transfert du matériau sont fonction des propriétés microstructurales (porosité, distribution, tortuosité...).

Nous avons présenté une analyse bibliographie relative à la microstructure poreuse des matériaux cimentaires et leurs propriétés physico-chimiques.

CHAPITRE II :
Instabilité thermique
des bétons

CHAPITRE II : Instabilité thermique des bétons

II-1- Généralités sur les BHP

II-1-1- Historique de l'évolution des bétons hydraulique

L'histoire du ciment commence en 3000 Av. J-C, où les Egyptiens ont utilisé des mortiers en gypse et des mortiers en chaux pour construire les pyramides. Puis, les Romains ont utilisé une sorte de béton pouzzolanique : Il s'agit d'un dépôt volcanique qui se solidifie si on le mélange avec de l'eau et de la chaux (Aujourd'hui la pouzzolane est classée comme un ajout). Mais, le mot béton, lui-même, a été introduit par l'ingénieur français Belider (1697-1761) et vient de « betun, becton, beter » qui signifie « se solidifier ». En 1824, Joseph Aspadin a inventé le ciment portland, par la calcination, à 1500 °C, d'un mélange d'argile et de craie que l'on broie ensuite finement [Ismail M., 2006].

Smeaton (1756), Vicat (1818), Aspadin (1825) furent parmi les inventeurs des bétons modernes. Monier et Lambot (1848), Coignet (1852), Hennebique (1880) réalisèrent, avec ce matériau les premières constructions en béton armé (avec des résistances en compression de 15 à 25 MPa). Puis durant un siècle, le béton resta un mélange de : granulats, ciment, et d'eau.

Ces dernières décennies, de nombreux travaux scientifiques ont montré les effets néfastes, pour la résistance et la durabilité, des excès de l'eau de gâchage. Dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives des bétons, il était donc nécessaire d'explorer les voies visant à réduire ce dosage en eau (découverte des plastifiants et fluidifiants vers les années 1970). En parallèle, d'autres recherches sont orientées pour l'obtention d'un mélange de très haute compacité, lors de la composition du béton (optimisation de l'étendu granulaire à une échelle microscopique par l'ajout d'additions extrafines) [Malier Y., 1992].

Ces deux voies de recherche sont abouties à des résultats très intéressants, et à la découverte des nouveaux bétons qui ont des performances très élevées et surtout au niveau de la résistance et de la durabilité, ce sont les Bétons à Hautes Performances (BHP) et à très Hautes Performances (BTHP) [Lakhal R., 2011].

II-1-2- Définition du BHP

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérisent par :

- Une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa sur cylindre ;
- Un rapport Eau /liant inférieur à 0,4.

Ils présentent une structure très dense, une faible porosité et une très bonne résistance à la pénétration d'agents agressifs [Arab A. et Rafai H., 2017].

II-1-3- Applications des BHP

Le BHP présente des avantages et des performances très intéressantes par rapport au béton traditionnel :

- Durabilité améliorée face aux agressions physico-chimiques (perméabilité réduite, meilleure protection de l'armature contre la corrosion, réduction de la pénétration des

ions chlore, diminution des risque de l'alcali-réaction, meilleure résistance au gel,...etc.). Cette durabilité améliorée présente de grands avantages en termes d'entretien à long terme.

- En règle générale, une fluidité très élevée à l'état frais. Cette caractéristique facilite la mise en œuvre du béton, même dans les zones à densité d'armature élevée.
- Résistance accrue au jeune âge. Cette propriété permet de réduire le temps de coffrage et d'accélérer la mise en précontrainte. Des délais d'exécution raccourcis sont donc envisageables.
- Une résistance finale accrue après durcissement, ce qui permet de réduire les sections du béton et par conséquent, la diminution du poids de la construction.
- Un module d'élasticité supérieur, susceptible d'améliorer la stabilité aérodynamique de ponts élancés.
- Un retrait total réduit, qui s'avère avantageux pour la maîtrise des déformations d'une construction, ainsi qu'en ce qui concerne les pertes de précontrainte.

Sur le plan architectural également, le BHP est assorti d'un certain nombre de nouvelles possibilités. C'est ainsi que le BHP permet la réalisation de constructions plus élancées. Cet atout est d'ores et déjà matérialisé dans la réalisation d'ouvrages d'art (ponts), même si ce béton pourrait tout aussi bien être utilisé pour la construction de bâtiments. A l'heure actuelle, les avantages du BHP se concrétisent principalement dans l'obtention d'un espace intérieur le plus utile possible. Nous pourrions cependant aussi songer à un nouvel aspect de l'enveloppe de la construction, avec un regain d'attention porté aux éléments architecturaux tels que les arêtes, les arcs, les voûtes,...

La façade d'un bâtiment pourrait en outre être redéfinie par l'utilisation potentielle de modules de dimensions supérieures. Alors que ces dimensions sont à l'heure actuelle généralement de 6 mètres, elles pourraient être portées à 7 ou à 8 mètres, grâce au BHP. Cette augmentation pourrait faciliter la réalisation d'une autre conception de façade et donc d'un aménagement intérieur modifié, davantage en phase avec les normes internationales actuelles.

La liberté accrue obtenue pour l'aménagement intérieur d'un bâtiment conduit également à l'aménagement de la surface horizontale utile. Grâce à la modification des dimensions du module d'occupation du sol, les espaces libres pourront être plus grands, ce qui donnera à l'architecte plus de possibilités pour la conception et l'aménagement des espaces de vie et de bureaux.

Dans l'industrie de préfabrication, l'utilisation du BHP offre aussi de nouvelles perspectives. Citons notamment la possibilité de produire des cellules préfabriquées complètes, grâce à la réduction du poids d'éléments réalisées.

Un autre avantage du BHP par rapport au béton ordinaire est l'aspect visuel des surfaces de béton, tant coulées sur place que préfabriquées. L'apparition de petites bulles d'air à la surface est souvent très limitée. La surface présente généralement une bonne texture, grâce à la haute teneur en fines.

En outre, le BHP n'est guère soumis à la ségrégation, de sorte que la formation de nids de gravier est généralement évitée. La présence de fumées de silice permet d'obtenir parfois des teintes plus sombres.

Historiquement, le BHP a été avant tout conçu pour des applications très particulières, comme les buildings. Il a été à différentes reprises mis en œuvre aux Etats-Unis pour la réalisation de gratte-ciel, avec des bétons présentant des résistances de 120 à 130 MPa. Cependant, comme indiqué ci-dessus, le BHP peut également être une solution alternative pour les constructions réalisées habituellement en béton conventionnel. Le recours judicieux au BHP exige de toute évidence une collaboration très étroite entre le propriétaire, l'architecte, l'ingénieur, l'entrepreneur, la centrale à béton et le laboratoire de recherche [Lakhal R., 2011].

II-1-4-Les constituants du BHP

Les constituants du BHP font l'objet des principales spécifications suivantes :

- **Ciments** : conformes à la norme NF EN 197-1 de types CEM I ou CEM II ou CEM III et de classes de résistance conseillées 42,5 ou 52,5 (N ou R).
- **Granulats** : conformes à la norme NF EN 12620 « Granulats pour bétons » et à la norme XPP 18-545 (article 10 : « granulats pour bétons hydrauliques »).
- **Additions** : conformes aux diverses normes en vigueur – cendres, laitiers de haut fourneau, fillers calcaires, filler siliceux, éventuellement ultrafines (fumées de silice).
- **Adjuvants** : plastifiants réducteur d'eau et superplastifiants haut réducteur d'eau conformes à la norme NF EN 934-2.

II-1-5-Formulation des BHP

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vides. En effet, les dimensions et les volumes des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les résistances mécaniques du béton et les propriétés de transfert déterminantes pour la durabilité. L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire. La formulation d'un BHP suit les trois principales étapes suivantes :

a. Détermination d'une formule théorique prévisionnelle

- Sélection des constituants en fonction de l'expérience locale.
- Détermination des proportions des constituants.
- Optimisation du squelette granulaire.

b. Optimisation du mélange en laboratoire :

- Validation de la compatibilité ciment /adjuvant.
- Ajustement de la quantité de la pâte et de l'adjuvant.
- Vérification du comportement rhéologique du béton frais.
- Analyse de la sensibilité de la formule aux variations des dosages des divers constituants.
- Analyse de la sensibilité de la formule aux conditions climatiques possibles lors de la mise en œuvre (température).

c. Validation de la formule sur chantier :

- Vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- Vérification des éventuelles spécifications complémentaires telle que la pompabilité.
- Vérification des caractéristiques du béton [Arab A. et Rafai H., 2017].

II-2- Généralités sur les BFHP**II-2-1- Historique de l'évolution des bétons hydraulique**

Une analyse profonde de ce concept nous indique que cette idée est très ancienne et date depuis l'antiquité. En effet les pharaons ont pensé à l'idée des pailles pour renforcer la brique de boue d'après Exode 5 :6 comme il est le cas Finlandais utilisant pour la 1ère fois, les fibres d'amiante dans le renforcement des poteries en argile, il y'a de cela 5000 années. D'autres sources ANTOINE, E.N - Mars 1985 et ACI COMMITTEE 554 Mars- Avril 1984 ont indiqué que l'usage de cette technique par le biais de pailles afin de renforcer les briques, tandis que les poils des animaux et les fibres pour renforcer le plâtre et la pâte de ciment. On peut noter aussi la réalisation, au milieu du XX^e siècle, d'alliages métalliques avec fibre de carbone [Oelimahefason M.S., 2016].

En 1910, une série d'essais pour améliorer la résistance du béton a été faite par J. PORTER qui a conclu que la présence des fibres courtes dans le béton augmente sa résistance à l'écrasement et à la traction.

Par la suite 1911, GRAHAM a établi un brevet sur les bétons de fibres. C'était le premier brevet Américain où il a décrit l'emploi des tranches d'acier comme des renforts fibreux dans les matériaux de construction. Un deuxième brevet Américain sur ce sujet a été pris par WEAKLY.

En 1912, qui consiste à l'utilisation des bandes en fils d'acier fabriquées avec deux fils, avec l'intermédiaire d'un anneau, afin d'assurer une adhérence durable avec le béton.

En 1920, A. KLEINLOGEL a déposé le premier brevet Allemand qui a décrit la synthèse d'ajouter un volume relativement important, de particules de fer au béton pour produire une masse capable d'être usinée (par tournage) comme une masse d'acier [Oelimahefason M.S., 2016].

Quelques années après, en 1938, un autre brevet a été établi par N. ZITEVIC en Grande Bretagne. Son procédé consiste à mélanger avec le béton des petits éléments en fer approximativement avec 100 mm de long et 1.00 mm de diamètre. Ces éléments métalliques sont très semblables aux fibres utilisées aujourd'hui pour armer le béton. Il a conclu qu'il y a une amélioration de la résistance du béton à la compression, à la traction et au cisaillement.

A partir de 1940, plusieurs procédés sont apparus dans de différents pays. Ces procédés recommandent en général l'inclusion des fibres d'acier dans le béton pour améliorer sa performance. Mais on note ici que celui de G. CONSTANTINESCO, en 1943 en Angleterre et en 1954 en U.S.A, mérite une attention particulière.

A partir des années 1970, il s'est produit une sorte de réveil dans le domaine de la technologie des bétons renforcés de fibres d'acier. La confiance acquise dans certaines propriétés

spécifiques des bétons renforcés de fibres d'acier augmente de façon permanente par l'utilisation de ces bétons dans des applications industrielles. Le premier article dans ce concept peut être attribué à LANKARD et SHEETS. Dans cet article, ils que l'ajout de 1% à 2% de fibres au béton réfractaire donne une amélioration significative à sa résistance [Oelimahefason M.S., 2016].

II-2-2- Définition du BFHP

Le béton avec fibre est un béton conventionnel auquel on a ajouté des fibres durant le malaxage. Son nom : la micro-fibre. Les microfibrilles peuvent être utilisées quand on souhaite réduire la fissuration et améliorer la durabilité. Et elles conviennent particulièrement bien aux dalles sur le sol, dalles surélevées, pavages, piscines, trottoirs, béton projet etc... Comme armature secondaire utilisée pour assurer le contrôle de la fissuration, elle constitue une solution idéale lorsqu'elle est combinée au treillis métallique soudé ou ferrailage en acier. Cette fibre n'est pas recommandée pour remplacer l'armature exigée par les codes et les normes du bâtiment. Les propriétés de cette fibre sont étonnantes. En effet, sa force majeure est sa capacité à diminuer le retrait plastique et les fissures d'environ 40% et plus. Les propriétés du béton de fibres dépendent de la qualité de la matrice et des caractéristiques de fibres. La matrice considérée est identique à la matrice d'un béton courant, les fibres sont de formes et de dimensions différentes liées aux technologies d'élaboration. Chacune de ces catégories de fibres donne au béton des propriétés spécifiques lesquelles dépendent de la nature, la forme géométrique, l'élançement, et la teneur en volume de fibre [Bouaziz L., 2014].

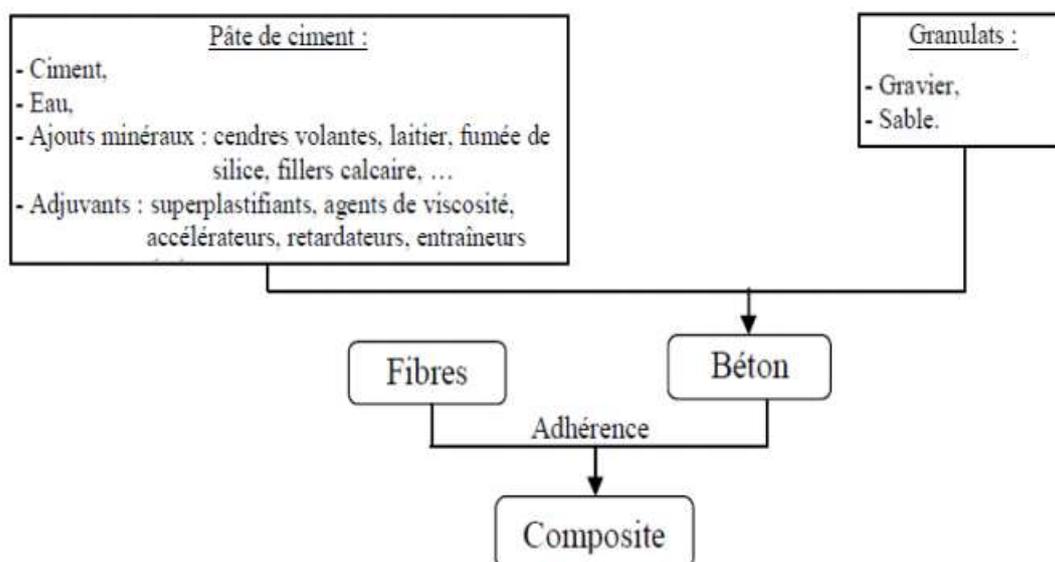


Figure II.1. Modèle de composite à base de fibres [Rossi P., 1998] source [Bouaziz L., 2014].

II-2-3- Les fibres

Les fibres sont définies comme des éléments discontinus, de nature variable, des formes sensiblement cylindriques, d'un diamètre et longueur variable. Elles sont réparties dans la matrice soit d'une façon aléatoire ou orientation préférentielle.

Généralement les fibres sont aussi utilisées pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, et la fibre de grande longueur ou filament continu.

Il existe un grand nombre de fibres qui se différencient par leur origine (naturelles, artificielles et synthétiques), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc.), leur dimension (macro ou micro - fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour des applications, il est nécessaire de tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et la mode de performance du composite.

II-2-4- Les types des fibres

On retrouve sur le marché plusieurs types de fibres, elles peuvent être classées par familles, un choix approprié du type de fibre à utiliser est essentiel. Chaque type de fibre possède des caractéristiques particulières qui les rendent apte à servir à une utilisation plutôt qu'à une autre.

Ainsi l'adoption d'une fibre influencera les facteurs suivants :

- Densité,
- Résistance, tension et en compression,
- Résistance aux impacts et à la fatigue,
- Module d'élasticité,
- Conductivités thermique et électrique,
- Stabilité dimensionnelle,
- Résistance aux conditions environnementales,
- Coût,

Les différentes fibres actuellement disponibles peuvent être classées selon leur origine en :

- ✓ Fibres naturelles minérales et végétales : amiante, cellulose ;
- ✓ Fibres synthétiques d'origine minérale : verre, carbone, fibres métalliques
- ✓ Fibres synthétiques organique : polyamides, polypropylène, acrylique, kevlar, aramide

Il est également possible de séparer dans la famille des bétons de fibres, les fibres d'origines naturelles, des fibres d'origine manufacturées. Les fibres d'origine naturelle peuvent être organiques, ou minérale. Les fibres manufacturées comptent les fibres d'acier, de titane, de carbone, mais peuvent être de type polymère (nylon, aramide, polyéthylène) [Guerbas N. & Attalah O., 2017].

Le tableau ci-dessous (**Tab. II. 1**) présente une liste des différents types de fibres en fonctions de leurs caractéristiques respectives :

Tableau II.1. Les différents types de fibres en fonctions de leurs caractéristiques respectives [Guerbas N. & Attalah O., 2017]

Matériaux	Utilisation	Propriétés / caractéristiques
Bétons avec fibres de verre	Structures non porteuses-panneaux minces	
Béton de fibres synthétiques (polypropylène)	Dallages industriels –pistes d'aéroports	Bonne tenue en service
Béton renforcé de fibres de carbonés	Peu utilisé car trop cher	Très bonne résistance
Béton de fibre naturelle	Utilisation en Asie	Cout très faible
Bétons renforcés de fibre (BRF)	Eléments préfabriquées-restauration non structural	Macro-fibre (diamètre \approx 1 mm) dans proportion volumique allant de 0.5% à 2% -ductilité importante.
Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUHP)	Renforcement et restauration d'ouvrages (ponts)	Micro-fibre (diamètre $>$ 50 μ m ou un mélange de macro-fibres et de Micro-fibre-ductilité + résistance

II-2-5- Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres

Si le module d'élasticité de la fibre est élevé par rapport au module d'élasticité du béton, les fibres reprennent une part des charges, augmentant ainsi la résistance à la traction du matériau. L'augmentation du rapport longueur/diamètre des fibres accroît habituellement la résistance à la flexion et la ténacité du béton. Les valeurs de ce rapport sont généralement comprises entre 100 et 200, car des fibres de trop grande longueur ont tendance à former des boules dans le mélange, créant ainsi des problèmes d'ouvrabilité.

En général, les fibres réduisent le fluage, c'est-à-dire la déformation du béton avec le temps sous une contrainte constante. Par exemple, le fluage en traction d'un béton renforcé de fibres d'acier peut représenter seulement 50 à 60 % de celui d'un béton ordinaire et le fluage en compression, 10 à 20%.

Le retrait du béton, qui est provoqué par la perte de l'eau pendant le séchage, est en partie empêché par les fibres. Le retrait du béton peut être diminué de 35 % ou moins si l'on ajoute 1,5 % de fibres par volume.

D'autres propriétés du béton comme la résistance en compression et le module d'élasticité ne figurent pas dans les tableaux car elles sont nettement moins touchées par la présence des fibres.

Tableau II.2. Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres

Fibre	Diamètre en μ m	Densité	Allongement de rupture en %	Module d'élasticité en GPa	Résistance en traction en GPa
Acier	5-500	7,8	3-4	200	1-3
Verre	9-15	2,6	2-3,5	80	2-3
Polypropylène	7,5	0,9	20	5	0,5
Particules de mica	0,01-200	2,9	-	170	0,25
Amiante	0,02-20	2,5-3,4	2,3	200	3
Carbone	7,5	1,7-2	0,5-1	300-400	2-3

Tableau II.3. Caractéristiques mécaniques des fibres reportées par [Truong B. T., 2016] et [Tlajji T., 2018]

Nature de fibre	Résistance (MPa)	Module d'Young (GPa)	Allongement A la rupture (%)	Coefficient de poisson	Densité (Kg/dm ³)	Diamètre mini – max (µm)
Carbone	3000-5000	200-250	1.8	0.3	1.8	5-8
Verre-E	1100-1550	72-73	1.8	0.22	2.6	5-24
Verre-AR	1100-1700	74-76	1.8	0.25	2.7	9-27
Basalte	1800	85	2.1	0.25	3.0	9-13
Aramide	3000	60-130	1.8-2.3	0.35	1.8	5-15

Ci-dessous, les caractéristiques mécaniques et physiques des fibres les plus utilisées :

Tableau II.4. Les caractéristiques mécaniques et physiques des fibres les plus utilisées

Fibres	Diamètre (µm)	Long (mm)	Densité	R _t MPa	E 10 ³ MPa	Allongement à la rupture en %	Coef de dilatation (µ/m)	R _{feu} Temps Max C°
Acier	5-500	20-80	7.8	1000-3000	200	3-4	11	1500
Fonte (ruban)	36*2600 De section	50-60	7.8	2500	140	1	-	1500
Verre	5-20	40-70	2.6	1500-3000	80	2-3.5	9	800
Polypropylène	10-200	25-75	0.9	400-750	5-10	15-25	90	150
Polyster	-	-	1.4	700-850	8	11-13	-	-
Amiante	0.02-20	5	2.5-3.4	3000	8-18	2-3	1	1500
Carbone	5-9	Variab le	1.7-2	2000-3000	250-400	0.5-1.5	-	400-1500
Sisale	10-50	1-50	1.5	-	130	3	-	-

II-2-5-1 La fibre métallique

L'ajout des fibres métalliques au béton, apporte une certaine ductilité ; pour une longueur de fibres égale à 30 mm et un pourcentage en fibres de 1%, le résultat est meilleur avec les fibres en copeaux.

Cependant, en ce qui concerne l'énergie de rupture, elle est plus importante dans le cas des éprouvettes armées de fibres Dramix (pour L_f=50mm). Ceci peut s'expliquer par le fait que ces fibres présentent un système d'ancrage, elles sont munies de crochets aux extrémités [Rossi. P, 2010].

L'adhérence fibres-matrice (béton) est ainsi meilleure. Il existe sur le marché, une panoplie de fibres métalliques d'acier, voici (la figure II.2) de quelques types de fibres :

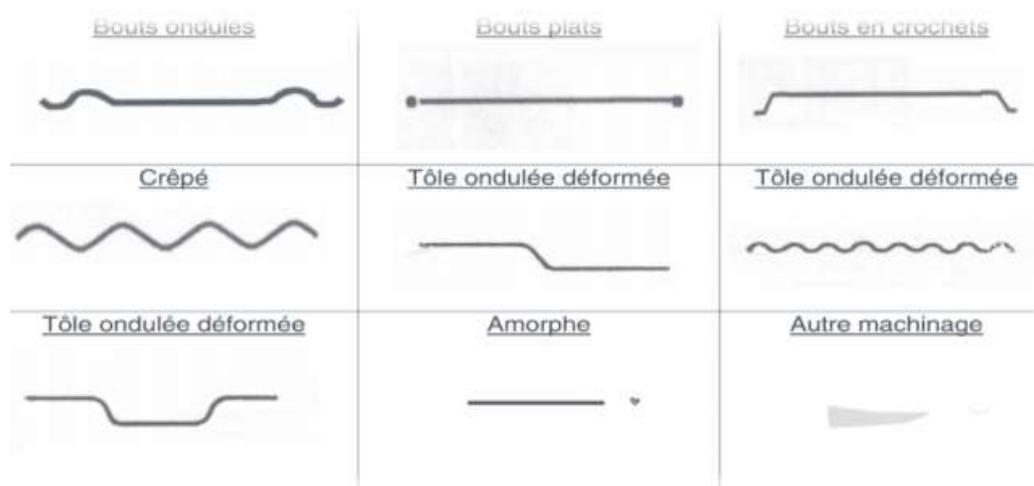


Figure II.2. Géométrie des fibres métalliques

II-2-5-1-1- La longueur et l'élanement des fibres

Ce paramètre joue un rôle important sur les propriétés rhéologiques des mélanges, ainsi que sur le coefficient d'espacement des fibres.

Au fait, pour que les fibres puissent être considérées comme armature de renfort homogène, il faut qu'elles bloquent le développement prématuré de fissures intra granulaires au sein du matériau et à l'échelle de ses composants, aussi il faut donc que la longueur de la fibre soit supérieure à la dimension du gros granulat (trois fois celle du granulat) [Hameed R., 2010].

En résumé, pour une maniabilité donnée, on peut utiliser un dosage important de fibres courtes ou un dosage faible de fibres longues.

De même, le rapport longueur de la fibre/diamètre du plus gros granulat est aussi un paramètre prépondérant concernant l'efficacité des fibres dans le béton. Rossi explique que dans le cas où la résistance de l'interface, entre la matrice cimentaire et le granulat est inférieure à la résistance du granulat et de la matrice, les fissures se développent à cette interface avant de pénétrer dans la matrice. Si la longueur des fibres est proche du diamètre des plus gros granulats, une majorité d'entre elles ne pourront intercepter efficacement les fissures inter granulaires. Pour que les fibres interviennent au niveau de la structure, il est préconisé dans la littérature, un rapport longueur de la fibre/diamètre du plus gros granulat de deux à trois [Guerbas N. & Attalah O., 2017].

II-2-5-1-2- Le Pourcentage et le dosage en fibre

La densité des fibres et leur position, constituent un paramètre prépondérant à l'aboutissement de résultats performants des résistances du béton, et particulièrement en traction. Considérons deux fibres distantes plongées dans la pâte de ciment. Lorsqu'une fissure se manifeste, et qu'une des deux fibres possède une orientation exactement perpendiculaire à la fissure, cela lui confère une action supérieure à l'autre fibre. La première

la fibre peut agir sur la seconde par l'intermédiaire d'une compression de la matrice cimentaire et ainsi provoquer une action combinée des deux fibres supérieure à la somme des actions individuelles des deux fibres.

Lorsque les fibres sont trop proches, la fine couche de pâte qui les sépare ne suffit pas à provoquer cette synergie. Pire, l'action résultante des deux fibres est inférieure à la somme de leur action individuelle. Nous pouvons ainsi, définir une fourchette qui fixe un taux de fibre dans le mélange.

En effet, Toutes les études s'accordent pour conclure à une diminution très nette de la maniabilité, lorsque la quantité de fibres dans un mélange augmente, la composition de la matrice étant conservée [Guerbas N. & Attalah O., 2017].

II-2-5-1-3 Propriétés mécaniques des fibres métalliques

Les fibres ont une influence importante sur le comportement mécanique du béton fibreux, leur incorporation peut augmenter les résistances, en traction, en flexion et particulièrement au cisaillement en résistant aux efforts de traction. Offrent plus de ductilité et de ténacité.

Leur géométrie est très variable (**Fig. II.2**). Les fibres les plus utilisées sont les fibres droites. C'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par amélioration du comportement post fissuration. Il existe des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre [Grünwald S. & Walraven J.C., 2001] d'après [Guerbas N. & Attalah O., 2017] et par frottement à l'interface avec la matrice. On trouve aussi des fibres ruban, des fibres à tête d'ancrage ou encore des fibres ondulées dont, qualitativement, les modes de fonctionnement sont les mêmes que ceux cités précédemment. L'avantage des fibres à crochets ou ondulées est qu'elles développent un ancrage supplémentaire en plus de l'adhérence avec la matrice les rendant plus efficaces que les fibres droites. Cependant, ce type de fibres peut engendrer la formation d'oursins durant la fabrication entraînant une répartition non homogène dans le béton. Les fibres droites sont généralement utilisées pour pallier à ce problème mais, ne fonctionnant que par adhérence avec la matrice, leur efficacité s'en ressent [Grünwald S. & Walraven J.C., 2001].

II-2-5-1-4 Rôle des fibres

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité, il a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme schématiquement illustré par la Figure II.3.a.
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (Figure II.3.b) [Koiman A.G, 2000] d'après [Guerbas N. & Attalah O., 2017]

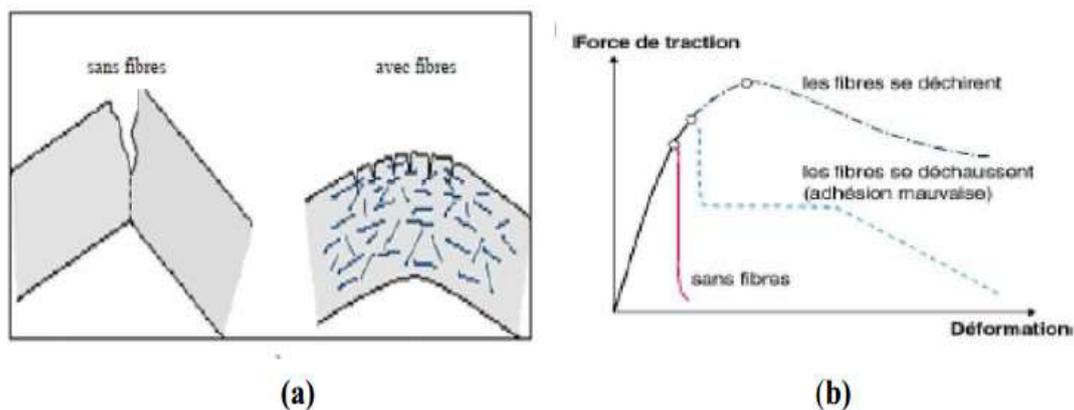


Figure II.3. Illustration de l'apport du renfort par des fibres [Koiman A.G., 2000]
Source [Guerbas N. & Attalah O., 2017]

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer la structure en s'opposant au développement des fissures et à leur propagation, selon le type, le dosage et les éléments en béton dans lesquels elles sont insérées, les fibres permettent :

- L'amélioration de la cohésion du béton frais ; par exemple, les fibres rigides changent la structure du squelette granulaire,
- L'augmentation de la ductilité et le comportement post-fissuration,
- La réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge,
- La réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur),
- L'augmentation de la résistance à la traction par flexion,
- L'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, et à l'abrasion [Koiman A.G., 2000] d'après [Guerbas N. & Attalah O., 2017]

Le principe de couturation des fissures et limitation de leurs ouvertures est comme montré en (Fig.II.4), les fibres qui traversent la fissure offrent une résistance résiduelle (résistance au-delà de la fissuration), ces fibres se déforment aux extrémités ancrées qui se redressent graduellement avec l'augmentation du chargement au-delà de la charge de fissuration. [Markovic I., 2006] d'après [Guerbas. N et al, 2017].

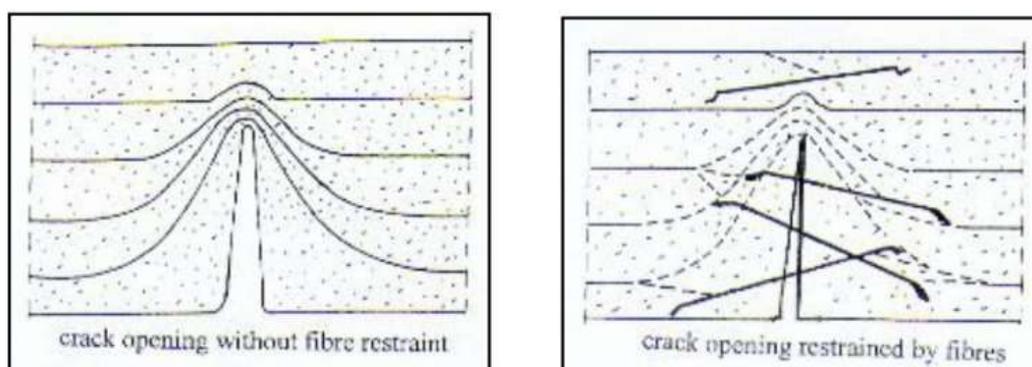


Figure II.4. Principe de couturation d'une fissure [Grünwald S. & Walraven J.C., 2001] Source [Guerbas N. & Attalah O., 2017]

On peut donc aisément comprendre qu'il est extrêmement difficile de généraliser l'apport exact des fibres par rapport à un béton ordinaire car le nombre des paramètres influant sur son comportement est considérable [Bui V.K et al., 2003] d'après [Guerbas N. & Attalah O., 2017]

II-2-5-2- Les fibres non métalliques

Selon le type de fibres, elles présentent des propriétés plus ou moins intéressantes et leurs applications sont limitées soit par le prix très élevé (fibres de carbone), soit par les problèmes de durabilité (les fibres de verre), soit à leurs mauvaises performances comme renfort (fibres de polypropylène). Certaines fibres naturelles présentent une instabilité dimensionnelle due aux cycles "séchage-mouillage". Parmi ces fibres, on peut citer les fibres de carbone, les fibres de verre, les fibres synthétiques et les fibres naturelles organiques ou minérales (coco, bois, amiante, bambou, Asbestos, abaca, chanvre, palmier, alfa, coton...). Les fibres végétales naturelles ne sont pas destinées pour les bétons à hautes performances. Elles sont plutôt appliquées aux bétons ordinaires. Des fibres d'amiante ont été remplacées par les polymères pour leur effet nuisible sur la santé humaine [Bouaziz L., 2014].

II-2-5-3- Les fibres de verre « E » et « AR »

Les fibres « E » sont les fibres de verre classique à forte teneur en bore elles présentent de bonnes caractéristiques mécaniques, mais sont sensibles aux alcalis libères par l'hydratation du ciment. Leur emploi dans le béton nécessite donc l'incorporation de polymères ou autres ajouts au mélange, au moment du gâchage qui ont pour fonction d'enrober la fibre et de la protéger de l'attaque alcaline.

Les fibres AR (alcali -résistantes) sont obtenues avec un verre riche en zirconium moins sensible aux alcalis. Un traitement d'ensimage (dépôt d'un produit de protection) améliore encore leur tenue [Chouiter Y., 2016].

II-2-5-3-1- Propriétés des fibres de verre

- Les caractéristiques mécaniques de ces fibres sont élevées 3000 MPa pour la résistance à la traction.
- Il faut également souligner leur excellente résistance au feu (jusqu' à 800° C) ce critère ajouté a un coefficient de dilatation du même ordre que celui de la pâte de ciment confère aux bétons de fibres de verre une bonne résistance au feu.
- Les essais en cours doivent permettre d'améliorer l'évolution des caractéristiques du béton de fibres de verre lors de son vieillissement.

II-2-5-3-2- Rôle de fibre

Lorsque les charges appliquées au béton s'approchent de la charge de rupture, les fissures se propagent, parfois rapidement. Les fibres noyées le béton permettent d'arrêter le développement de la fissuration comme il est indiqué dans la figure II.3. Les barres d'armature en acier jouent un rôle analogue, car elles agissent comme des fibres de grande longueur. Les fibres courtes et discontinues ont cependant l'avantage de se mélanger et de se disperser dans le béton de façon uniforme. Les fibres sont ajoutées à la gâchée de béton, qui

contient habituellement du ciment, de l'eau et des granulats fins et grossiers. [Chouiter Y., 2016]

II-2-5-3-3- Applications

Sur chantier les mortiers de fibres de verre s'utilisent pour les enduits extérieurs monocouches ainsi que pour certains procédés d'isolation thermique.

En préfabrication les domaines d'application sont très vastes [Chouiter Y., 2016] :

- ❖ Panneaux de façade minces de 10 à 15 mm d'épaisseur ou panneaux sandwich à isolant incorporé
- ❖ Éléments de bardage et éléments décoratifs.
- ❖ Mobilier urbain.
- ❖ Éléments divers : coffrets, coffrages, habillages.
- ❖ Produit d'assainissements : tuyaux, caniveaux.

Tableau II.5. Présente domaine d'application privilèges par type de fibres [Chouiter Y., 2016]

Type de fibres	Dosage courant	Domaine d'application privilèges	Exemples d'application
Fibres métallique	0.5 à 2 % En volume 40 à 160 Kg m ³	Renfort pour bétons structurels et armés structurelle	-Dallage sols industriels, planchers, dalles de compression - éléments préfabriqués – voussoirs de tunnels, poutres, conteneurs, tuyaux -Bétons projetés en travaux souterrains, stabilisation de pente et ouvrages d'assainissement -Pieux de fondation, semelles filantes
Fibres polypropylène	0.5 à 2 % En volume 0.5 à 2 Kg m ³	Limitation de la fissuration liée au retrait Amélioration de la tenue au feu des bétons	-Dallage -Voussoirs de tunnels -Revêtement d'ouvrages souterrains -mortiers projetés -Parements esthétiques
Fibres de verre	1 à 2%	Réalisation d'éléments préfabriqués très minces	-Parements architectoniques -Panneaux de façade -Élément décoratifs

Les avantages et désavantages des fibres de verre peuvent être résumés comme suit [Chouiter Y., 2016] :

II-2-5-3-4- Avantage

- Coût faible,
- Grande résistance en tension,
- Grande résistance aux produits chimiques,
- Excellent isolant,
- Grande ténacité,

- Excellente résistance aux impacts,
- Module d'élasticité faible (réduit perte de précontrainte),
- Bonne fiabilité.

II-2-5-3-5- Désavantages

- Densité élevée (par rapport aux autres fibres),
- Sensibilité à l'abrasion,
- Faible module d'élasticité (grande déformation),
- Faible résistance à la fatigue,
- Grande dureté (usure des instruments de fabrication),
- Faible résistance aux charges cycliques ;
- Corrosion possible aux alcalis et aux acides hydrologiques,
- Vieillissement à l'humidité.

II-2-5-4- Fibres de polypropylène

Les fibres de polypropylène sont fabriquées depuis 1954 par l'industrie textile. Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfinés des produits chimiques. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages suivants : déformabilité élevée, imputrescibilité et bonne résistance en traction qui peut atteindre 800 MPa.

Ces fibres sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de revêtement de façades dans plusieurs constructions (Londonderry House Hôtel), ainsi que l'élaboration de panneaux décoratifs de 33cm d'épaisseur et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux

Les fibres de polypropylène sont en général assez longues (30 à 60 mm), légères et ne sont pas attaquées par le ciment. Leur module d'élasticité plus faible que la pâte durcie Il convient de les utiliser de préférence pour les pièces minces devant résister, soit à l'action corrosive de certaines ambiances dans lesquelles l'acier pourrait se corroder rapidement, soit aux chocs mécaniques.



Figure II.5. Fibres de polypropylène

II-2-5-4-1- Propriétés des fibres de polypropylène

Si leurs caractéristiques mécaniques ont des valeurs plus faibles que celles des fibres métalliques, il faut cependant mentionner leur insensibilité chimique, leur souplesse, qui rend aisée leur incorporation au béton et leur allongement à la rupture (15 à 20 %), qui favorise la « ductilité » du béton.

Comme la plupart des matières plastiques, les fibres de polypropylène sont peu résistantes au feu : leur température de fusion est d'environ 160 °C mais leur fusion n'affecte pas la résistance du béton.

II-2-5-4-2- Les bétons de fibres de polypropylène

La fabrication du béton avec fibres de polypropylène ne soulève aucune difficulté, la répartition des fibres se faisant facilement et ne nécessitent pas de précaution particulière lors de malaxage.

Les fibres de polypropylène améliorent la maniabilité du béton et sa cohésion. Ces propriétés sont intéressantes pour les pièces à démoulage immédiat (bordures, tuyaux) en même temps qu'elles améliorent l'aspect et la précision des angles, des tranches ou arêtes des pièces moulées ou des dallages.

Le grand avantage des bétons de fibres de polypropylène est leur bonne résistance à la fissuration due au « premier retrait » ainsi que leur résistance aux chocs. Les dosages couramment pratiques sont de l'ordre de 0.05 à 0.2 en volume (0.5 à 2 Kg de fibres par m³ de béton)

II-2-5-4-3- Application

Des propriétés précédentes découlent les applications des bétons de fibres de polypropylène :

- Dallages industriels et chaussées
- Pièces préfabriquées (panneaux décoratifs)
- Sculptures
- Éléments réalisées avec coffrages glissants
- Mortiers projetés
- Enduits

II-2-6- Fabrication de béton de fibres

Avant de mélanger le béton, la longueur des fibres, leur quantité et la composition du mélange sont choisies pour éviter la formation de boules de fibres. Dans les mélanges renforcés, le mortier occupe d'habitude environ 70 % du volume, contre 50 % pour les mélanges de béton courants, non renforcés de fibres.

Les panneaux en ciment renforcé de fibres ne contiennent pas de granulats grossiers. Ces produits sont généralement réalisés en projetant simultanément le mortier et les fibres hachées. Un mortier ayant un rapport eau/ciment élevé facilite la projection. Il existe d'autres méthodes

de fabrication, dont le coulage, moins universel que la projection, et le moulage sous pression, où le rapport eau/ciment moins élevé permet d'obtenir un produit plus résistant.

Des adjuvants chimiques sont ajoutés au mélange de béton renforcé de fibres, notamment pour augmenter son ouvrabilité. En Amérique du Nord, les entraîneurs d'air et les réducteurs d'eau sont ordinairement additionnés aux mélanges qui contiennent une proportion de 50 % ou plus de granulats très fins.

Les superplastifiants incorporés à des bétons renforcés de fibres peuvent abaisser le rapport eau/ciment et améliorer la résistance, la stabilité volumétrique et l'ouvrabilité des mélanges frais.

II-2-7- Diverses applications de béton de fibre

Les nombreuses innovations de la technologie des bétons renforcés de fibres ont permis d'étendre considérablement la gamme des applications (**Tableau II.6**).

Tableau II. 6. Application de divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment*

Type de fibre	Application
Verre	Panneaux préfabriqués, murs, rideaux, tuyaux d'égout, toiture en voile mince de béton, enduit pour blocs de béton.
Acier	Éléments de toiture en béton cellulaire, revêtements de chaussée, tabliers de pont, produits réfractaires, tuyaux en béton, pistes d'atterrissage, réservoirs sous pression, structures résistantes aux explosions, revêtements de tunnel, coques de bateaux.
Polypropylène, nylon	Pieux de fondation, pieux précontraints, panneaux de revêtement, éléments flottants de débarcadères et amarres pour les marinas, matériaux de réparation des routes, couches de lest pour les tuyaux sous-marins.
Amiante	Voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et de protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toiture plates et ondulées, revêtements de mur.
Carbone	Éléments ondulés pour la construction des planchers, structures de membrane simple ou double courbure, coques de bateaux, planches d'échafaudage.
Particules de mica	Remplacent partiellement l'amiante dans les panneaux à base de ciment, les tuyaux en béton ; matériaux de réparation.
*La combinaison de plusieurs types de fibres peut être utilisée pour des besoins particuliers.	

II-3- Phénomènes physiques et chimiques dans le béton chauffé

Du fait d'hétérogénéité du béton, il est nécessaire de comprendre le rôle de chacun de ses composants dans la phase de montée et /ou de baisse en température.

Lorsque le béton est exposé à une température élevée, il subit diverses transformations physico-chimiques. Ces transformations peuvent concerner la pâte de ciment durci, les granulats ainsi que la zone interfaciale pâte-granulats [**Haniche R., 2011**]. Les principales réactions chimiques susceptibles de se produire au cours d'échauffement ont lieu dans la pâte ou les granulats [**Toumi B., 2010**].

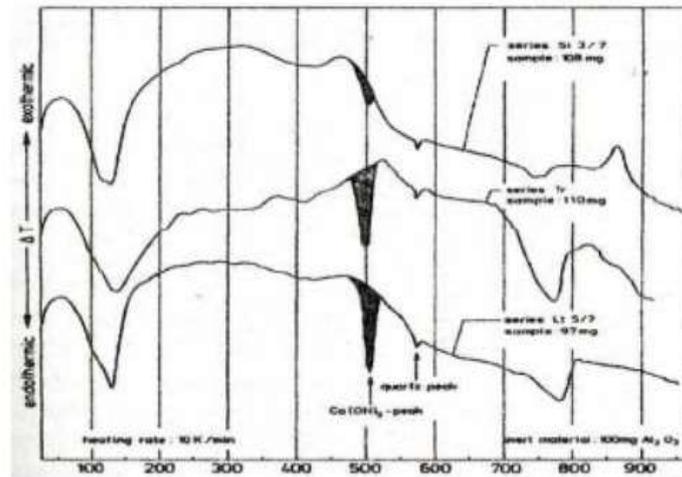


Figure II.6. Les principales modifications se passent dans la pâte de ciment, en raison de la présence de l'eau sous différentes formes (libres, liée, absorbée) [Haniche R., 2011].

II-3-1- Matrice cimentaire

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions chimiques et de processus d'hydratation. Ce processus conduit à la formation de l'hydrosilicate de calcium (C-S-H), de l'ettringite ($Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26(H_2O)$), de la portlandite $Ca(OH)_2$. Le C-S-H confère au ciment hydraté sa résistance.

L'eau joue un rôle important dans la matrice cimentaire. Avec l'augmentation de la température, elle se dilate puis s'évapore en entraînant une déshydratation des hydrates formés. Alonso et Fernandez [Alonso C. & Fernandez L., 2004] ont mené des travaux sur le processus de déshydratation et de réhydratation de pâte cimentaire soumise à différents cycles de chauffage-refroidissement à la vitesse de 1°C/min. La figure II-7 montre l'évolution des composants de la matrice en phases de chauffage (a) et de refroidissement (b).

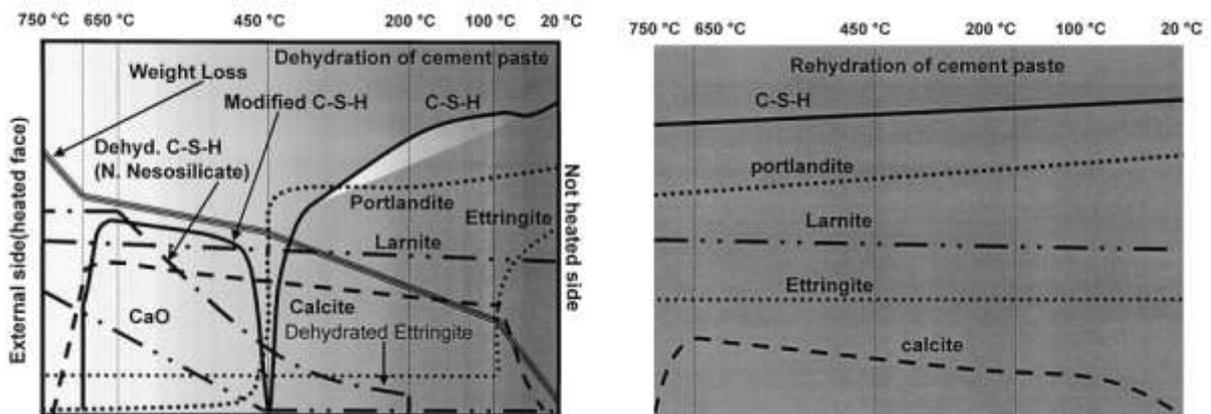


Figure II.7. Processus de déshydratation (a) / réhydratation(b) de la pâte de ciment exposée à haute température [Alonso C. & Fernandez L., 2004]

Les principales transformations de la matrice cimentaire décrites par plusieurs auteurs [Toumi B., 2010, Alonso C. & Fernandez L., 2004, Castellote M. *et al.* 2004, Noumowé N.A., 1995, Schneider U. *et al.*, 1981] avec l'augmentation de la température sont :

- 20 - 120°C : le départ de l'eau libre s'opère de façon marqué vers 100°C.

Autour de 120°C, l'eau libre s'échappe complètement [Noumowé N.A., 1995, Schneider U. et al., 1981]. A 100°C, l'ettringite se décompose complètement [Alonso C. & Fernandez L., 2004, Castellote M. et al. 2004].

- **130 - 170°C** : la réaction endothermique de décomposition du gypse s'observe.
- La destruction du C-S-H observée avant 100°C se poursuit jusqu'à 400°C [Castellote M. et al. 2004] ou à 450°C [Alonso C. & Fernandez L., 2004].
- **450 - 550 °C** : La décomposition de la portlandite en chaux se produit et relâche de l'eau : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ [Toumi B., 2010, Alonso C. & Fernandez L., 2004, Castellote M. et al. 2004, Schneider U. et al., 1981].
- **Autour de 570 °C** : Il y a transformation de structures du quartz α en quartz β , accompagnée d'un gonflement pour les granulats quartziques et basaltiques.
- **600 - 700°C** : la seconde décomposition des C-S-H et la formation de $\beta\text{-C}_2\text{S}$ s'opère [Schneider U. et al., 1981].
- **Entre 700 et 900 °C** : Le carbonate de calcium (CaCO_3) se décompose en chaux libre (CaO) et en gaz carbonique à partir de la température de 600°C et autour de 800°C [Toumi B., 2010, Alonso C. & Fernandez L., 2004, Schneider U. et al., 1981].
- **A dessus de 1300-1400 °C** : Début de la fusion des agrégats et de la pâte de ciment [Menou A., 2004].
- Durant la phase de refroidissement, Alonso et Fernandez [Alonso C. & Fernandez L., 2004] ont montré un processus de réhydratation des silicates qui conduit à la formation de nouveaux gels de (CSH). De plus, une nouvelle formation de la portlandite est observée [Nguyen V., 2013] (figure II-7-b).

II-3-2- Les granulats

Les granulats constituent le squelette du béton et représentent environ 60-80% de son volume. Les granulats utilisés pour la confection du béton peuvent être naturels (origine minérale sans transformation autre que mécanique) artificiels (origine minérale et transformés) ou recyclés.

Les granulats en contact de la pâte de ciment peuvent être réactifs ou neutres. Les granulats réactifs (calcaire) présentent de fortes liaisons avec la pâte de ciment du fait des réactions chimiques qui se produisent au cours du temps. Les granulats neutres (siliceux) ne réagissent pas avec la pâte de ciment et présentent donc de faibles liaisons.

Les granulats calcaires sont assez stables jusqu'à la température 650°C où l'on observe ensuite une perte de masse de l'ordre de 40% (figure II.8-a). Cette perte est liée à la décarbonation de la calcite (CaCO_3) conduisant à la formation de gaz (CO_2) et de la chaux libre (CaO). La chaux (CaO) ainsi formée peut réagir avec l'humidité de l'air durant la phase de refroidissement et générer de la portlandite. La formation d'une nouvelle portlandite entraîne un accroissement de fissures dans le béton qui engendrerait une baisse de ses performances mécaniques résiduelles [Dias W.P.S. et al., 1990], [Schneider U. et al., 1981], [Nguyen V., 2013].

Les granulats de quartzite (siliceux) (figure II.8-b), ont un comportement physique relativement instable vis-à-vis de la température. Le quartz présent dans ces granulats, est sous forme d'édifice tétraédrique qui, à partir d'une température de 575°C. Ce changement de phase du quart α en quart β est suivi d'un changement de volume de 1% à 5.7%. Cette variation de volume pourrait engendrer un endommagement dans le béton [Schneider U. et al., 1981]. La

perte de masse des granulats de quartzite est deux fois plus faible que celle du silex [Nguyen V., 2013].

Les granulats de silex ont perdu environ 1% de leur masse (figure II.8-c). L'instabilité thermique de ces granulats est observée dès 110 - 165°C pour les travaux de [Mindeguia J.C., 2009] et 150 - 450°C pour [Xing Z., 2011]. Le caractère instable à relativement faible température semble être lié à la présence d'eau piégée dans les micropores ou provenant de la déshydroxylation des groupes silanols [Nguyen V., 2013].

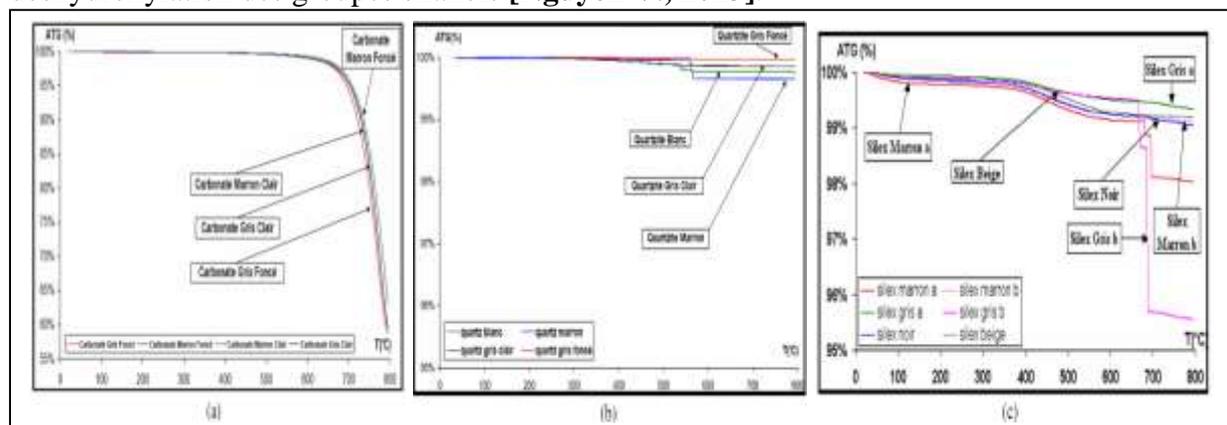


Figure II.8. Analyse thermogravimétrique des granulats calcaires (a), siliceux (b) et silex (c) [Xing Z., 2011], [Nguyen V., 2013]

II-3-3- L'interface pâte granulats

Dans les bétons, l'interface pâte-granulats est la partie la plus fragile, la plus poreuse et la mieux cristallisée. La présence de la fumée de silice réduit sa porosité et permet ainsi une bonne adhérence entre la matrice cimentaire et les granulats. Par contre, cette zone est moins riche en gel de CSH. A haute température, cette partie se dégrade progressivement en montant en température. Ceci est dû au départ de l'eau piégée dans les pores et liée chimiquement. Le retrait de dessiccation favorise le développement des fissures et au-delà de 120 °C, les phénomènes de déshydratation engendrent une détérioration rapide au niveau de cette zone à cause de la dilatation différentielle entre la pâte de ciment (retrait) et les granulats (expansion). Plus le matériau est hétérogène, plus la différence entre les coefficients de dilatation thermique des constituants est importante. Ces coefficients varient en fonction de la température, et dépendent du type de granulat et de ciment utilisés. Ceci a été confirmé par **Diederichs M. et al.**, [2004] source [Toumi B., 2010] en effectuant des essais de mesure du coefficient de dilatation thermique avec différentes natures de granulats.

II-4- Éclatement des bétons sous sollicitations thermiques.

II-4-1- Les différentes formes d'endommagement thermique

Quand un béton est chauffé, deux phénomènes proches peuvent conduire à la perte de matière : l'écaillage et l'éclatement. Ces deux termes peuvent être définis assez précisément.

II-4-1-1 L'écaillage

L'écaillage consiste en un détachement progressif (figure II.9) et continu de très petits morceaux de béton qui sont expulsés avec force du parement exposé au feu. Ces morceaux ont la particularité d'être de très faible épaisseur (quelques millimètres) et très aplatis (leurs dimensions perpendiculaires à l'épaisseur sont de l'ordre de quelques centimètres). Ces

morceaux sont très nombreux et sont assimilables à des copeaux minces qui se détachent successivement en grand nombre et sur des surfaces très étendues en proportion de leur taille. La manifestation de ce phénomène peut commencer dès les premières minutes de l'incendie. Elle dépend de caractéristiques telles que la composition du béton et ses propriétés associées, sa teneur en eau et sa géométrie. Dans certains cas, elle se poursuit continuellement tant que l'incendie n'est pas maîtrisé, à une vitesse qui semble quasi constante. L'épaisseur de la pièce diminue donc progressivement et de façon quasi proportionnelle au temps. La présence d'une cage d'armature ne modifie pas significativement le phénomène sauf si les barres d'acier sont d'un diamètre tel qu'elles constituent un obstacle physique à l'expulsion du béton qu'elles masquent. Elles permettent alors de limiter le phénomène aux zones masquées par les barres. En revanche, les aciers de petit diamètre ne permettent pas d'escompter l'effet de ralentissement significatif de l'enlèvement progressif de matière. C'est la forme la plus dangereuse de délitescence [Toumi B., 2010].



Figure II.9. Ecaillage lors de l'incendie du tunnel mont blanc [Toumi B., 2010].

II-4-1-2 L'éclatement

L'éclatement désigne le mécanisme par lequel les parements en béton perdent une partie de leur béton de surface. Il s'agit de morceaux de béton qui se détachent au cours de l'agression par le feu, souvent dans les zones les plus chauffées et les moins confinées, tels que, par exemple, les angles inférieurs de la retombée rectangulaire d'une poutre de plancher : on constate alors que des morceaux significatifs de section triangulaire se détachent mettant à nu l'armature latérale du premier lit d'acier (figure II.10). Ces morceaux sont assez gros et peu nombreux. Ils résultent du détachement de la zone d'enrobage non armée située dans l'angle de section. Les morceaux détachés ne proviennent jamais du volume intérieur à la cage d'armature. Ils sont d'autant plus gros que l'enrobage des aciers est important [Toumi B., 2010].

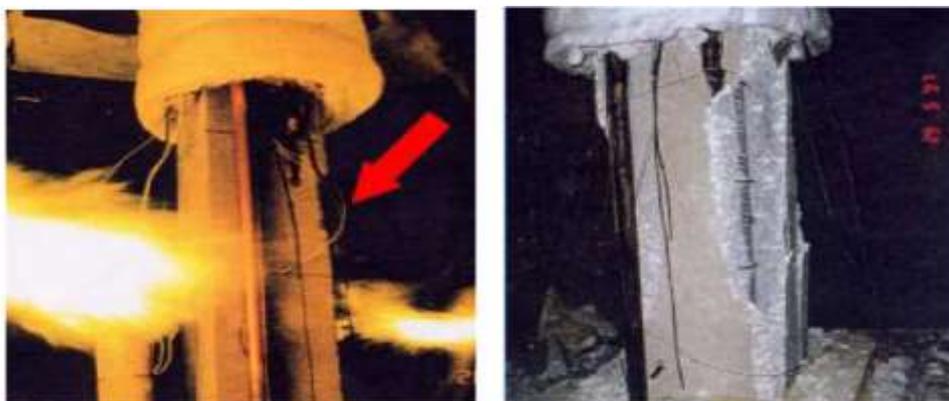


Figure II.10. Eclatement d'un poteau durant l'essai au feu [Toumi B., 2010].

En résumé l'instabilité thermique du béton peut se présenter sous diverses formes [Arupfire, 2005] :

- **Eclatement explosif** : ce type d'éclatement se produit pendant les trente premières minutes du feu ou d'un essai standard. Il peut se produire à une température supérieure à 100°C. L'éclatement explosif est caractérisé par un détachement brutal de petits ou gros morceaux de béton, accompagné d'un bruit fort.

- **Eclatement de surface** : couramment appelé écaillage, l'éclatement de surface est caractérisé par le détachement de petits morceaux (jusqu'à 20mm environ) du parement exposé au feu. Il est moins violent que l'éclatement explosif.

- **Eclatement de granulats** : cet éclatement est provoqué par la dilatation thermique des granulats proches de la surface à cause de la montée en température. Les principales causes de ce phénomène sont la conversion de quartz à 570 °C. Les dommages engendrés par l'éclatement de granulats ne sont que superficiels.

- **Eclatement d'angle** : il s'observe dans les stades avancés du feu lorsque le béton est affaibli et que les fissures se développent en raison des contraintes de traction le long des bords et coins de l'ouvrage.

- **Eclatement par détachement des granulats** : ce type d'instabilité est issu de la modification de la microstructure de la pâte de ciment avec la montée en température et aussi des fissures internes engendrées par la dilatation thermique différentielle entre la pâte de ciment et les granulats.

- **Eclatement en phase de refroidissement** : il est non violent et sans bruit. Ce phénomène est causé par la présence de granulats calcaires et de la réhydratation de la chaux lors de la phase de refroidissement.

II-4-2- Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton à haute température

Les premières mentions concernant l'éclatement des bétons datent des années soixante. Les observations du comportement des bétons à haute température menées par **Harmathy T.Z. [1970]** ont montré que ces bétons chauffés pouvaient présenter, dans certains cas, un comportement explosif. Deux principaux effets ont été attribués à l'éclatement des bétons ordinaires, effets du gradient thermique et formation de pressions de vapeur d'eau dans le matériau. Ce n'est qu'en 1984 qu'Hertz K.D. [2003], en étudiant les propriétés de bétons à haute performance (120 MPa et 170 MPa) soumis à des températures élevées, a observé une forte sensibilité de ces bétons à l'éclatement [**Toumi B., 2010**].

II-4-2-1- Mécanisme d'éclatement par déformations thermiques empêchées

- **L'aspect thermo-mécanique**

L'instabilité thermique provoquée par des contraintes mécaniques engendrées par la dilatation thermique empêchée est soutenue par **Bazant Z.P. [1996]**, **Ulm F.J., [1999]**, **Msaad Y. [2005]**. Cette hypothèse défend l'idée que le gradient de température entraîne des dilatations empêchées des granulats et de la pâte. Celles-ci engendrent alors des contraintes de compression parallèles à la surface chauffée, et par effet Poisson une déformation

perpendiculaire à la surface chauffée, qui peut entraîner des contraintes de traction. De plus, le gradient thermique provoque des dilatations différentes entre pâte et granulats du fait de leurs caractéristiques thermiques. Cette incompatibilité de dilatation thermique entre granulats et pâte de ciment est intéressante, cependant, l'efficacité des fibres synthétiques dans la tenue au feu est difficilement explicable dans ce cas-là. Il semble tout de même intuitif que cet aspect puisse entrer en jeu dans les instabilités. Si ce n'est pas le facteur principal, il peut être un élément déclencheur.

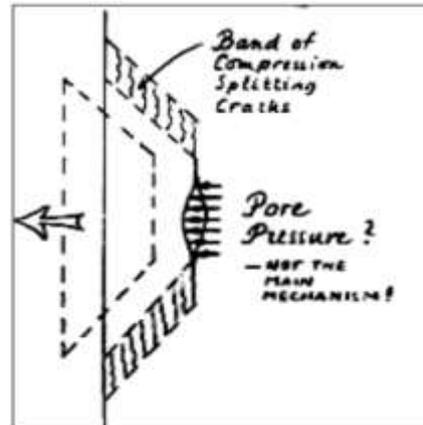


Figure II.11. Eclatement par déformations thermiques empêchées [Toumi B., 2010]
II-4-2-2- Mécanisme d'éclatement par pression interne

- **L'aspect thermo-hydrique**

Le processus thermo-hydrique fait référence à une cinétique particulière prenant place dans un élément de béton lorsque celui-ci est chauffé [Harmathy T.Z., 1964 ; Lottman B.B.G., 2007].

Nous avons vu que l'eau pouvait se rencontrer sous plusieurs formes : eau capillaire, eau adsorbée et eau chimiquement liée. L'élévation de la température provoque également la vaporisation de cette eau (l'eau chimiquement liée étant libérée par déshydratation des CSH), la pression de vapeur d'eau augmente par conséquent dans le matériau. Pour rétablir l'équilibre hydrique, le transport de cette vapeur d'eau s'effectue vers les zones à basse pression (principalement par un mécanisme de gradient de pression de type Darcy) : la vapeur s'évacue vers l'extérieur par la surface chauffée et migre vers l'intérieur de l'élément (**Figure II.12**).

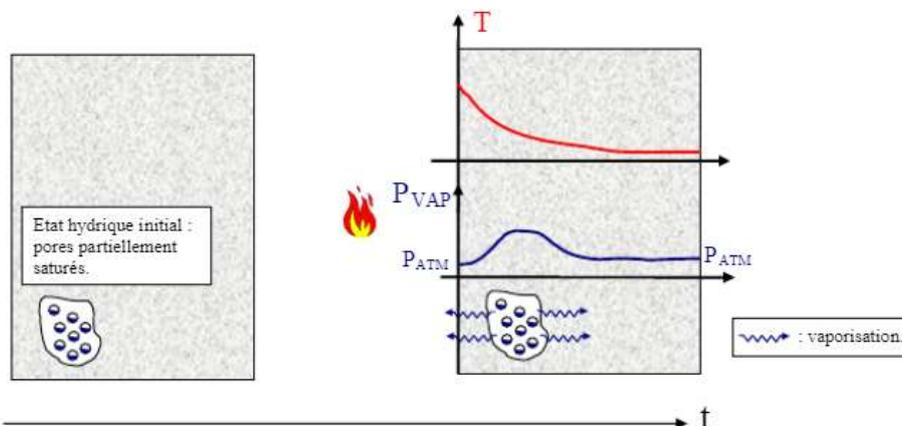


Figure II.12. Première phase du processus thermo-hydrique : vaporisation de l'eau liquide (eau capillaire, adsorbée et provenant de la déshydratation des CSH) puis transport vers les zones à basse pression, illustration reprise de [Mindeguia J.C., 2009].

La vapeur d'eau commence à se condenser dès que les conditions thermodynamiques le permettent (pression, volume et température). Un front quasi-saturé d'eau liquide se forme donc progressivement au voisinage de la surface chauffée (on estime sa situation à quelques centimètres de la surface chauffée), constituant ainsi une barrière plus étanche ("moisture clog", [Harmathy T.Z., 1964]) à tout transport ultérieur de vapeur d'eau vers l'intérieur de l'élément (Figure II-13).

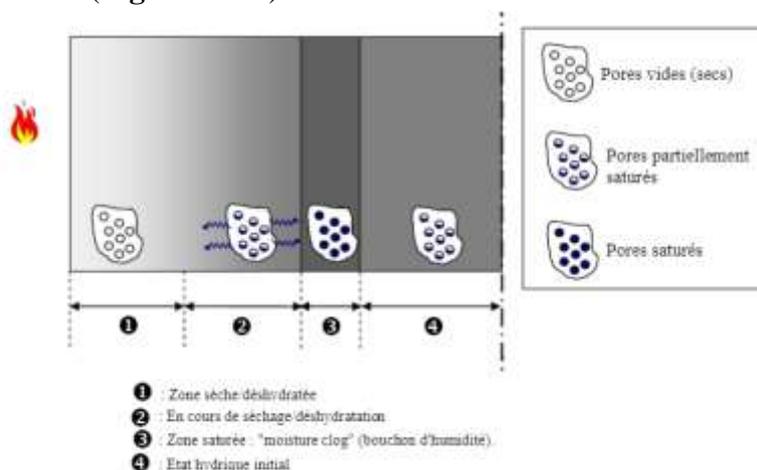


Figure II.13. Deuxième phase du processus thermo-hydrrique : condensation de la vapeur dans les zones froides et formation d'une barrière étanche (zone saturée), illustration reprise de [Mindeguia J.C., 2009].

Provoquant ainsi une augmentation des pressions de vapeur d'eau. Dès lors que la barrière se forme, la vapeur d'eau ne peut plus s'évacuer que vers la surface chauffée du matériau. A l'intérieur d'un pore, une fois que le flux des sources responsables de la génération de pression de vapeur (transport d'eau et de vapeur des pores voisins et déshydratation des CSH) est inférieur au flux de vapeur s'évacuant vers la surface chauffée, les pressions de vapeur diminuent [Lottman B.B.G., 2007]. La Figure II-14 présente les mesures expérimentales de pressions de vapeur au sein d'un échantillon de béton chauffé [Kalifa P. et al., 2001].

Nous pouvons observer la phase de génération de pressions de vapeur d'eau qui est pilotée à l'intérieur des pores par la loi de pression de vapeur saturante $p_{vsat}(T)$. Dans un second temps, nous pouvons observer la phase de diminution des pressions qui est pilotée par l'état de séchage et de déshydratation du matériau.

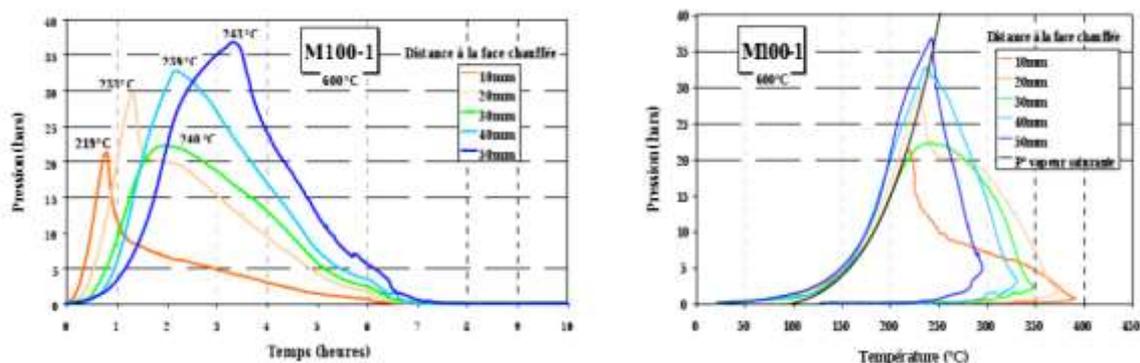


Figure II.14. Mesures de pression de vapeur dans une éprouvette de béton à hautes performances selon [Kalifa P. et al., 2001]. A gauche, évolution de la pression en fonction du temps : première phase d'augmentation de la pression suivie d'une phase de diminution. A droite, évolution des pressions mesurées en fonction de la température : les pressions suivant la courbe de pression de vapeur saturante.

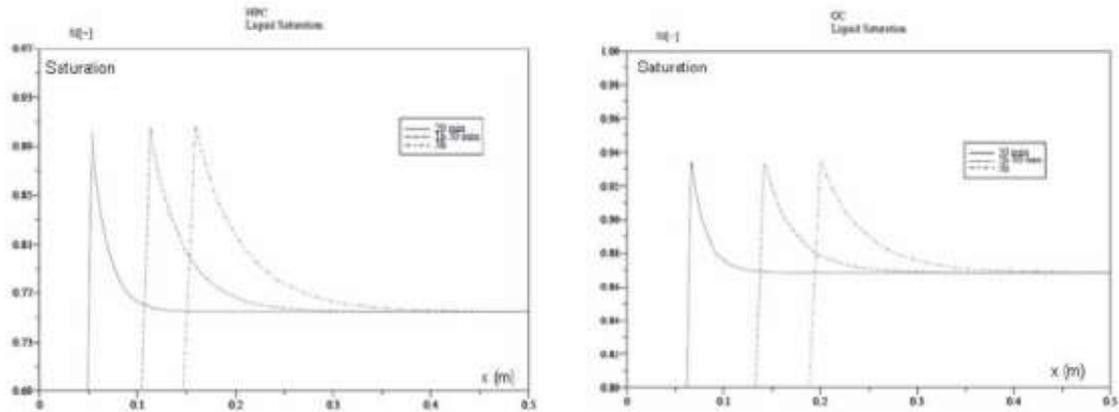


Figure II.15. Simulations du profil de teneur en eau dans un béton chauffé à différents temps de calcul [Msaad Y., 2005]. Béton à haute performance à gauche et béton ordinaire à droite. Le pic de teneur en eau correspond à la formation de la barrière étanche.

La mise en évidence de la création de la barrière étanche (ou zone saturée en eau liquide) est délicate en raison des difficultés liées à la mesure du champ de teneur en eau du béton sous chauffage transitoire. Quelques techniques expérimentales tentent toutefois d'étudier les mouvements d'eau dans le béton chauffé. Pour le lecteur intéressé, ces techniques sont présentées plus en détail dans [Watanabe K., 1998].

Par une technique de spectrométrie à rayons gamma (généralement utilisée dans la détermination de la teneur en eau des sols), [Kalifa P. et Menneteau F.D., 2000] ont mis en évidence la formation d'un front de séchage / déshydratation dans une éprouvette de béton chauffée d'un seul côté. Ils ont estimé la vitesse de déplacement de ce front (vers les zones froides du matériau) à 13mm.h^{-1} . Toutefois, l'existence d'une zone saturée n'a pas été mise clairement en évidence (Figure II-16).

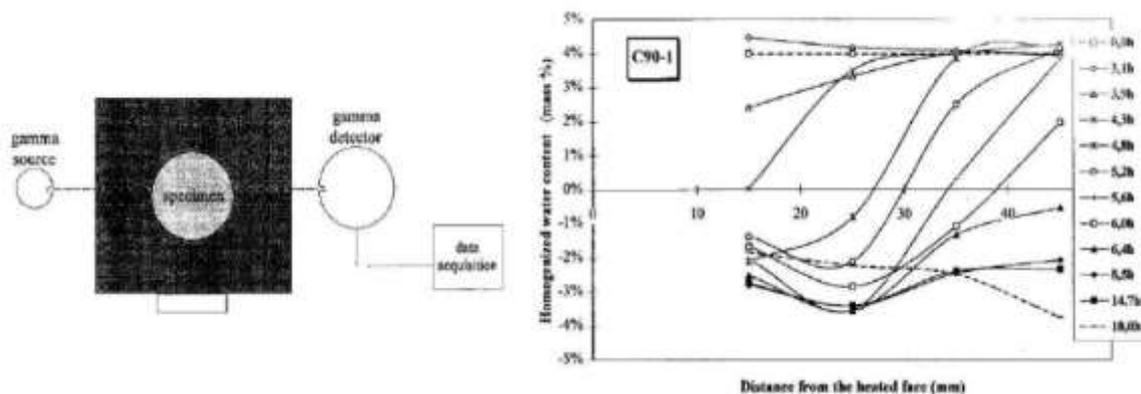


Figure II.16. Schéma du dispositif de mesure du champ de teneur en eau d'une éprouvette en béton par spectrométrie à rayons gamma. A droite, profils de teneur en eau mesurée sur une éprouvette de béton à haute performance à différents instants de chauffage [Kalifa P. et Menneteau F. D., 2000]. 0 % sur l'axe des ordonnées correspond au béton sans eau libre.

Par une technique de résonance magnétique nucléaire, **Van Der Heijden et al. [2007]** ont également mis en évidence la pénétration d'un front de séchage / déshydratation au sein d'une éprouvette de béton chauffée d'un seul côté. Ces essais ont permis d'estimer la vitesse de ce front à 12.5 mm.h^{-1} , soit une valeur très proche de celle de **[Kalifa P. et Menneteau F.D., 2000]**. Cependant, leurs résultats ne permettent pas non plus de mettre en évidence la création d'une zone saturée (**Figure II-17**).

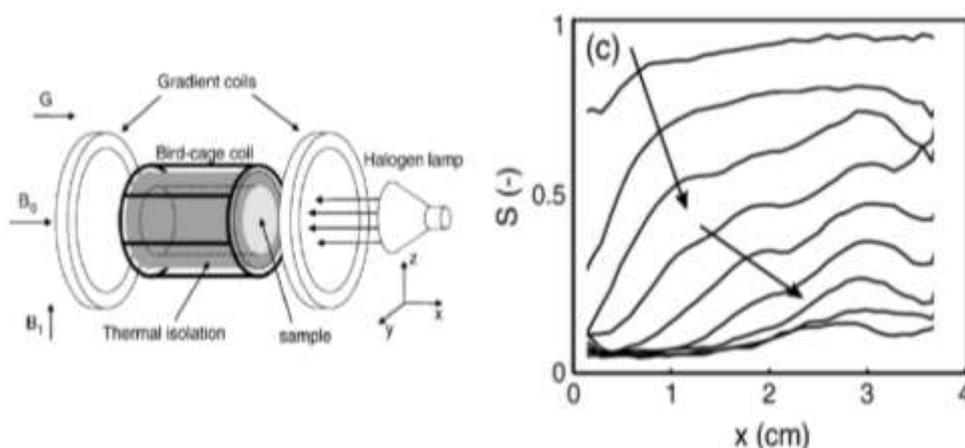


Figure II.17. Schéma du dispositif de mesure du champ de teneur en eau d'une éprouvette en béton par résonance magnétique nucléaire. À droite, profils de teneur en eau mesurée sur une éprouvette de béton à différents instants de chauffage [Van Der Heijden et al., 2007]

Selon certains auteurs **[Harmathy T.Z., 1964 ; Thelandersson S., 1974 ; Ahmed G. N. et J. P. Hurst, 1997 ; Anderberg Y., 1997 ; Phan L.T., 2002]**, les contraintes de traction ainsi engendrées sont responsables du déclenchement de l'instabilité thermique du béton, aux endroits où elles dépassent la résistance en traction du matériau (qui de plus semble diminuer avec l'élévation de la température), comme cela est schématisé sur la **Figure II-18**.

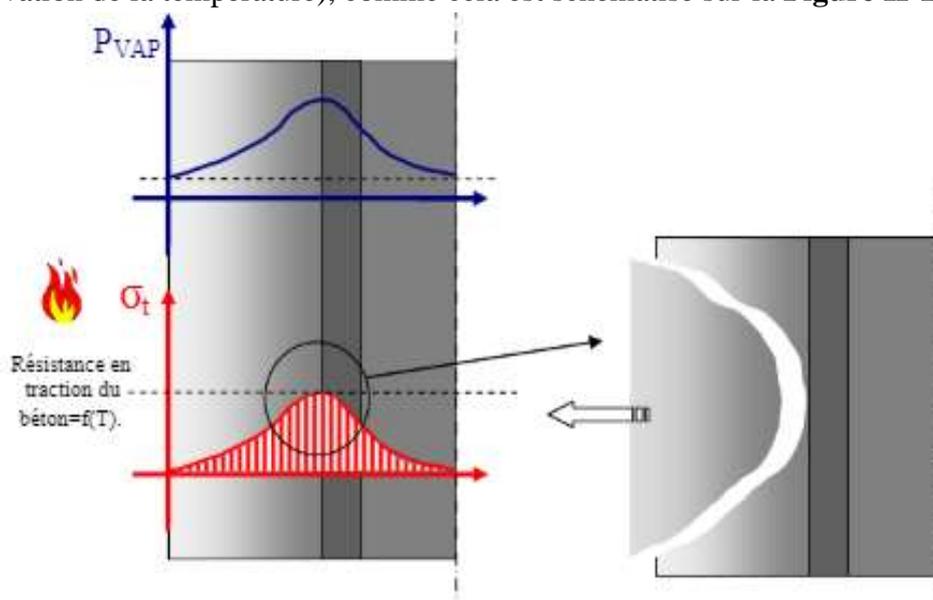


Figure II.18. Mécanisme thermo-hydrrique d'instabilité thermique par dépassement de la résistance en traction du béton, illustration reprise de [Mindeguia J.C., 2009].

Partant de l'hypothèse selon laquelle une barrière quasi-étanche se forme à quelques centimètres de la surface chauffée du béton, certains auteurs, et en particulier [Khoylou N. et England G. L., 1996], attribuent le risque d'instabilité thermique à la génération de contraintes de traction dans le squelette solide non pas par l'intermédiaire des pressions de vapeur mais par l'intermédiaire de l'eau liquide.

Selon ces auteurs, pour un pore considéré fermé et sans risque de fissuration, l'augmentation de la température augmente le degré de saturation du pore en raison de la forte dilatation volumique de l'eau liquide par rapport au squelette solide.

La saturation totale du pore est donc fort probable sous l'effet de la chaleur (les auteurs montrent qu'une saturation initiale de pore de seulement 32% est suffisante pour obtenir une saturation de 100% sous le seul effet du chauffage). La faible compressibilité de l'eau liquide induit alors des contraintes de traction élevées dans le solide, qui peuvent, si elles dépassent la résistance en traction du matériau, provoquer l'instabilité thermique.

La Figure II-19 présente l'évolution des contraintes générées dans un pore en fonction de la saturation initiale et du type de béton. Nous constatons que dans le cas d'un béton à hautes performances, les contraintes générées sont très élevées en raison de la faible porosité d'un tel matériau.

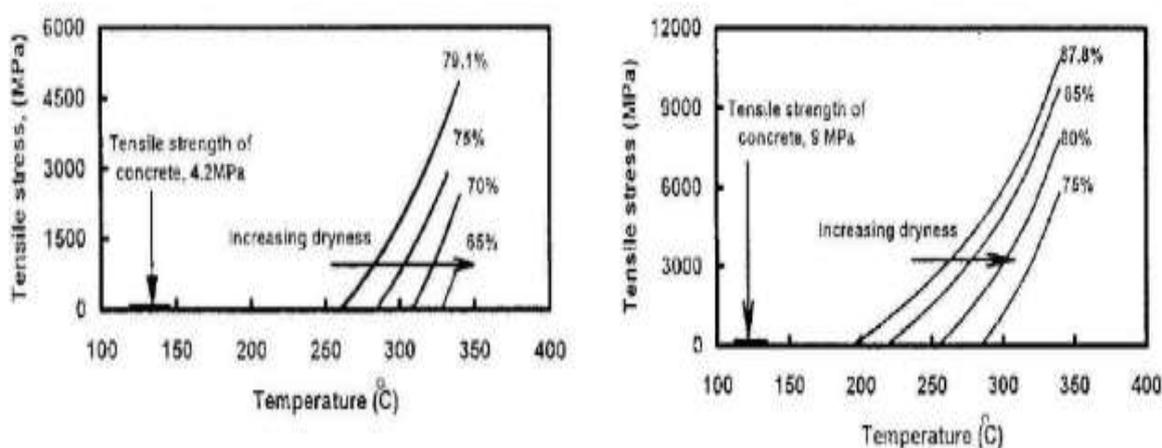


Figure II.19. Estimation numérique des pressions dans un pore sous l'effet de l'expansion de l'eau liquide selon [Khoylou N. et England G. L., 1996]. A gauche dans le cas d'un béton ordinaire, à droite dans le cas d'un béton à hautes performances. Les courbes de pression sont calculées pour différents niveaux de saturation initiale.

II-4-2-3- Le couplage thermo-hydro-mécanique

Chaque hypothèse précédemment évoquée, prise individuellement n'est pas totalement satisfaisante. L'idéal est de considérer les deux phénomènes en parallèle, l'effet de pression de vapeur et celui du gradient thermique. Ainsi certains modèles supposent un couplage thermohydro-mécanique afin de prédire les instabilités thermiques, comme Ožbolt J. [2009], Gawin D. [2003] et Meftah F. [2009]. Ces modèles semblent représenter plutôt bien des expériences déjà réalisées mais le caractère prédictif du modèle reste encore à vérifier.

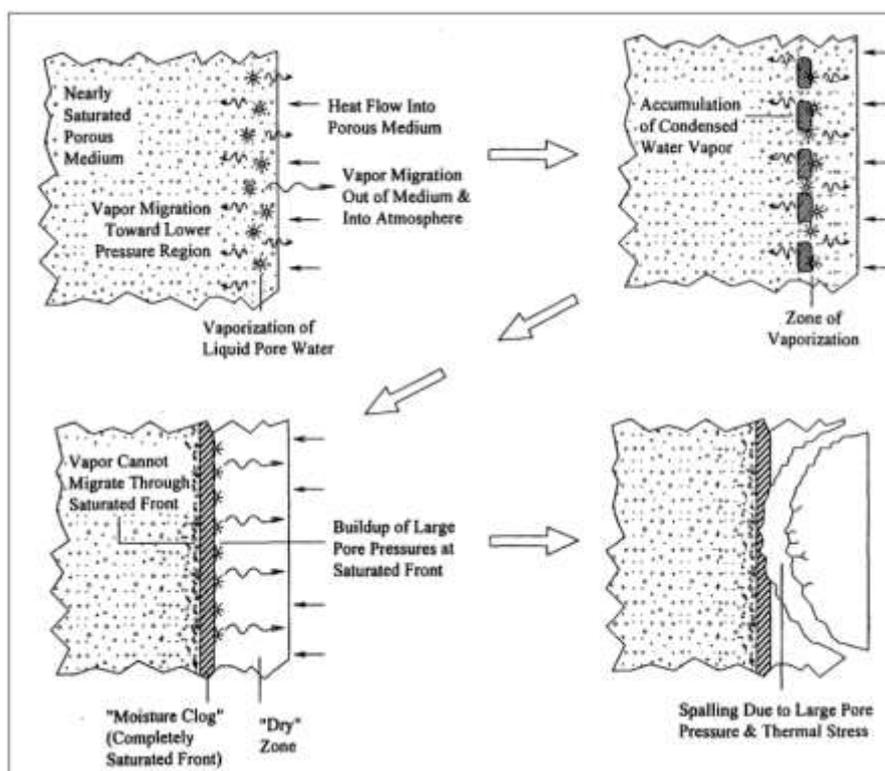


Figure II.20. Séquences d'éclatement du béton [Toumi B., 2010].

II-4-3- Paramètres favorisant l'instabilité thermique

Plusieurs paramètres peuvent influencer l'éclatement du béton. Une des causes principales de l'instabilité thermique du béton est la pression de vapeur dans les pores [Phan L.T. & Carino N.J., 2001].

- **Teneur en eau** : elle joue un rôle principal dans la formation de pression de vapeur. Des travaux de recherche de [Hertz K.D., 2003], montrent qu'une teneur en eau massique inférieure à 3-4% limiterait le risque d'éclatement. Li *et al.* [Li M. *et al.*, 2004] ont montré, dans le cadre de travaux de l'influence de teneur en eau sur l'endommagement de BHP, une faible fissuration sur des échantillons de teneur en eau inférieure à 2.6%.

- **Propriétés physico-mécaniques du matériau (densité, perméabilité, résistances)** : les travaux de [Kanema T.M, 2007, Phan L.T. & Carino N.J., 2001, Anderberg Y., 1997, Consolazio *et al.*, 1998] montrent qu'un BHP caractérisé par un faible rapport Eau/Liant est plus sensible à l'éclatement. La faible perméabilité du BHP rend difficile le transfert de fluide engendrant de fortes pressions de vapeur lors de la montée en température.

- **Vitesse de chauffage** : plus elle est élevée, plus le risque d'instabilité thermique du béton est important. L'échauffement rapide engendre de forts gradients thermiques d'où de fortes contraintes thermiques pouvant entraîner l'écaillage/ éclatement du béton. Des travaux de recherche de [Noumowé N.A., 1995] sur l'instabilité thermique du BHP ont montré qu'à la vitesse de chauffage de 1°C/min, des éprouvettes cylindriques (16x32cm) ont éclaté à une température du surface voisine de 300 – 350°C. A l'inverse des éprouvettes exposées à la vitesse de chauffage de 0.1°C/min n'ont pas éclaté. La faible vitesse de montée en température réduit donc le risque d'éclatement.

- **Taille des éprouvettes** : un effet d'échelle est remarqué sur le comportement de diverses sections d'éprouvettes de béton. Des tests de chauffage réalisés par [Kanema T.M., 2007] sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm et 11x22 cm, ont montré plus d'éclatement avec les éprouvettes 16x32cm. La mesure de la perte de masse des éprouvettes au cours du chauffage a conduit à un séchage plus rapide des échantillons 11x22cm. Cette perte de masse peut atténuer la pression de vapeur et limiter l'éclatement.

- **Nature des granulats** : le comportement des granulats est fortement lié à leur nature chimique et minéralogique. Les granulats siliceux présentent généralement un coefficient de dilatation thermique plus élevé que celui des granulats calcaires [Xing Z., 2011, Mindeguia J.C., 2009, Arupfire, 2005]. En dehors de ces différents paramètres, la présence d'un chargement mécanique, surtout celle de la précontrainte, favorise dans certains cas le phénomène d'éclatement [Diederichs U. *et al.*, 1988, Jahren P.A., 1989].

II-5- Moyens de prévention de l'éclatement

II-5-1- Fibres polypropylène

L'addition de fibres polypropylène est recommandée par l'EUROCODE 2 comme moyen permettant la réduction des risques d'éclatement des BHP, lorsqu'ils sont soumis au feu. Les fibres de polypropylène utilisées fondent durant le chauffage à une température d'environ 170 °C [Noumowe A., 2005 ; Khoury G. A. & Willoughby B., 2008], soit une température inférieure à celles généralement rencontrées au moment de l'éclatement. Des expériences ont montré [Kalifa P. *et al.*, 2001] que les fibres ainsi fondues étaient absorbées par la pâte de ciment durcie (Figure II.21). Un vide est par conséquent créé à l'endroit initial de la fibre, offrant un volume supplémentaire à la vapeur d'eau pour circuler. D'après Khoury G. A., [2008], la fibre n'a pas besoin d'être entièrement fondue pour procurer un nouveau chemin aux gaz du fait de la mauvaise adhésion entre la fibre et la matrice cimentaire (Figure II.22) Les fibres sont employées en quantité de 0.1% à 0.2% du volume du béton.

Ceci correspond à une quantité couramment employée dans le but de la prévention de l'écaillage.

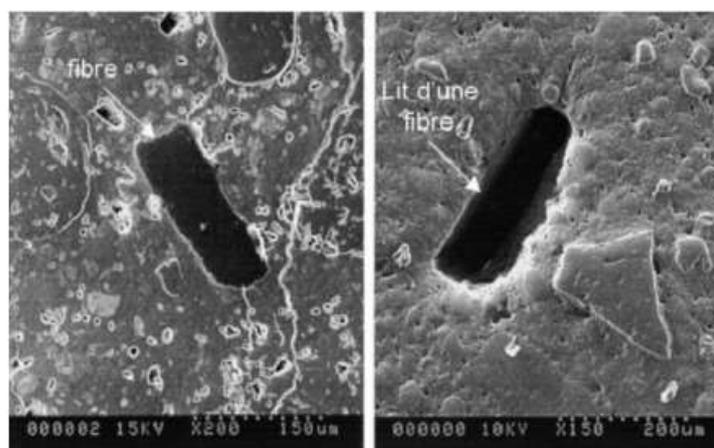


Figure II.21. Observation au MEB d'une fibre de polypropylène dans un échantillon de béton à 20 °C (cliché de gauche) puis après chauffage à 200 °C (cliché de droite). La fibre n'apparaît plus après le cycle de chauffage [Kalifa P. *et al.*, 2001].

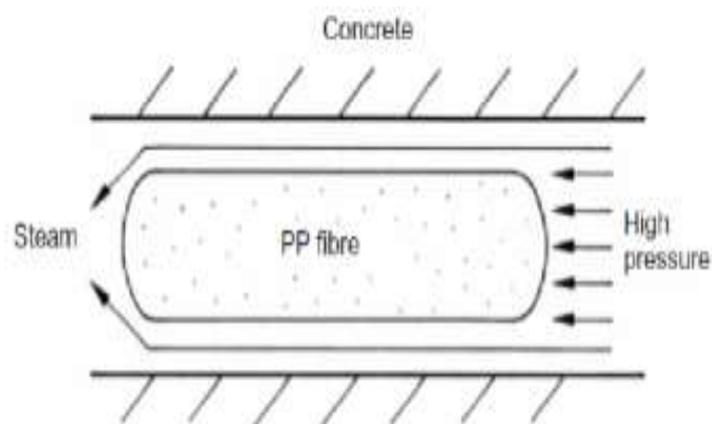


Figure II.22. Représentation simplifiée du passage de la pression de vapeur autour d'une fibre de polypropylène du fait de sa faible adhérence avec le squelette solide [Khoury G. A., 2008].

Sur la **figure II.23**, représentant l'analyse thermique différentielle des fibres polypropylène, les pics sur la courbe correspondent au : point de la fusion (171°C), à la température d'évaporation (341°C), et de carbonatation (457°C). Les fibres fondent à 171°C et sont absorbées totalement ou partiellement par le réseau poreux de la matrice cimentaire. A 341°C le polypropylène se vaporise. Rappelons que les éclatements se produisent à des températures comprises entre 190-260°C. L'incorporation des fibres diminue significativement les valeurs des pressions et diminuent la température de l'apparition des pics de la pression (180-200°C).

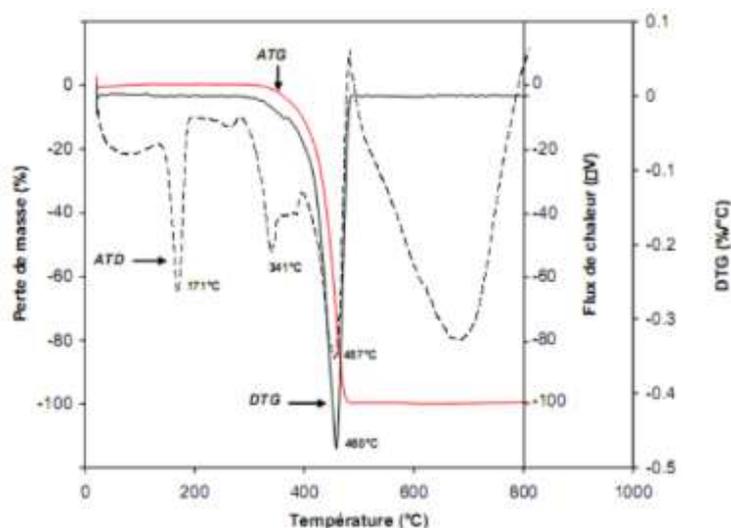


Figure II.23. Les courbes ATD et DTG pour les fibres polypropylène [Kalifa P. et al., 2000]

La fonte des fibres s'accompagne également de fissures (observations au MEB, **Figure II.24**). Ceci peut s'expliquer par le fait que les fibres se dilatent de 10% en fondant, ce qui peut générer des contraintes et par la suite une formation de fissures [Kalifa P. et al., 2001].

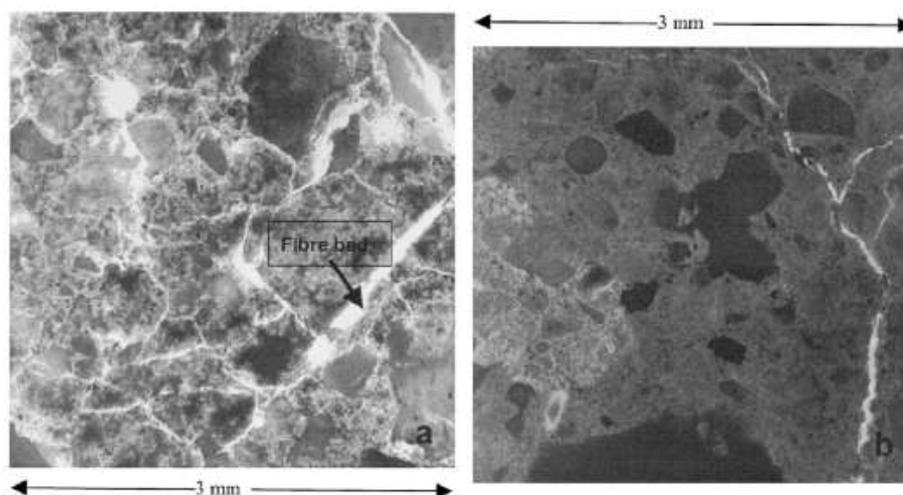


Figure II.24. Observation en épi-fluorescence d'un béton fibré (à gauche) et non fibré (à droite) après chauffage à 400 °C selon Kalifa P. et *al.* [2001]. Les zones les plus claires correspondent aux fissures.

L'étude de Kalifa P. et *al.* [2001] a montré que l'utilisation des fibres en quantité d'environ 0.2 % du volume permet de réduire efficacement les pressions internes. L'ajout de 1.75 kg/m² entraîne une réduction de 70% de la valeur de la pression maximale observée au cours d'essais sur un béton de référence sans fibres. Il a été noté que l'effet des fibres n'augmente pas significativement lorsque le taux des fibres est supérieur à 1.75 kg/m³ [Kalifa P. et *al.*, 2000] et [Kalifa P. et *al.*, 2001]. La Figure II.25 met en évidence le rôle favorable de l'ajout de fibres de polypropylène.

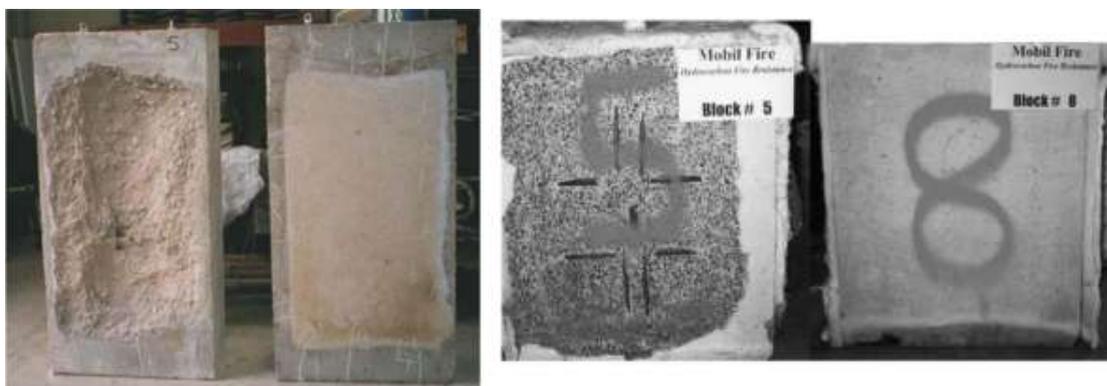


Figure II.25. Deux illustrations expérimentales de l'efficacité de fibres de polypropylène vis-à-vis du risque d'instabilité thermique du béton (pour chaque photo, à gauche formulation sans fibres, à droite formulation avec fibres) [Shuttleworth P., 2001] et de [Bilodeau A. et *al.*, 2004].

II-5-2- Protection thermique

La protection thermique est une protection rapportée sur l'ouvrage, dont le rôle est de limiter la température et les gradients thermiques au sein du béton. Il s'agit généralement de plaques d'isolant performant, fixées sur les parties de la structure potentiellement exposées au feu. Nous pouvons citer par exemple l'emploi de silicate de calcium sous forme de plaques

fixées au béton (**Figure II.26**). Une telle solution nécessite du temps pour son installation et peut s'avérer onéreuse si la structure à protéger est très longue.



Figure II.26. Installation d'une protection thermique rapportée sur la dalle d'un tunnel

II-6- Conclusion

Dans ce chapitre on peut conclure que les bétons à haute performance ont une matrice très compacte, cela apparaît de manière positive sur leurs propriétés mécaniques, ainsi que leurs formulations sont en relation de plusieurs facteurs qui influencent sa réussite. Alors que les bétons fibrés à haute performance sont de la même famille en lui incorporant des différents types de fibre.

Le problème majeur de ces bétons c'est l'instabilité thermique à cause des transformations qui interviennent lors de la montée de la température (Matrice cimentaire, granulats, l'interface pâte granulats), qui résultent des différentes formes d'endommagement thermique suivant trois hypothèses d'instabilité thermique.

CHAPITRE III :
L'effet de la monter
de la température sur
les propriétés des
Bétons

CHAPITRE III : L'effet de la monter de la température sur les propriétés des bétons

III-1- Introduction

Malgré l'existence de nombreux résultats expérimentaux et théoriques disponibles dans la littérature, le comportement du béton sous l'action des hautes températures comporte encore des lacunes et les propriétés du béton n'ont pas été pleinement comprises. Des contradictions entre les observations existent et doivent être conciliées.

La compréhension des propriétés du béton sous haute température est essentielle pour améliorer la résistance au feu des structures en béton armé et fournir des informations exactes pour la conception « anti feu » des structures. Des études approfondies sur ce sujet important ont été réalisées antérieurement.

Les diverses études sur le béton exposé à des températures élevées ont été effectuées de manière expérimentale et analytique sur l'importance des différents paramètres afin de fournir des informations essentielles pour l'industrie du béton et améliorer la résistance au feu du béton. Récemment, la recherche a été concentrée sur les effets de couplage des différents paramètres tels que l'accouplement thermo-hygro-mécanique et thermo-chimico-mécanique d'attelage. Dans ce chapitre, nous allons tenter de faire un survol sur la bibliographie traitant l'évolution des propriétés physiques et chimiques des bétons exposés à des hautes températures.

III-2- Comportement des bétons à hautes températures

III-2-1- L'effet sur les propriétés physiques.

III-2-1-1- Perte de masse

Comme nous l'avons vu précédemment, l'évaporation de l'eau, l'hydratation et la déshydratation de la pâte de ciment durant le chauffage de béton, provoquent une variation de sa masse. La Figure III.1, présente une courbe caractéristique de la perte de masse et la courbe de la vitesse de la perte de masse d'un béton chauffé jusqu'à 500°C, selon **Khoury G.A. et al., [1985]**. Sachant que la quantité totale d'eau dans les bétons se situe entre 6 et 9% de la masse de béton, nous pouvons noter que pour un chauffage jusqu'à 500°C, une grande partie de perte de masse se produit entre 150°C et 300°C (jusqu'à 6%). En dehors de cette marge de température ($T < 150^\circ\text{C}$ et $T > 300^\circ\text{C}$), la perte de masse n'excède pas 2%. Une étude récente réalisée par **Kanema M. et al., [2007]** montre un résultat identique à celui présenté par **[Khoury G.A. et al., 1985]**, pour un béton d'une porosité de 10% et une résistance de 65 MPa. Cette évolution de perte de masse et attribuée :

- Au départ de l'eau interstitielle (libre) existante dans le béton, pour des températures inférieures à 150°C.
- A la décomposition des hydrates de ciment qui représente environ 65% et 80% de la quantité totale d'eau dans le béton, pour des températures comprises entre 150°C et 300°C.

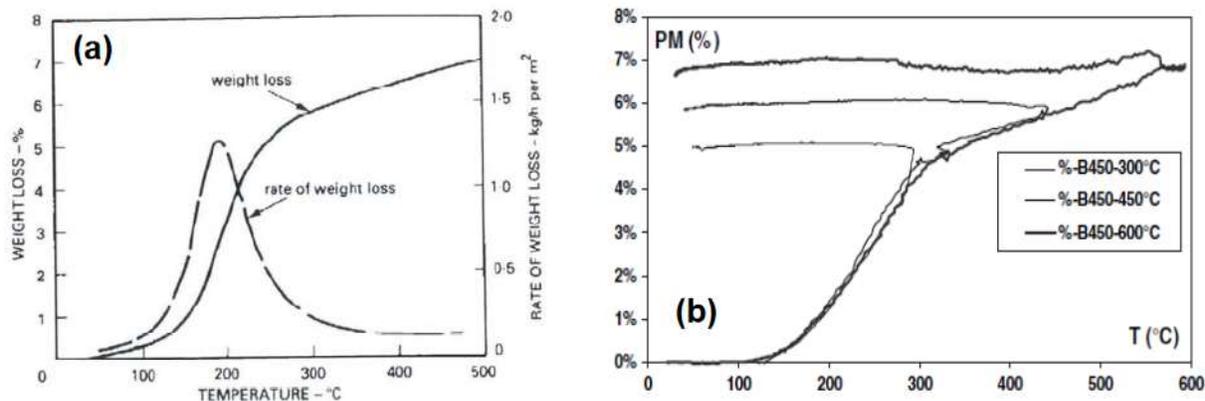


Figure III.1. (a) : perte de masse en fonction de la température selon Khoury 1985 [Khoury G.A. et al., 1985]. (b) : la perte de masse en fonction de la température selon [Kanema M. et al., 2007]

Notons qu'un résultat de perte de masse est lié à la méthodologie expérimentale utilisé. Deux paramètres sont importants : la taille des échantillons et la vitesse de chauffage. [Hager I.G., 2004] a montré que pour un séchage à 105°C jusqu'à poids constant, le temps de séchage est de 15 jours pour un échantillon cylindrique de dimensions, en mm, 104x60, alors qu'il est de 60 jours pour un cylindre de 104x300, donc le temps de séchage est 4 fois plus important pour une hauteur 5 fois plus grande. L'auteur a présenté une perte de masse de trois échantillons avec différent prétraitement (Figure III.2), un pré-séché à 105°C, le deuxième pré-séché à 80°C et le troisième sans pré-séchage préalable, les échantillons ont été chauffés jusqu'à poids constant. Il a constaté que les courbes de perte de masse des bétons pré-séchés sont très proches et qu'aucune perte de masse n'est enregistrée avant 200°C. On constate que la perte de masse n'excède pas 1,2% pour les bétons pré-séchés, alors qu'elle est de l'ordre de 4,21 % pour le béton sans pré-séchage. La Figure III.3.a présente la perte de masse et la vitesse de perte de masse en fonction de la température et les processus associés à chaque période. La vitesse d'échauffement étant de 1°C/min.

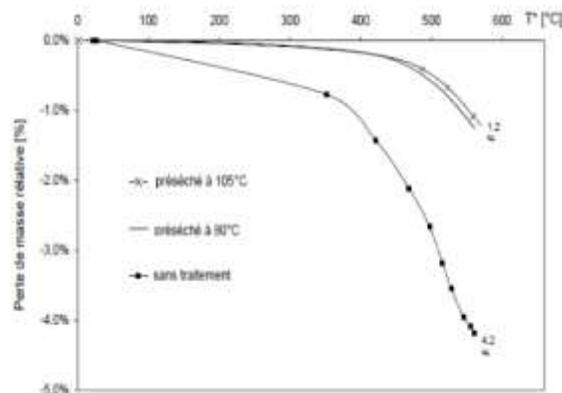


Figure III.2. La perte de masse des BHP (M100C), pré-séchés et sans prétraitement, chauffés à 600°C [Hager I.G., 2004].

La perte de masse en régime transitoire de la température commence par la perte de l'eau capillaire présente dans la couche externe du matériau. Cependant, lors du chauffage, l'eau liquide et la vapeur d'eau se mettent en mouvement et migrent vers la zone plus froide du béton. La vapeur d'eau traversant les couches plus froides du matériau se condense partiellement. Dans les matériaux à faible perméabilité tels que les BHP, le transfert de masse est plus lent, d'autant plus lent qu'il est limité par la création d'une couche saturée. Cette zone saturée constitue un obstacle peu perméable à la vapeur d'eau et l'air [Hager I.G., 2004]. Selon [Hager I.G., 2004], les pics sur la **Figure III.3.b** sont dus à la perte d'eau libre et d'eau capillaire présentes dans le béton. La température de 300°C peut être considérée comme la fin de la migration d'eau évaporable [Hager I.G., 2004]. A partir de cette température la vitesse de perte de masse ralentie, ce résultat est similaire à celui présent précédemment par [Khoury G.A. et al., 1985] et [Kanema M. et al., 2007]. Cependant la diminution de la masse continue à cause de la déshydratation du gel CSH et de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

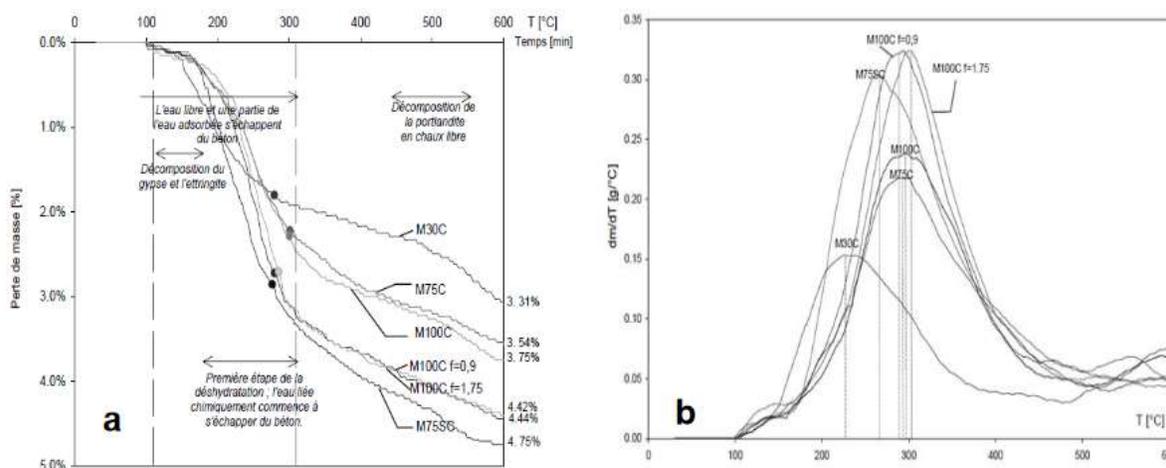


Figure III.3. Perte de masse (à gauche) et la vitesse de perte de masse (à droite) en fonction de la température, bétons chauffés jusqu'à 600°C [Hager I.G., 2004].

[Zhang B., 2011], a montré qu'à chaque fois la température de séchage est élevée, la perte de masse est plus rapide. La **Figure III.4** présente l'influence de la température de séchage sur la perte masse. Nous pouvons noter que, dans un premier temps, la vitesse de séchage est lente, (entre 105°C et 200°C). Ensuite la vitesse de perte de masse augmente progressivement jusqu'à ce qu'elle se stabilise (entre 300°C et 450°C) [Haniche R., 2011].

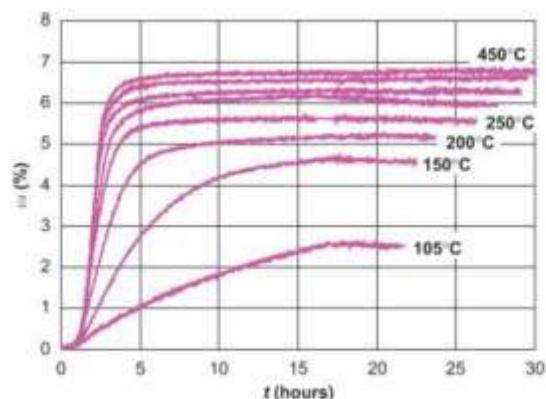


Figure III.4. Perte de masse en fonction de la température et de temps, d'après [Zhang B., 2011].

[Belaribi H., 2019], a noté que d'une manière générale, la perte de masse relative est moins importante pour les bétons formulés avec un faible rapport E/C puisqu'ils contiennent moins d'eau, le contraire si plus le rapport E/C de la formulation est fort et plus la quantité d'eau perdue est importante ainsi la perte de masse est importante [Kanéma M., 2007]. Avec l'ajout de fibres métalliques, la perte de masse diminue par rapport à celle du béton sans fibres [Pilya P., 2010] à cause de remplacement d'une partie des granulats par les fibres métalliques a donc diminué la quantité d'eau libre ou adsorbée **Figure III.5.**

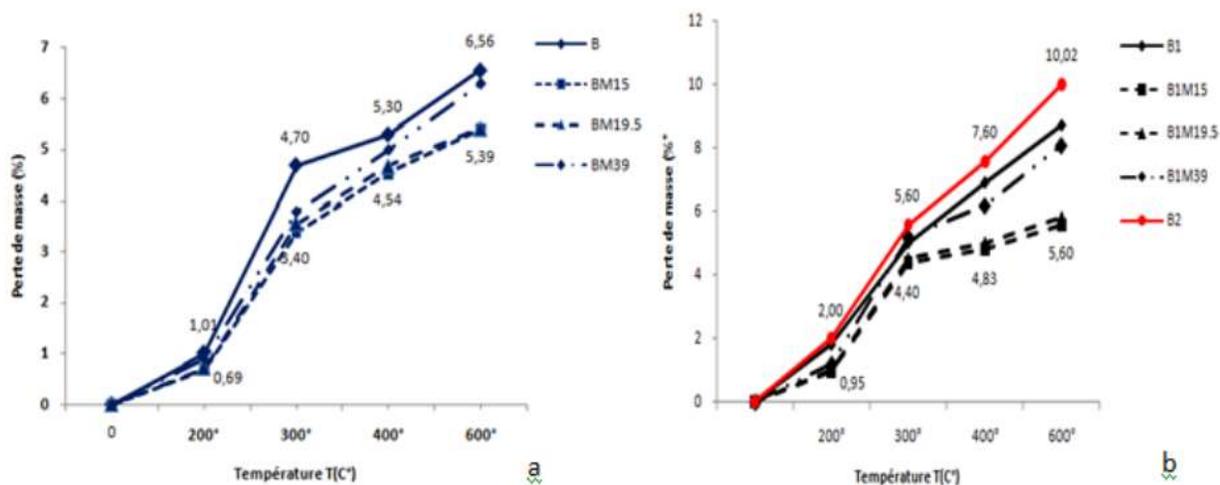


Figure III.5. Evolution de la perte de masse en fonction de la température du cycle de chauffage refroidissement pour (a) des bétons à haute performance sans fibres B et avec des fibres métalliques BM15, BM19.5 et BM39 (b) le béton sans fibres B1 et B2 et les bétons avec des fibres métalliques, B1M15, B1M19.5 et B1M39 [Belaribi H., 2019].

[Nonna Y., 2015], a constaté que la perte de masse des bétons fibré (FPP+FM) est supérieure à celle des bétons fibré (FM). Cela s'explique notamment par la teneur en eau libre volumique des éprouvettes avant chauffage et aussi, probablement, par un effet favorable des FPP pour le

transport d'humidité **Figure III.6**, cette constatation été confirmé par [Saadi I., 2017]. Alors que [Bouaziz L., 2015], a étudié la perte pour les deux types de fibre et elle a conclus que pour les bétons de FPP marquent une augmentation de la perte de masse légèrement supérieure à celle des bétons sans fibres et à celle des bétons de fibres métalliques et cela pour les différentes températures. Le béton association de fibres subit une perte de masse plus grande par rapport à celle des bétons de fibres métalliques.

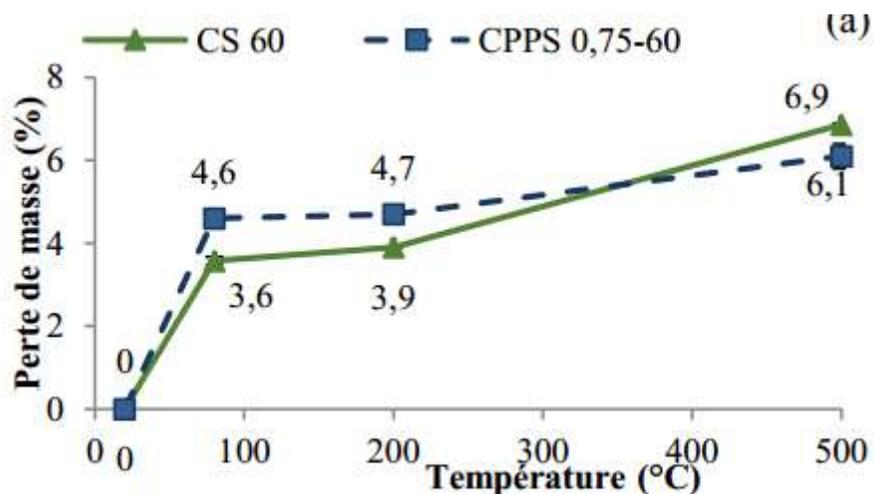


Figure III.6. Evolution de la perte de masse des bétons en fonction du cycle de chauffage – refroidissement [Nonna Y., 2015].

III-2-1-2- La masse volumique (absolue et apparente)

[Haniche R., 2011], a remarqué que d'une manière générale, la masse volumique apparente des deux compositions de bétons baisse en fonction de la température de chauffage. Le comportement est similaire pour les deux bétons [Figure III.7 et III.8]. La perte de masse volumique est de l'ordre de 3.5% pour les deux bétons étudiés à 450°C. La masse volumique apparente du béton à hautes performances B2 reste toujours supérieure à celle du béton ordinaire B1 quel que soit le cycle de chauffage. La baisse de masse volumique apparente est attribuée à la perte de l'eau liée et à l'augmentation du volume du béton.

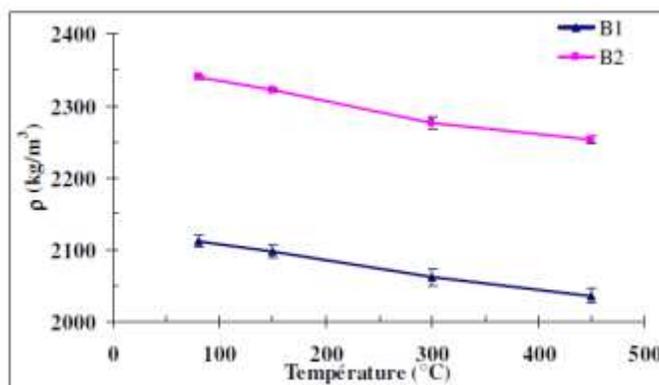


Figure III.7. Masse volumique apparente en fonction de la température

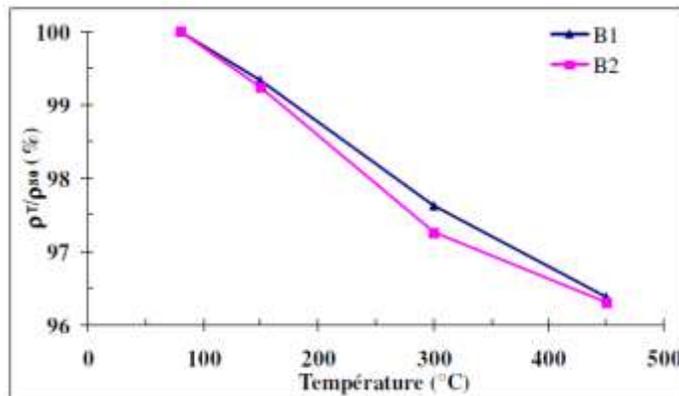


Figure III.8. Masse volumique relative en fonction de la température

[Chouiter Y., 2016], a remarqué que la masse volumique diminuée avec l'incorporation des fibres de verre dans les bétons d'une façon similaire pour tous les bétons et à n'importe quelle longueur. Un écart d'ordre 14.96, 13.48 et 15.97% entre le béton témoin et BHP6, BHP12 et BHP18 respectivement. On peut expliquer cette diminution de la masse volumique par le remplacement d'une quantité du béton (généralement de masse volumique d'ordre 2.5 (t/m³) par les fibres de verre à faible masse volumique **Figure III.9**.

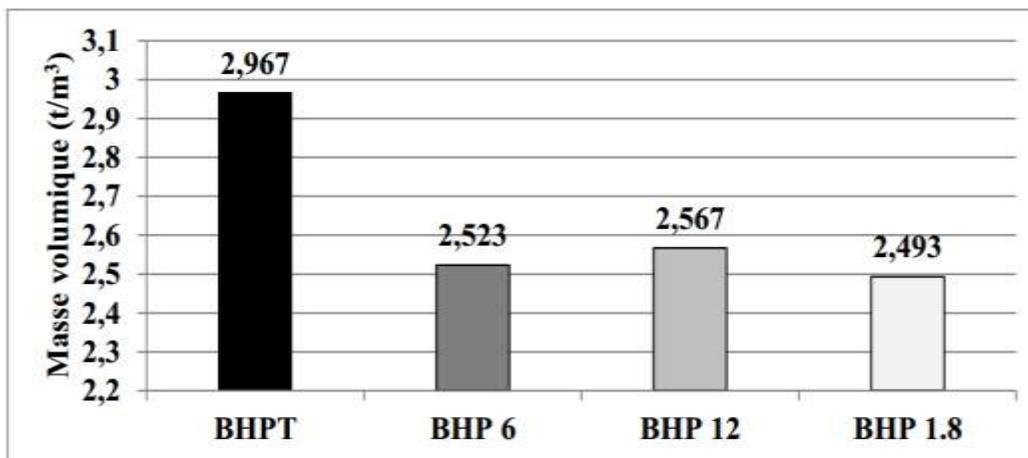


Figure III.9. Variation de la masse volumique à l'état frais en fonction du dosage de fibre verre.

III-2-1-3- La perméabilité (à gaz et à l'eau)

a) Influence de la température et du séchage

La perméabilité et la diffusivité sont les plus importantes propriétés de ce type pour les matériaux cimentaires. Elles sont sensibles aux changements de température, de porosité et aux phénomènes de microfissuration. Pour des températures comprises entre 30 et 120 °C, l'évaporation de l'eau (eau libre et adsorbée) présente dans le béton est la cause principale des changements de sa microstructure (les espaces occupés par les molécules d'eau deviennent vides).

La deuxième cause de l'augmentation de la perméabilité lors de l'exposition à des températures élevées est la formation des microfissures dans le béton (pour des températures supérieures à 200°C), il est montré que la distribution des tailles des pores est caractérisée par un pic qui s'élargit à une taille plus grande quand la température augmente. Plusieurs recherches ont été menées sur l'évolution de la perméabilité des bétons en fonction de la température [Zeiml M. et al., 2006], [Zeiml M. et al., 2008], [Kalifa P. et al., 2001], [Kanema M. et al., 2007], [Liu X. et al., 2008], [Noumowe A. N. et al., 2009], [Mindeguia J. C., 2009] et bien d'autre. En effet la majorité des résultats de la littérature montrent que la température peut endommager la structure poreuse et que la perméabilité augmente proportionnellement avec la température. La **Figure III.10** montre quelques résultats obtenus par [Mindeguia J. C., 2009] sur les bétons à haute performance B60 (60MPa). Selon l'auteur, une augmentation de 62% de la perméabilité a été constatée à 250°C. Alors qu'à 400°C l'augmentation est de l'ordre de 98% [Haniche R., 2011].

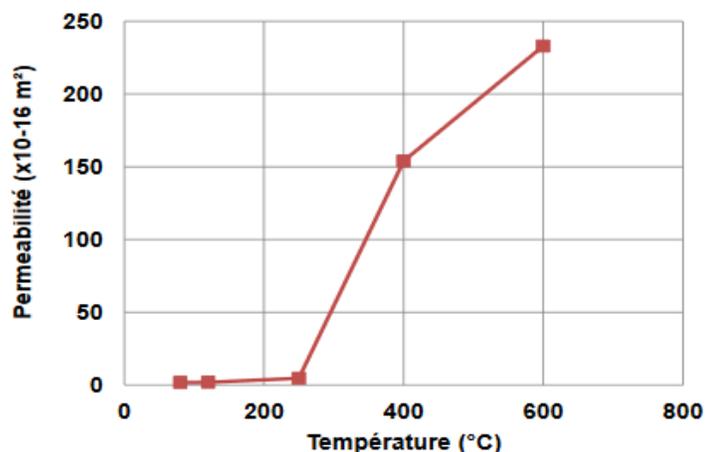


Figure III.10. Variation de la perméabilité des bétons sans fibre en fonction de la température : valeur tiré de [Mindeguia J. C., 2009]

Il a été démontré que les flux utilisent le chemin le plus grand et le plus droit (qui est le mieux connecté et moins tortueux) [Katz A.J. & Thompson A.H., 1986], [Charlaix E. et al., 1987] cité par [Kalifa P. et al., 2001], et que la perméabilité est contrôlée par le plus petit lien de ces chemins connectés [Haniche R., 2011].

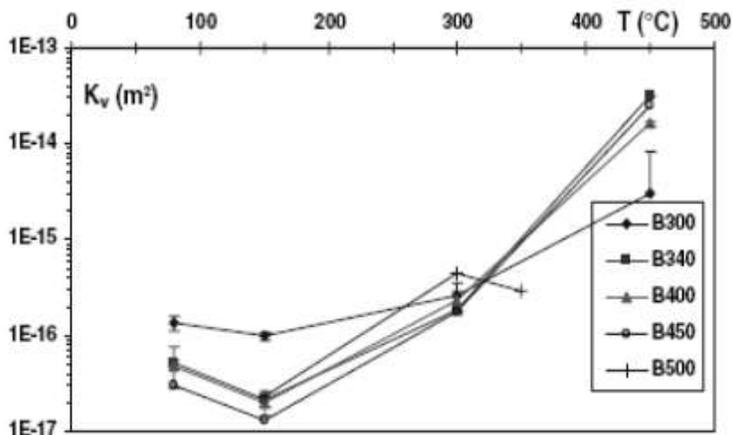


Figure III.11. Perméabilité en fonction de la température [Kanema M. et al., 2007].

[Poon C.S. et al., 2001] ont rapportés que tous les spécimens de béton à haute performance ont montrés une très faible perméabilité à 20 °C. Toutefois, au fur et à mesure que la température augmente, une importante perte de l'imperméabilité (2500-9000% à 800 °C) a été observée, et il a montré [Poon C.S. et al., 2003] que la perte de l'imperméabilité (2000-10700%) a été probablement due à la fissuration interne et à l'augmentation de l'épaisseur de la structure des pores de béton à hautes températures. [Janotka I. & Bagel L., 2003] ont indiqués que la perméabilité des bétons a augmenté rigoureusement avec l'augmentation de la température. [Noumowe A. N. et al., 2009] ont confirmés les résultats obtenus précédemment Figure III.12, pour un BHP de référence la perméabilité est multiplié par un coefficient de 2400 entre 20 et 600 °C, en revanche pour un BHP avec des fibres le coefficient égale à 2223 et égale à 57 pour un BHP avec des agrégats légers [Haniche R., 2011].

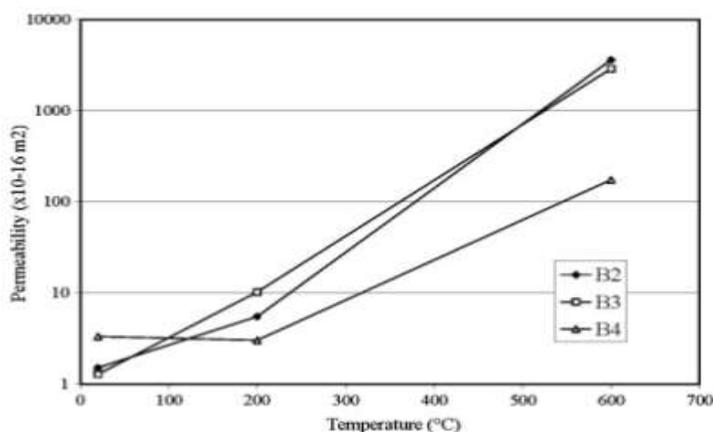


Figure III.12. Augmentation de la perméabilité pour trois types de BHP en fonction de la température [Noumowe A. N. et al., 2009].

b) Effet des fibres de polypropylène sur la perméabilité

Une étude menée par **Hager I.G., [2004]** montre que l'utilisation des fibres de polypropylène de longueur différente (6,12 et 19 mm) a un léger impact sur la perméabilité résiduelle, l'utilisation de 0.9 kg/m^3 de fibre de 12 mm de long a multiplié la valeur de perméabilité par 12 par rapport à sa valeur initiale quand le béton est chauffé à 200°C . Alors que, quand le dosage est doublé ($1,8 \text{ kg/m}^3$) un facteur de 45 est enregistré. Pour les fibres de 19 mm de long, la perméabilité est supérieure à celle mesuré avec de fibres de 12mm de long, mais le dosage n'a pas un impact aussi important que celui des fibres de 12mm sur la perméabilité [**Hager I.G., 2004**].

[**Kalifa P. et al., 2001**], a montré, dans une étude sur l'influence du dosage des fibres sur la perméabilité des bétons, que les bétons fibrés ont un comportement complètement différent par rapport à celui des bétons sans fibres : la perméabilité résiduelle dans le cas de béton fibré suit une progression de type logarithmique avec la température. Cette tendance est plus marquée pour un dosage égal à 3 kg/m^3 ce qui explique que la perméabilité "k" est multiplié par près de 600 entre 80°C et 200°C (voir **Figure III.13**). Cela signifie que l'augmentation de la perméabilité est essentiellement contrôlée par les fibres dès qu'elles fondent. Pour des températures inférieures à 200°C , selon [**Kalifa P. et al., 2001**] la perméabilité est influencée par les fibres et le départ d'eau libre et adsorbée. En revanche au-delà de 200°C la perméabilité est beaucoup plus influencée par la fissuration et la quantité de fissures que par les fibres de polypropylène (**figure III.13**).

[**Noumowe A. N. et al., 2009**], ont montrés que l'effet des fibres est important, lois de la fusion, pour des températures inférieures à 200°C , puis la perméabilité est beaucoup plus influencée par la fissuration que par les fibres ($T > 200^\circ\text{C}$). La **Figure III.12** présente l'évolution de la perméabilité de trois bétons, un sans fibres (B2), le deuxième avec dosage en fibres de polypropylène (13 mm de long, $150\mu\text{m}$ de largeur et $50 \mu\text{m}$ d'épaisseur) de 2kg/m^3 (B3) et le troisième avec des granulats légers (B4) [**Haniche R., 2011**].

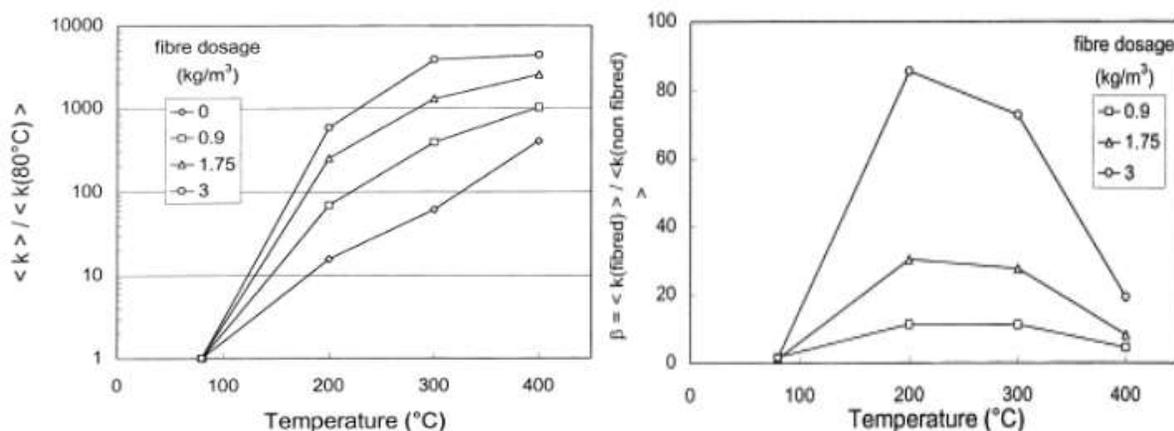


Figure III.13. Influence de dosage des fibres sur la perméabilité [Kalifa P. et al., 2001]

[**Mindeguia J. C., 2009**] a également montré que l'addition des fibres de polypropylène de 2 kg/m^3 , peut augmenter la perméabilité de béton de 6 à 7 fois après leurs fusions ($T > 165^\circ\text{C}$). La

Figure III.14 présente le rapport entre la perméabilité d'un béton fibré et celle d'un béton non fibré [Haniche R., 2011].

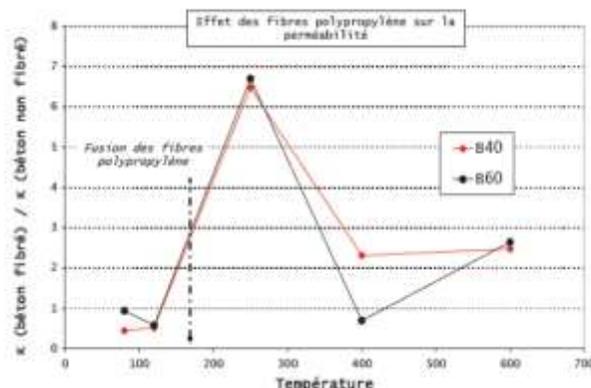


Figure III.14. Effet des fibres de polypropylène sur la perméabilité en fonction de la température [Mindeguia J. C., 2009]

[Nonna Y., 2015], a montré que la perméabilité du béton fibré (FPP+FM) croît plus vite que celle des bétons fibré (FM) et béton de référence sur toute la plage de températures étudiée. A 500°C, le béton contenant les fibres métalliques seules montre une perméabilité plus faible que les deux autres. Dès 200°C, les fibres PP semblent favoriser la connectivité entre les pores. Ce phénomène a été observé par plusieurs auteurs ([Mindeguia J. C., 2009], [Haniche R., 2011], etc.), et a été interprété comme une conséquence de la fusion (160-170 °C) et ensuite de la vaporisation (360-370°C) des FPP. Le béton fibré (FM) a une ouverture de pores plus faible que les bétons fibré (FPP+FM) et béton de référence. Ces plus faibles diamètres de pores peuvent expliquer une moindre connectivité entre les pores et par conséquent limiter l'augmentation de la perméabilité. La seule différence de composition entre ces deux bétons est l'ajout des FPP, qui favorise la création de pores supplémentaires de gros diamètre Figure III.15.

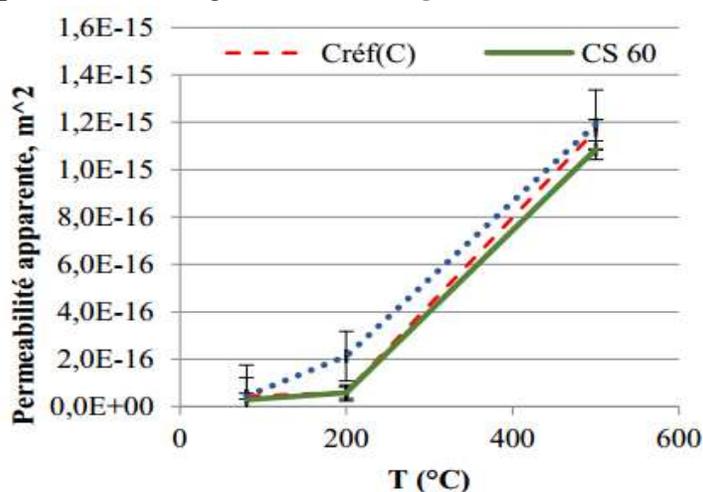


Figure III.15. Evolution de la perméabilité intrinsèque résiduelle des bétons en fonction du cycle de chauffage-refroidissement [Nonna Y., 2015].

III-2-1-4- La porosité

Le béton est composé d'une phase solide et d'un espace poreux, c'est un matériau « bi-phasique ». La porosité totale peut être estimée par saturation d'eau et la porosité capillaire généralement par la porosimétrie au mercure. La porosité est un paramètre important dans la caractérisation de la microstructure et il joue un rôle majeur dans la durabilité de béton. Plusieurs études [Kalifa P. & Tsimbrovska M., 1998], [Noumowe, A., 1995] montrent que la porosité augmente en fonction de la température. Cette augmentation est due en partie à l'augmentation du volume total, de la dimension des pores ainsi qu'à la microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats. Les modifications de la porosité avec l'augmentation de la température ont été étudiées pour plusieurs types de béton par [Schneider U. & Herbst H.J., 1989]. Leurs résultats ont montré que l'évolution de la porosité peut être linéaire avec la température :

$$\eta_T = \eta_0 + A_\eta(T - T_0)$$

Où A_η est une constante dépendant du type de béton [Haniche R., 2011].

Tableau III.1. Valeurs de A_η et η_0 en fonction du type de béton (béton B35).

	Béton silicate	Béton calcaire	Béton basalte
η_0	0,06	0,087	0,0802
$A_\eta [K^{-1}]$	0,000195	0,000163	0,00017

[Saadi I., 2017], a montré que la porosité des BHP avec l'ajout des fibres de polypropylène s'augmente plus vite que celle des BHP sans fibres. La présence de fibres de polypropylène dans le béton chauffé entraîne une augmentation du volume poreux et modifie la cinétique d'apparition de la porosité. La porosité supplémentaire est liée à la quantité de fibres dans le béton. Plus le dosage en fibres augmente, plus il y a de vide qui se crée lors du chauffage, ces résultats confirment ceux de [Chouiter Y., 2016] et [Nonna Y., 2015].

III-2-1-5- L'Absorption

Relativement à la porosité on remarque que les bétons les plus poreux sont aussi les plus absorbant. [Chouiter Y., 2016], a montré que le taux d'absorption augment aussi avec l'augmentation de la température, cela est due à la modification de la microstructure du béton et la création des fissures **Figure III.16**. Il a remarqué aussi que la longueur des fibres influe sur la capacité d'absorption d'eau ; les fibres les plus longs absorbent beaucoup d'eau. Ceci peut être expliqué par les micro-Canales crée par la dégradation des fibres par la température.

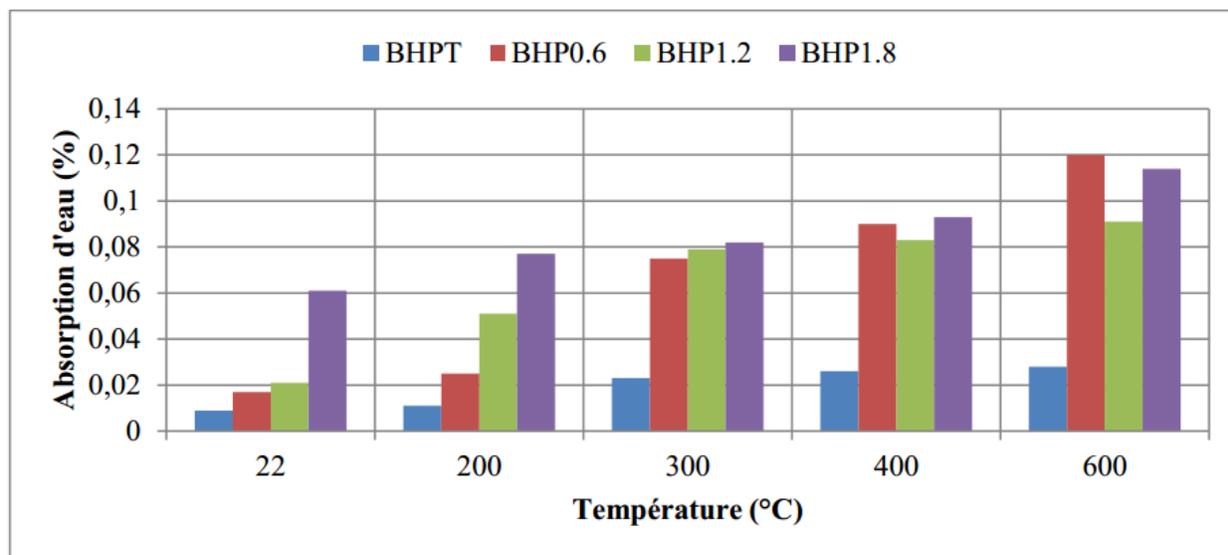


Figure III.16. Variation de l'absorption en fonction la température [Chouiter Y., 2016].

[Toumi B., 2010], a trouvé que les valeurs du taux d'absorption initial l'ISAT progressivement et quasi linéairement avec la température de chauffage allant de 25⁰C à 500⁰C . Cela prouve que l'évolution de l'endommagement du béton dans cet intervalle de température se traduit principalement par l'augmentation de la capillarité et de la perméabilité casées par les changements de phase et par les déformations thermiques du matériau. Dans l'intervalle des températures élevées 500⁰C - 1050⁰C , le taux d'accroissement des valeurs de l'ISAT devient beaucoup plus rapide . A ces températures, la fissuration en surface du béton est plus visible. L'évolution rapide de l'endommagement du béton dans cet intervalle de température résulte d'une dégradation importante du matériau suite aux processus de séchage. De changement des phases, déshydratation et de la décomposition du matériau qui se traduit par une augmentation considérable de la densité de fissuration.

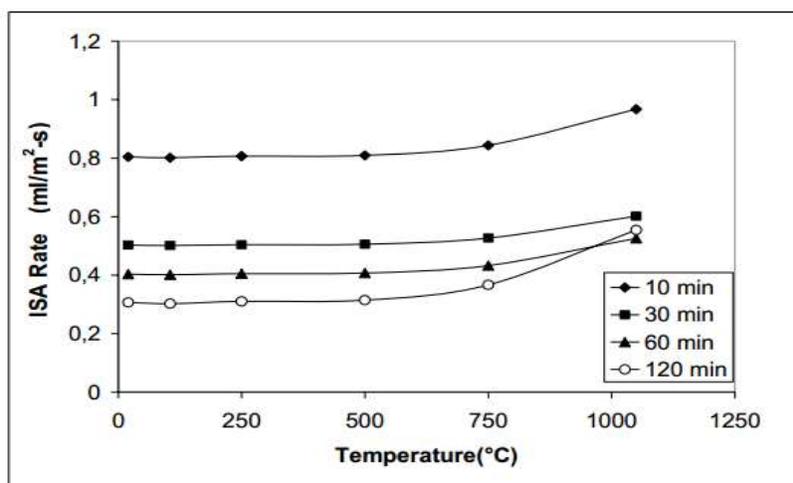


Figure III.17. Variation de l'ISAT en fonction de la température de chauffage (BHP) [Toumi B., 2010].

III-2-2- L'effet sur les propriétés chimiques

Les principaux agents agressifs sont les sulfates et les acides. Les attaques n'étant pas étudiées largement pour des hautes températures.

III-2-2-1- Effet des milieux sulfaté sur les propriétés physiques

[Boutiba A. et al., 2013], ont trouvés que l'Effet des milieux sulfaté sur les propriétés physiques est comme suite :

a- Porosité accessible à l'eau et masse volumique : La porosité ouverte permet d'apprécier l'évolution de l'hydratation et la structuration des produits hydratés, c'est un paramètre primordial pour l'identification des bétons les plus durables [Bessa A., 2004]. Le protocole d'essai de la masse volumique et la porosité accessible à l'eau est conforme aux recommandations du groupe AFREM [Arliquie G. & Hormain H., 2007]. Les résultats de ces essais sont représentés sur la **Figure III.18**.

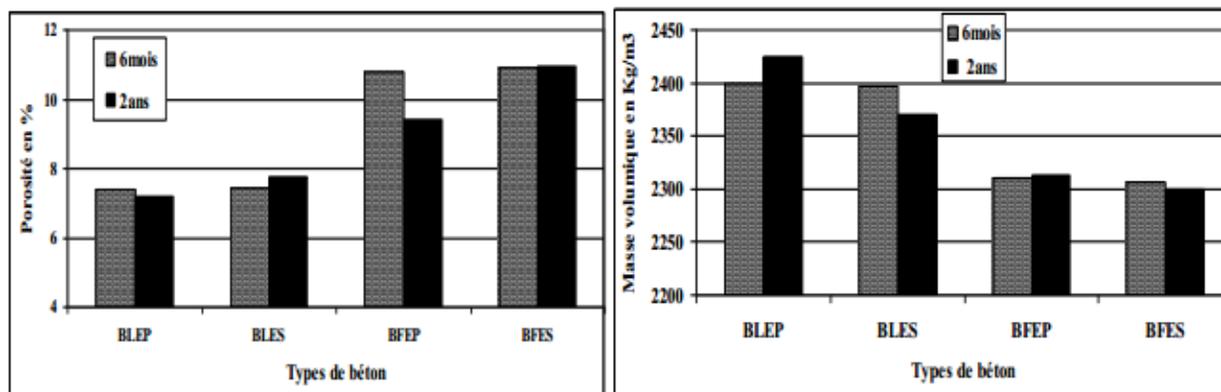


Figure III.18. Variation de la porosité accessible à l'eau et la masse volumique des différents bétons [Boutiba A. et al., 2013].

[Boutiba A. et al., 2013], ont noté une très faible différence de porosité entre des bétons conservés dans l'eau potable et ceux conservés dans l'eau séléniteuse. Ceci prouve la bonne tenue des bétons d'études dans ce milieu chimiquement agressive. Aussi, le béton fibré avec ajout de laitier et conservé dans l'eau séléniteuse (BFES) présente une stabilité de porosité entre 6 mois et 2 ans. Mais, la porosité des bétons non fibrés est moins importante que celles des bétons fibrés. Notons que l'incorporation des fibres dans un BHP conduit à une baisse de compacité liée à la réduction des propriétés rhéologique [Ladaoui W., 2010].

La masse volumique augmente avec la diminution de la porosité accessible à l'eau, cela est pour les deux types de bétons indifféremment du milieu de conservation.

b- **L'absorption d'eau par capillarité** : L'essai d'absorption d'eau par capillarité consiste à placer la face inférieure de l'échantillon (fond du moule) au contact de l'eau et de suivre en fonction du temps, l'évolution de la prise de masse. La **Figure III.19.**, illustre l'évolution de l'absorption d'eau par capillarité des bétons d'étude en fonction du temps. Après 6 mois et 2 ans de conservation, les résultats obtenus montrent que la différence du coefficient d'absorption capillaire des bétons non fibrés pour les deux milieux de conservation et le béton fibrés conservé dans l'eau potable sont négligeables. Mais, le béton fibré conservé dans l'eau séléniteuse présente une absorption d'eau légèrement plus importante. Aussi, le coefficient d'absorption capillaire après 2 ans de conservation dans différents milieux et pour les deux types de béton est légèrement supérieur comparé à ceux conservés 6 mois.

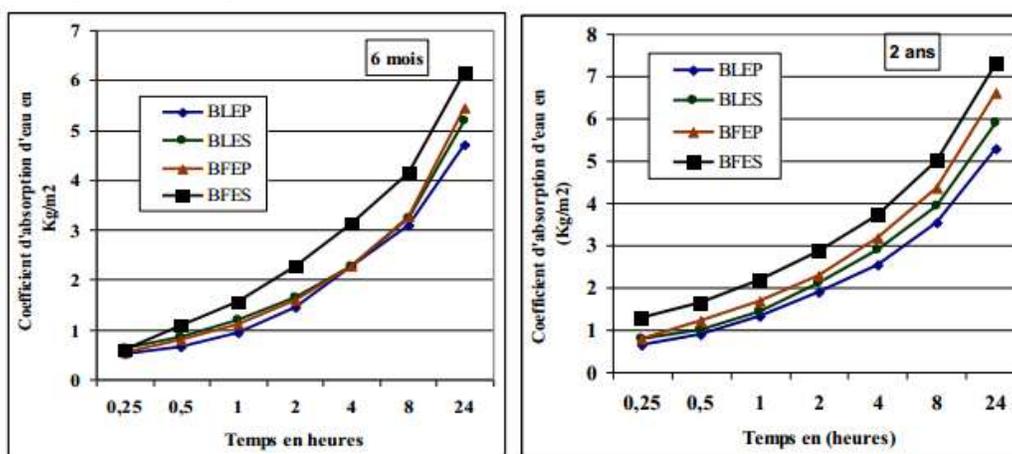


Figure III.19. Coefficient d'absorption capillaire des différents bétons

c- **Mise en évidence du pH interne et externe du BFES** : Pour illustrer l'ampleur de la dissolution de la portlandite par le milieu sulfatique, ils ont appliqué de la phénophtaléine à 1% dans l'éthanol sur les parties interne et externe des demi-morceaux du béton de fibre conservé dans l'eau séléniteuse. Les résultats présentés dans la **Figure III.20** ne montrent aucune diminution du pH, donc aucune altération ou perte de matière des bétons.

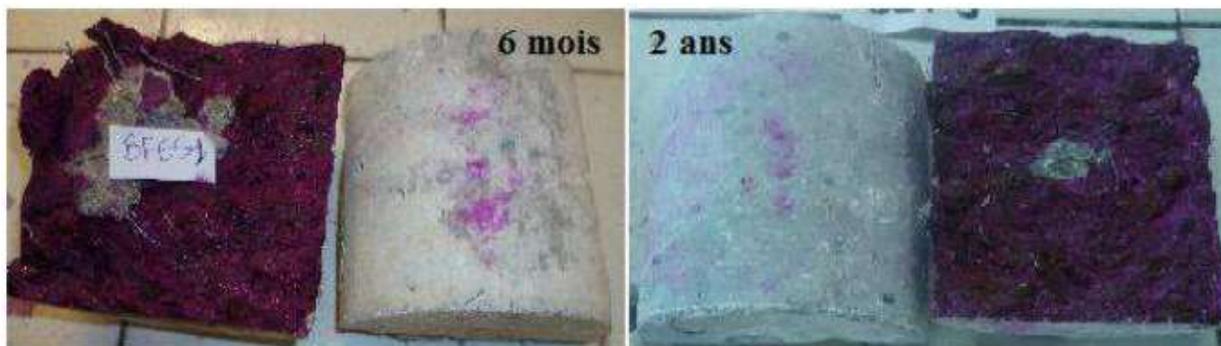


Figure III.20. Evolution du pH du BFES

III-2-2-2- Influence de la température

Une étude a été faite par [Aziez M. N., 2017] qui s'intéresse à l'effet de la température sur les propriétés des bétons en milieu sulfurique, qui a montré qu'en cas général le premier signe d'attaque était la détérioration des coins et des bords des cubes accompagnés par la formation d'une couche blanchâtre sur la surface supérieure des cubes, suivie par la fissuration le long des bords. Progressivement, l'expansion et l'éclatement a eu lieu sur la surface des éprouvettes. Les mortiers conservés pendant 24 mois à 50 °C montrent un meilleur comportement à l'attaque de sulfate que ceux conservés à 5, et 20 °C. Aussi les échantillons avec du sable calcaire sont moins endommagés que ceux avec du sable siliceux.

Il a signalé que les basses températures (5°C) accélèrent la cinétique de la dégradation de tous les échantillons **Figure III.21**.

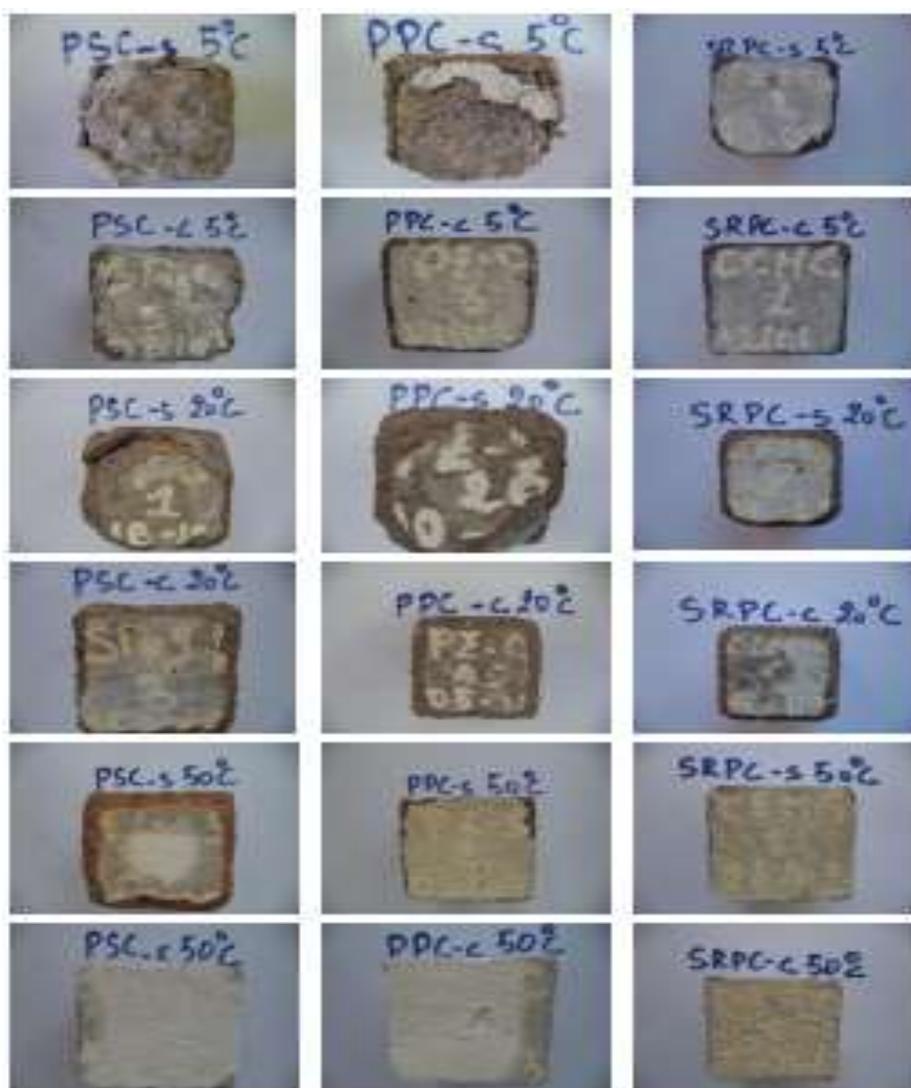


Figure III.21. Etat des mortiers après 24 mois d'immersion dans 5% $MgSO_4$ à différentes températures 5, 20 et 50 °C [Aziez M. N., 2017].

a- Variation de la masse : Les résultats de [Aziez M. N., 2017] concernant les changements de masse en fonction du temps d'exposition dans les sulfates pour différentes températures sont présentés sur la **Figure III.22**.

La plupart des échantillons qui ont été immergés à 5 °C avec les deux types de sable ont montré une augmentation de masse, suivie d'une perte de masse importante. Les échantillons avec sable siliceux présentent les mortiers les plus vulnérables avec une perte de 10,53% après 24 mois, tandis que ceux du sable calcaire ils ont présenté une perte de masse de 2,41% pour la même période. Par contre à 20 °C ils ont montré une augmentation de masse continue jusqu'à 17 mois, puis à un âge plus tardif il y avait eu une diminution de masse pour tous les mortiers avec le sable siliceux, présentent une perte d'ordre 13,65 % et 11,91% après 24 mois. Alors qu'à 50 °C ils ont présenté une augmentation significative de la 2,89, 2,64% après 24 mois.

L'augmentation de masse observée dans les échantillons exposés aux sulfates est principalement due aux réactions entre la portlandite (CH) et $MgSO_4$ pour donner deux produits, à savoir le gypse secondaire ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) et le brucite $Mg(OH)_2$ qui sont formé à la surface d'échantillons [Makhloufi Z. et al., 2016]. Cette augmentation de la masse est due aussi au processus d'hydratation qui n'est pas encore achevé [Nielsen P. et al., 2014].

[Aziez M. N., 2017], a conclu que les mesures de masse montrent que la forte température retarde l'effet de la détérioration due au sulfate de magnésium. Le type de sable a aussi un effet remarquable sur la performance des échantillons. Il faut noter que les mortiers préparés avec ciment Portland résistant au sulfate et sable siliceux ne peuvent pas prémunir contre le mécanisme d'attaques de sulfate $MgSO_4$ à basse température pendant les deux années d'essais.

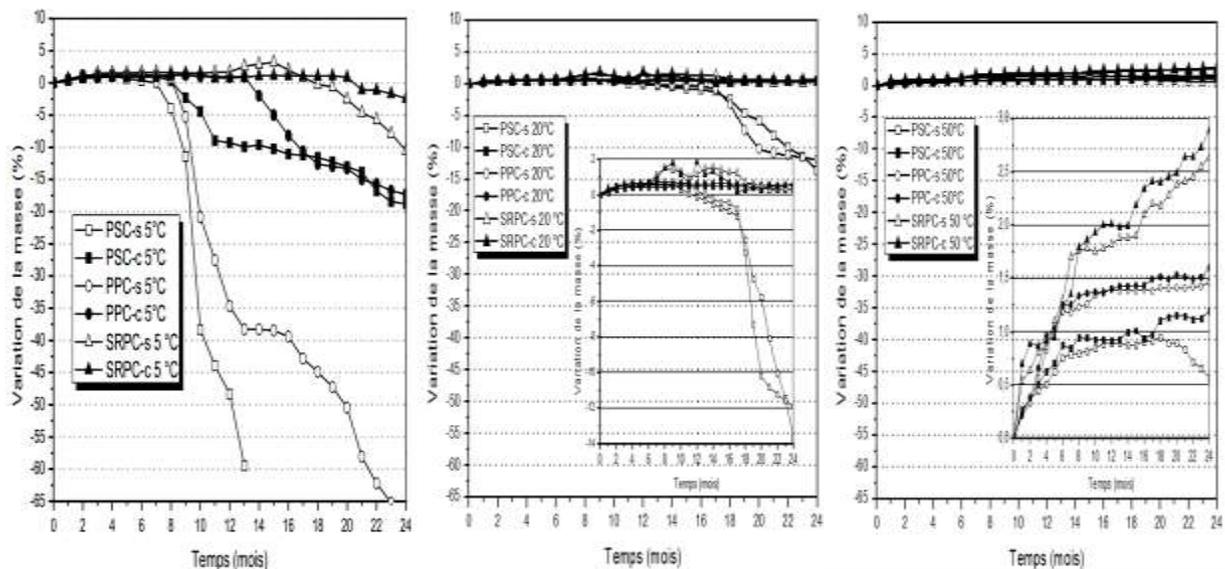


Figure III.22. Variations de la masse des échantillons pendant 24 mois d'immersion dans 5% de $MgSO_4$ à (5°C, 20°C et 50 °C) [Aziez M. N., 2017].

b- Résistance à la compression : [Aziez M N., 2017], à conclure que les éprouvettes immergées dans les sulfates à 5 °C, présentent une perte de résistance après 24 mois. Cette sensibilité à basse température peut être attribuée à la formation de la thaumasite ($\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$). Il convient de noter que les basses températures inférieures à 15 °C, en particulier 5 °C, sont plus favorables à la formation de la thaumasite [Bensted J., 1999]. Par contre à 20 °C il a montré une augmentation de la résistance à des âges plus précoces, jusqu'à 20 mois, puis à un âge plus tard et il y avait une diminution de la résistance après 24 mois. Aucune perte de résistance n'a été enregistrée pour les mortiers préparés avec ciment Portland résistant au sulfate, et il a résulté à 50 °C **Figure III.23**.

Donc, on note que la température élevée améliore la résistance à la compression dans une attaque par les sulfates de magnésium MgSO_4 . L'augmentation continue de la résistance à la compression peut être attribuée à deux phénomènes : le premier est dû à la forte température qui accélère l'hydratation du ciment pour produire plus de C-S-H [Ezziane K. et al., 2007] ce qui conduit à une augmentation de la résistance à la compression. Le deuxième, est dû aux réactions entre le sulfate et le ciment hydraté pour former du gypse et de l'ettringite [Makhloufi Z. et al., 2016]. Ces deux réactions induisent durant ces périodes à une structure plus dense puisque ces produits vont précipiter dans les vides et les micropores. Ceci concorde bien avec les travaux de [Aköz et al., 1999].

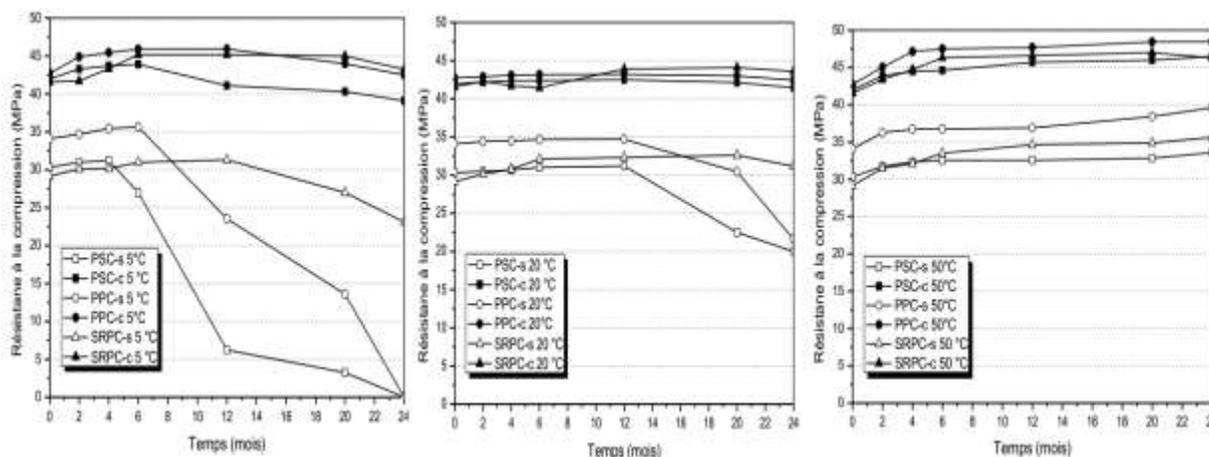


Figure III.23. Résistance à la compression des échantillons pendant 24 mois d'immersion dans 5% de MgSO_4 à (5, 20 et 50 °C) [Aziez M N., 2017].

c- Porosité accessible à l'eau : [Aziez M. N., 2017], a remarqué qu'à 5 °C, la porosité présente une augmentation dont la plus grande augmentation est (110,98%), surtout pour les à base de sable siliceux. Cette augmentation a diminué à 20 °C entre 4% et 42,8%. Par revanche à 50 °C la porosité présente une diminution **Figure III.24**.

Cette diminution peut être attribuée à deux phénomènes. Le premier est en relation avec la température élevée qui accélère l'hydratation du ciment pour donner plus de portlandite (CH) et CSH [Ezziane K. et al., 2007], qui réduit les pores et ralentit donc la pénétration des ions agressifs dans ces matières [Al-Dulaijan S.U., 2007]. Le deuxième, une température élevée

conduit à une plus grande adsorption de SO_4 , avec un processus réversible, sur la surface CSH, la capacité de CSH à se lier à ces sulfates, pourrait réduire leurs concentrations dans la solution poreuse et retarder la précipitation de l'ettringite [Damidot D. & Glasser F.P., 1992 - Fu Y. et al., 1994]. Dans ce cas, les températures élevées n'accélèrent pas nécessairement la dégradation due à l'attaque au sulfate de magnésium.

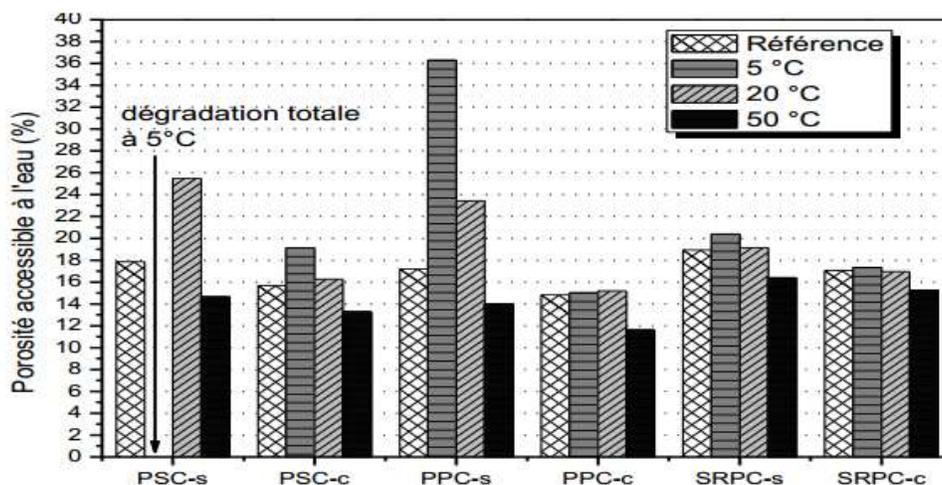


Figure III.24. Porosité du mortier étudié à différentes températures [Aziez M. N., 2017].

d- Absorption capillaire : [Aziez M. N., 2017], a trouvé que les coefficients d'absorption capillaire des mortiers exposés à une solution à basse température à 5°C sont les plus importants suivis par ceux exposés à 20°C et enfin les plus petites valeurs ont été obtenues à 50 °C (Figure III.25). Les coefficients d'absorption capillaire pour la plupart des mortiers exposés à une solution à température élevée 50°C. Les résultats obtenus concordent bien avec [Aköz et al., 1999].

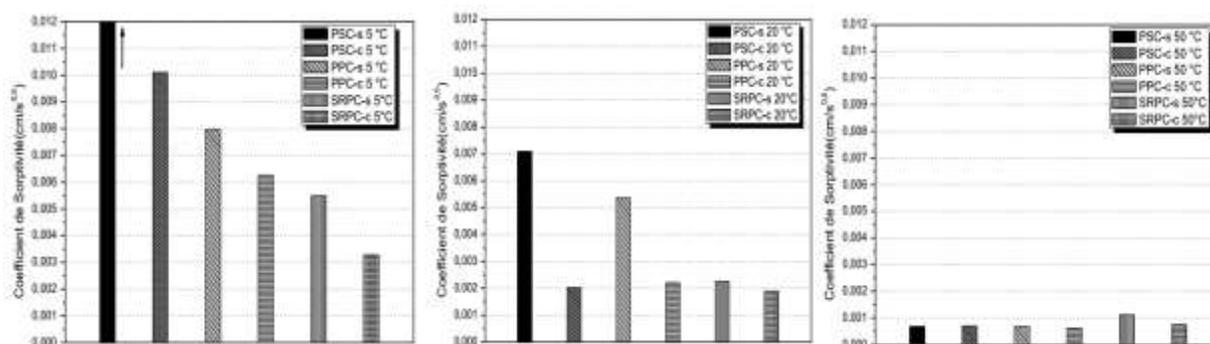


Figure III.25. Coefficient d'absorption capillaire pour mortiers après 24 mois d'immersion dans 5% $MgSO_4$ à (5 et 20 et 50 °C) [Aziez M. N., 2017].

III-2-2-3- Effet de la température sur la profondeur de pénétration des chlorures

[Belarouci A., 2011], a mentionné que la température influe sur la vitesse des réactions chimiques ainsi que sur l'adsorption des ions. La capacité de fixation des chlorures

dépend de la température du point de vue chimique et physique [Nguyen T. S., 2006]. Il a constaté que pour une température supérieure à 20° C, un effet cinétique vient s'ajouter à celui du champ électrique appliqué à l'échantillon de béton. Mais ce n'est pas le cas pour les températures inférieures à 20° C où la profondeur de pénétration diminue **Figure III.26**. Chimiquement, l'effet de la température est très important pour l'évolution des réactions en général et lorsqu'on l'abaisse, on peut même bloquer le développement de ces réactions (principe de conservation des produits alimentaires par exemple). Cette variation est due aussi au comportement de la microstructure du béton notamment sa porosité qui augmente en fonction de la température. Cette augmentation est due en partie à l'augmentation du volume total de la dimension des pores ainsi probablement qu'à la microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte de ciment et les granulats [Tran T. T., 2009].

Physiquement, les propriétés de transfert des bétons augmentent avec la température. Lors de l'élévation de la température, une agitation thermique des molécules des fluides va s'activer, impliquant une augmentation du coefficient de diffusion [Brue F., 2009].

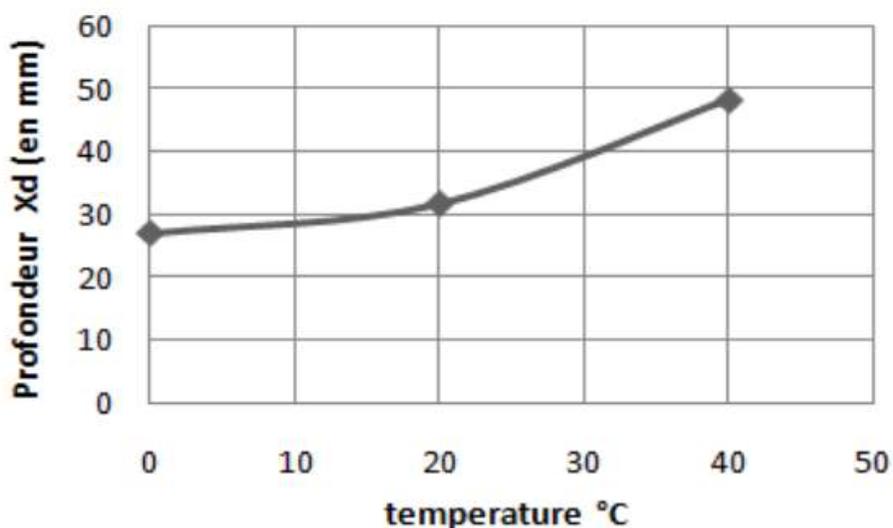


Figure III.26. Variation de la profondeur de pénétration des ions chlorures à travers
[Belarouci A., 2011].

III-3- Conclusion

Dans cette partie du document, nous avons mis en évidence les évolutions des différentes propriétés des bétons à hautes température en se basant sur (les propriétés physiques et chimiques).

On a essayé de faire une étude comparative de quelques travaux qui ont mis en clair les différentes évolutions des caractéristiques physiques et chimiques des bétons exposés aux température élevées.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

L'objectif de ce travail était d'apporter une contribution aux nombreuses recherches entreprises pour comprendre le comportement des bétons, notamment les bétons à hautes performances (BHP), soumis à de hautes températures.

Les éléments bibliographiques nous ont permis d'avoir une vision sur les principales problématiques des bétons à hautes températures, les lacunes concernant l'explication des phénomènes intervenant lors d'exposition à haute température, notamment le phénomène d'éclatement ou d'écaillage qui reste le phénomène le plus inquiétant. Alors qu'à ce jour les solutions technologiques proposées pour éviter ce problème (éclatement) restent très empiriques.

Ce travail est basé sur la synthèse des résultats expérimentaux et des connaissances existantes mettant en scène l'évolution du comportement du béton à haute température. Ainsi nous avons pu voir que lorsque le béton est soumis à une haute température, il se produit une déstructuration de la pâte de ciment et des granulats qui affecte directement les propriétés mécaniques et de transfert du matériau.

La perte des propriétés mécaniques est fortement liée au départ de l'eau et aux réactions de déshydratation source de l'évolution de la microstructure. Cette transformation structurelle de la matrice cimentaire se traduit par une augmentation de la taille caractéristique, par une évolution du volume poreux et par un accroissement de la perméabilité. Parmi les paramètres influençant significativement le comportement thermique et hydrique du béton à haute température figure l'eau. Sa quantité dans le matériau dépend du rapport E/C initial et du degré d'humidité relative. Cette eau est présente dans la matrice cimentaire sous forme d'eau libre, d'eau adsorbée et d'eau chimiquement liée aux hydrates de ciment. Durant l'augmentation de la température, cette eau s'échappe du matériau en commençant par l'eau libre faiblement liée, puis progressivement à la déshydratation du gel de C-S-H.

L'étude des propriétés physiques en fonction de la température est basée sur l'effet du chauffage sur la porosité, la perte de masse et les masses volumiques, l'absorption et la perméabilité des bétons. La porosité est l'une des importantes propriétés caractérisant la durabilité des bétons, un béton ayant une grande porosité a une faible performance par rapport au béton moins poreux. L'étude comparative nous a permis de suivre à une certaine étude l'évolution de la porosité à l'eau (porosité totale), la masse volumique apparente et la perte de masse des bétons portés en température. La porosité du béton ordinaire est de l'ordre de 14% et celle des BHP est comprise entre 10 et 11 % à 105°C. L'augmentation de la température provoque une augmentation de la porosité (jusqu'à 20% à 190°C) et une diminution de la masse volumique apparente. Tandis que les échantillons chauffés perdent globalement 5% de leur masse initiale à 190°C, est qui dépasse les 6% à plus de 700°C, un résultat couramment rencontré dans la littérature.

Le départ de l'eau est la cause principale de cette perte de masse dans cette plage de température. L'existence des fibres de polypropylène n'a pas d'influence significative sur la porosité à l'eau des bétons, la méthode utilisée ne permet pas de déterminer l'effet des fibres sur la porosité totale. Pour voir l'impact des fibres sur la porosité des bétons, il est recommandé d'utiliser la méthode de porosimétrie mercure (MIP).

Conclusion Générale

Les résultats d'une autre étude ont montré que l'apparition des dégradations par l'attaque chimique sont visuellement et rapidement dans les mortiers à 5 et 20 °C. Cependant, aucun dégât n'a été observé pour 50 °C.

Les mesures de masse montrent que la forte température retarde l'effet de la détérioration des mortiers subissant l'attaque aux sulfates de magnésium.

Les résultats de la résistance à la compression montrent que les températures élevées ont améliorées la résistance des mortiers durant l'attaque de sulfate de magnésium.

Les résultats de l'absorption capillaire ont montré que le taux d'absorption est plus important pour les mortiers de sable siliceux que celui des mortiers de sable calcaire à différentes températures. Ceci peut être lié aux zones interfaciales qui se développent en bordure des gros granulats plus qu'ils ne se développent aux bordures des grains fins.

Chimiquement, l'effet de la température est très important pour l'évolution des réactions en général et lorsqu'on l'abaisse, on peut même bloquer le développement de ces réactions.

Physiquement, les propriétés de transfert des bétons augmentent avec la température. Lors de l'élévation de la température, une agitation thermique des molécules des fluides va s'activer, impliquant une augmentation du coefficient de diffusion.

Les résultats de cette étude restent propres aux bétons déjà étudiés et s'ajoutent aux panel des résultats de la caractérisation des bétons à haute performance portés à hautes températures.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

A

- [Ahmed G. N. et Hurst J. P., 1997] **Ahmed Gmira et Hurst J. P.**, ‘An analytical approach for investigating the causes of spalling of high-strength concrete at elevated temperatures. International workshop on fire performance of high-strength concrete. Gaithersburg, USA.
- [Aidoud A., 2018] **Aidoud Assia**, ‘ Evolution des caractéristiques des bétons et des BHP aux hautes températures’ *Thèse de doctorat*. Génie civil. Guelma : Université 8 Mai 1945, 2018, 92p
- [Aidoud A., 2019] **Aidoud Assia.**, (2019) : Cours Durabilité des Matériaux, *Master II en Génie Civil*, Option : Matériaux de Construction, Université 8 Mai 1945.
- [Aköz et al., 1999] **Aköz F., F. Türker, S. Koral, N. Yüzer**, ‘Effects of raised temperature of sulfate solutions on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume’, *Cement and Concrete Research*, 29 (1999) 537-544.
- [Al-Dulaijan S.U., 2007] **Al-Dulaijan S.U.**, ‘Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to magnesium sulfate solutions’, *Constr. Build. Mater*, 21 (2007) 1792-1802.
- [Alonso C., 2004] **Alonso C, Fernandez L.**, ‘Deshydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments’. *Journal of materials sciences*, Vol. 39, 2004, p.3015-3024.
- [Andeberg Y., 1997] **Andeberg Y.**, ‘international workshop on fire performance of high-strength concrete’, NIST, Gaithersburg, md, 1997.
- [Anderberg Y., 1997] **Anderberg Y.**, ‘Spalling phenomena of HPC and OC’. *International workshop on fire performance of high-strength concrete*. Gaithersburg, USA, 1997.
- [Arab A. et Rafai H., 2017] **Arab Azedine et Rafai Hichem**. ‘Elaboration et étude des caractéristiques physico-mécaniques des Bétons fibrés à ultra hautes performances avec ajouts de pouzzolane naturelle et de fumées de silice’. *Mémoire de master [En ligne]*. Université de Boumerdes.
- [Arliguie G. & Hormain H., 2007] **Arliguie G., Hormain H.**, ‘*GranDuBé*, Recommandation AFREM « Bétons. Détermination de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l’eau »’, *Presses de l’école national des ponts et chaussées*, 2007.
- [Arupfire, 2005] **Arupfire**, ‘Fire resistance of concrete enclosures’, 2005.

- [Aziez M. N., 2017] **Aziez Mohammed Nadjib.**, ‘Attaques sulfatiques externes des matériaux cimentaires influence de la température’ : *Thèse de Doctorat LMD*, En : Génie Civil, Spécialité : Durabilité des Matériaux et Durée de Vie des Ouvrages, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen – p 122.
- B**
- [Baroghel B.V., 1994] **Baroghel-Bouny Véronique** ‘Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, analyses, interprétations’, Laboratoire central des ponts et chaussées, pp.468, 1994.
- [Basant Z.P, Najjar L.J., 1972] **Basant Zdenek P., Najjar Leonard J.**, ‘Drying of concrete as a non linear diffusion problem’. *Cem. and Cone. Research*,1972. vol 1 pp 461-473.
- [Bazant Z.P. & Kaplan M., 1996] **Bazant Z.P. & Kaplan M.**, ‘Concrete at high temperature: material behaviour and mathematical modelling’. London concrete design and construction series, 1996.412 p.
- [Belarouci A., 2011] **Belarouci Abdelghani.**, ‘Influence de la température sur le transfert des ions chlorures dans les bétons’ : *Thèse de Magister*, en génie civil, option : matériau béton, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen – p 131.
- [Bensted J., 1999] **Bensted J.**, ‘Thaumasite —background and nature in deterioration of cements, mortars and concretes’, *Cement and Concrete Composites*, 21 (1999) 117-121.
- [Bessa A., 2004] **Bessa A.**, ‘Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers’, *thèse de doctorat*, Université de Cergy-Pontoise, 2004
- [Bilodeau A. et al., 2004] **Bilodeau A., Kodur V. K. R. et Hoff G.C.**, ‘Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire’, *Cement and Concrete Composites*, vol. 26(2), p. 163-174, 2004.
- [Bolduc L.S., 2009] **Bolduc Louis-Samuel**, ‘Etude des propriétés de transport du béton projeté’. *Mémoire de maître ès sciences [En ligne]*. (M.Sc.) génie civil. Québec : Université La Val. 2009, 167 pages
- [Bouaziz L., 2015] **Bouaziz Lynda.**, ‘ Etude du comportement mécanique des bétons fibrés soumis à de hautes températures ‘ *Thèse de Master Académique [En ligne]*. en Génie Civil, Option : Structure et matériaux, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, p 128. Disponible sur :

<https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/5840/Bouaziz%2C%20Lynda.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Consulter le 28/06/2020).

- [Bouabdallah M.A., 2006] **Bouabdallah Moulai Abdellah**, ‘Comportement du béton sous l’effet d’une élévation de la température’ *Thèse de magister [En ligne]*. Génie civil, géo-matériaux. Oran: Université des Sciences et de la Technologie d’Oran Mohamed Boudiaf, 2006, 187p. Disponible sur : « <http://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2019/02/These-Saadi-Imene.pdf> » (Consulter le 30/06/2020).
- [Bouabdallah M.A., 2008] **Bouabdallah Moulai Abdellah**, ‘Etude comparative du béton haute performance et un béton ordinaire soumises à un chargement thermomécanique.’ *Conférence [En ligne]* : Actes des 6ème Journées de Mécanique de l’Ecole Militaire Polytechnique Avril 2008. At : Bordj El Bahri, Alger
- [Boutiba A. et al., 2013] **Boutiba Aldjia, Chaid Rabah, Jauberthie Raoul, Molez Laurent**. Murissement des BHPF avec ajout de laitier dans les milieux sulfatés. De l’expérimentation à la modélisation en Génie Civil, Cachan, France. 10 p. hal-01005541. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01005541>
- [Brouwers H.J.H., 2004] **Brouwers H.J.H.**, ‘The works of powers and Brownyard revisited: part1. Cement and concrete research’ [En ligne], Vol. 34, 2004 ; p. 1697-1716
- [Brue F., 2009] **Brue F.**, ‘Rôles de la température et de la composition sur le couplage thermo-hydro-mécanique des bétons’, *Thèse de doctorat [En ligne]*. Ecole centrale de Lille, France, 2009.
- [Bui V.K. et al., 2003] **Bui, V. K. Geiker M.R. et Shah S, P.** ‘Rheology of fiber reinforced Cementitious Materials’. Michigan, *4th Conference on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (Hpfrc4)*, Rillem publications. 2003.

C

- [Castellote M. et al., 2004] **Castellote Marta, Alonso Cruz., Andrade Carmen, Turrillas Xavier. and Campo Javier**, ‘Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating as studied by neutron diffraction’, *Cement and concrete research*, vol. 34, pp. 1633-1644, 2004.
- [Chouiter Y., 2016] **Chouiter Youcef**, ‘ Etude du comportement d’un béton à haute performance (BHP) avec des fibres de verre soumis à haute température.’ *Mémoire de Master [En ligne]*. Matériaux. M’sila: Université Mohamed Boudiaf, 2016, 113p. Disponible sur : « <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/handle/123456789/624> » (Consulter le 28/06/2020).

- [Charlaix E. et al., 1987] **Charlaix E., Guyon E. Roux S.**, ‘Permeability of a random array of fractures of widely varying apertures’, *Transp. Porous Media* 2, pp. 31–43. 1987.
- [Chihaoui R., 2008] **Chihaoui Ramdane**, ‘Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d’un environnement chimiquement agressif’ *Mémoire de Magister-USTMB* d’Oran -2008.
- [Conciatori D., 2005] **Conciatori David**, ‘Effet du microclimat sur l'initiation de la corrosion des aciers d'armature dans les ouvrages en béton armé’, *Thèse de doctorat [En ligne]*, Département de génie civil, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2005, 148 pages.
- [Consolazio et al., 1998] **Consolazio, McVay, et Rish.** ‘Measurement and prediction of pore pressures in saturated cement mortar subjected to radiant heating.’ *ACI Materials Journal* 95(5): 525-536. 1998.
- D**
- [Damidot D. & Glasser F.P., 1992] **Damidot D., Glasser F.P.**, ‘Thermodynamic investigation of the CaO-Al₂O₃-CaSO₄-H₂O system at 50 °C and 85°C’, *Cement and Concrete Research*, 22 (1992) 1179-1191.
- [Dana E., 1999] **Dana Esam**, ‘Contribution à la caractérisation des écoulements biphasiques dans les matériaux poreux’. Etude expérimentale sur trois grès, *Thèse de Doctorat [En ligne]*, Université Lille 1, 1999.
- [Diamond S., 1986] **Diamond S.**, ‘The microstructure of cement paste in concrete’, in *procceding of the 8th international congress on the chemistry of cement [En ligne]*, Rio de Janeiro, Brasil, vol. 1, 1986, pp.122-147.
- [Diamond S. et al., 1990] **Diamond S, Khoury G.A. et Sullivane P.J.E.** ‘Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C (1292F)’. *ACI Materials Journal*,1990, vol 87, n°2. p 160-166. **[Dias W.P.S., 1990] Dias W.P.S, Khoury G.A, Sullivan P.J.E.** ‘Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C’. *ACI materials journal*, title n°87-M18, 1990.
- [Diamond S., 2001] **Diamond S.**, ‘Considerations in image analysis as applied to investigations of the ITZ in Concrete, Cement and Concrete Composites’, Vol. 23, pp. 171178. 2001.
- [Diederichs U. et al., 1988] **Diederichs, U., Jumppanen, U. M. and Pentalla, V.** ‘Material properties of high strength concrete at elevated temperatures.’ *Labse 13th Congress, Helsinki*.1988.

- [Dullien F.A.L., 1992]** **Dullien F.A.L.**, ‘Porous media, fluid transport and pore structure’, 2nd edition, Academic Press, San Diego, 1992.
- E**
- [Ezziane K. et al., 2007]** **Ezziane K., A. Bougara, A. Kadri, H. Khelafi, E. Kadri**, ‘Compressive strength of mortar containing natural pozzolan under various curing temperature’, *Cement and Concrete Composites*, 29 (2007) 587-593.
- F**
- [Fagerlund G.,1993]** **Fagerlund Göran**, ‘The long time water absorption in the air pore structure of concrete’, *Report TVBM-3051 [En ligne]*, Div. of Building Materials, Lund Institute of Technology, 1993.
- [Fu Y. et al., 1994]** **Fu Y., Xie P., Gu P., Beaudoin J.J.**, ‘Effect of temperature on sulphate adsorption/desorption by tricalcium silicate hydrates’, *Cement and Concrete Research*, 24 (1994) 1428-1432
- J**
- [Jahren P.A., 1989]** **Jahren P.A.**, ‘Fire resistance of high strength/dense concrete with particular reference to the use’. American Concrete Institute, 1989, p.1013-1049.
- [Janotka I. & Bagel L., 2003]** **Janotka I. and Bagel L.**, ‘Pore structures, permeabilities, and compressive strengths of concrete at temperatures up to 800 C’, *ACI Mater*, vol.99, pp. 196–200, 2003.
- H**
- [Hager I. G., 2004]** **Hager Izabela G.**, ‘Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques’, *thèse de doctorat [En ligne]*, Ecole nationale des ponts et des chaussées, 183 p., 2004.
- [Hameed R., 2010]** **Hameed Rashid** ‘Apport d’un Renfort de Fibres sur les Performances des Structures en Béton Armé pour les Applications Parasismiques’, *thèse de doctorat [En ligne]*, Université de Toulouse INSA, 2010.
- [Haniche R., 2011]** **Haniche Rachid**, ‘Contribution à l’étude des bétons portés en température / Evolution des propriétés de transfert / Etude de l’éclatement’, *thèse de doctorat [En ligne] (LGCIE) de l’INSA*, Lyon, 2011.
- [Harmathy T.Z., 1964]** **Harmathy T.Z.**, ‘Effect of moisture on the fire endurance of building elements’. ASTM special technical publication, N° 385, 1964, p. 74-95.

- [Hertz K.D., 2003] **Hertz K.D.**, 'Limits of Spalling of Fire-Exposed Concrete', *Fire Safety Journal*. 38 (2003) pp 103-116.
- [Holcim S.A., 2015] **Holcim S.A.**, 'Guide pratique du béton : Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables', 6ème édition (français, édition Suisse), janvier 2015. 288 Pages
- I**
- [Ismail M., 2006] **Ismail Moumamed**, 'avec la cicatrisation dans les fissures pour prolonger la durée de service des infrastructures (ponts, centrales nucléaires)', *thèse de doctorat [En ligne]*. INSA, 2006.
- G**
- [Grube H. & Rechenberg W.,1989] **Grube H., Rechenberg W.**, 'Durability of concrete structures in acidic water'. *Cem. Concr. Res.*, vol. 19, n° 5, 1989, p 183-
- [Grünewald S., Walraven J.C., 2001] **Grünewald Self, Walraven Joost C.** 'Rheological study on the workability of fiber-reinforced mortar', Second Int. Symposium on SCC, Edited by Ozawa and Ouchi, University of Tokyo, COMS Engineering Publication, pp. 127-136, 2001.
- [Guerbas N., Attallah O., 2017] **Guerbas Nabil, Attallah Oqba** 'Etude de l'effet des températures élevées sur les propriétés mécaniques d'un béton autoplaçant renforcé par des fibres métalliques' *Mémoire de Master [En ligne]*. M'sila : Université Mohamed Boudiaf. 2017. 113 pages.
- K**
- [Kalifa P. & Tsimbrovska M., 1998] **Kalifa P. and Tsimbrovska M.**, 'Comportement des BHP à hautes températures, État de la question et résultats expérimentaux'. *Cahier de CSTB* n° 3078, 1998.
- [Kalifa P.et al., 2000] **Kalifa P., Menneteau F.D., Quenard D.**, 'Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures', *Cement and Concrete Research*, pp 1915-1927, 2000.
- [Kalifa P. et Menneteau F. D., 2000] **Kalifa P. et Menneteau F. D.**, 'Mesures de pression, température et perte en masse dans les bétons à hautes températures', Rapport BHP 2000.
- [Kalifa P. et al., 2001] **Kalifa P., Chéné G., Gallé C.**, 'High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure', *Cement and Concrete Research*, vol. 31(10), p.1487-1499, 2001.

- [Kanema M. et al., 2007] **Kanema M., de Morais M.V.G., Noumowe A., Gallias J.L., Cabrillac R.**, ‘Experimental and numerical studies of thermo-hydrous transfers’ in a *concrete exposed to high temperature, Heat and mass transfers*. Vol. 44, pp.149–164, 2007.
- [Kanema M., 2007] **Kanéma, M.**, ‘Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons’, *Thèse de doctorat*, Université de Cergy Pontoise.
- [Katz A.J. & Thompson A.H., 1986] **Katz A.J., Thompson A.H.**, ‘A quantitative prediction of permeability in porous rocks’, *Physical Review B : Condensed Matter and Materials Physics* 24, pp. 8179–8181. 1986
- [Kerbouche, 2009] **Kerbouche** ‘Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortiers’ *Mémoire de Magister* -l’ENSET d’Oran- 2009.
- [Khoury G. A.,2008] **Khoury G. A.**, ‘Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: pressure relief mechanisms and modelling criteria’, *Magazine of Concrete Research*, vol. 60(3), p. 189-204, 2008.
- [Khoury G. A., Willoughby B., 2008] **Khoury G. A., Willoughby B.**, ‘Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: molecular structure and materials behaviour’, *Magazine of Concrete Research*, vol. 60(2), p. 125136, 2008.
- [Khoylou N. et G. L. England, 1996] **Khoylou N. et England G. L.**, ‘The effect of moisture on spalling of normal and high strength concretes’. *Worldwide advances in structural concrete and masonry*. Chicago, Illinois, 1996.
- [Khoury G. A., et al., 1985] **Khoury G. A., Grainger B. N., and Sullivan G. P. E.**, ‘Strain of concrete during first heating to 600°C under load’. *Magazine of concrete research*, vol. 37, pp 195-215, 1985.
- [Koiman A.G, 2000] **Koiman A.G**, Modelling steel fiber reinforced concrete for Structural design. *Thèse de Doctorat [En ligne]*, Delft University of Technology, Pays-Bas, 2000.

L

- [Ladaoui W., 2010] **Ladaoui Wahid**, ‘Etude expérimentale du comportement Thermo-Hydro Mécanique à long terme des BHP destinés aux ouvrages de stockage des déchets radioactifs’. *Thèse de doctorat [En ligne]*, l’université de Toulouse, décembre 2010.

- [Lakhal R., 2011] **Lakhal Ridha** ‘Elaboration des bétons à hautes performances a base des sous-produit locaux formulation et caractérisation physico-mécanique’, *Mémoire de magistère [En ligne]*. Univ. Annaba, 2006.
- [Liu X. et al., 2008] **Liu X., Ye G., De Schutter G., Yuan Y., Taerwe L.**, ‘On the mechanism of polypropylene fibers in preventing fire spalling in self-compacting and high-performance cement paste’. *Cement and Concrete Research*, vol. 38, pp 487-499, 2008.
- [Lottman B. B. G., 2007] **Lottman, B. B. G.**, ‘Fire in bored tunnels. Structural behaviour, during fire conditions, of bored tunnels made with a concrete segmental lining’, *Master Thesis [En ligne]* of Delft University of Technology, 2007.
- M**
- [Makhloufi Z. et al., 2014] **Z. Makhloufi, M. Bederina, M. Bouhicha, E.-H. Kadri**, ‘Effect of Mineral Admixtures on Resistance to Sulfuric Acid Solution of Mortars with Quaternary Binders’, *Physics Procedia*, 55 (2014) 329-335.
- [Makhloufi Z. et al., 2016] **Makhloufi Z., Aggoun S., Benabed B., Kadri E.H., Bederina M.**, ‘Effect of magnesium sulfate on the durability of limestone mortars based on quaternary blended cements’, *Cement and Concrete Composites*, 65 (2016) 186-199.
- [Malier Y., 1992] **Malier Y.**, ‘Les bétons à hautes performances : caractérisation, durabilité, applications’, *presse de l’école nationale des ponts et chaussées*, 1992.
- [Menou A., 2004] **Menou A.**, ‘étude du comportement thermomécanique des bétons à haute température : Approche multi -échelle de l’endommagement thermique’. *Thèse de doctorat [En ligne]*, Université de PAU et des pays de l’ADOUR, 2004.
- [Meftah A., 2009] **Meftah A.**, ‘mesoscale thermo-hygro-mechanical analysis of microstructure effects on heated concrete’. *In 1st International Workshop on concrete spalling due to Fire Exposure*, pages 436–445, Leipzig, 2009.
- [Mindeguia J. C., 2009] **Mindeguia J. C.**, ‘Contribution expérimentale à la compréhension des risques d’instabilité thermique des bétons’. *Thèse de doctorat [En ligne]* à l’université de Pau et des pays de l’Adour. 234 p. 2009.
- [Min Li et al., 2004] **Min Li, ChunXiang Qian & Wei Sun.** ‘Mechanical properties of high-strength concrete after fire’, *Cement and Concrete Research*, vol. 34, p. 1001-1005, 2004.

- [Msaad Y., 2005] **Msaad Y.** ‘Analyse des mécanismes d'écaillage du béton soumis à des températures élevées’, *Thèse de Doctorat [En ligne]* de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.
- N**
- [Neville A.M., 2000] **Neville Adem M.**, ‘Propriété des bétons’, Éditions Eyrolles [En ligne], Paris, 2000, 806 pages.
- [Nguyen T. S., 2006] **NGUYEN, T. S.**, ‘Influence de la nature du liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux cimentaires’, *Thèse de doctorat [En ligne]*, INSA de Toulouse, France, 2006, p. 220
- [Nguyen V.T., 2013] **Nguyen V. thai.** ‘Comportement des bétons ordinaire et à hautes performances soumis à haute température : application à des éprouvettes de grandes dimensions’. Cergy-Pontoise, 2013.
- [Nielsen P. et al., 2014] **Nielsen P., S. Nicolai, A. Darimont, X. Kestemont,** ‘Influence of cement and aggregate type on thaumasite formation in concrete’, *Cement and Concrete Composites*, 53 (2014) 115-126.
- [Noumowé N.A., 1995] **Noumowé N.A.**, ‘Effet de hautes températures sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances’. *Thèse de doctorat [En ligne]*, INSA de Lyon 1995.
- [Noumowe A., 2005] **Noumowe A.**, ‘Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200 °C’, *Cement and Concrete Research* vol.35(11), p. 2192-2198, 2005.
- [Noumowe A. N. et al., 2009] **Noumowe A. N., Siddique R., Debicki G.**, ‘Permeability of high-performance concrete subjected to elevated temperature (600°C)’. *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 1855-1861. 2009.
- O**
- [Oberholster R.E., 1986] **Oberholster R.E.**, ‘Pore structure, permeability and diffusivity of hardened cement paste and concrete in relation to durability: status and prospects, in Proceedings of the "8th International Congress on the Chemistry of Cement", Rio de Janeiro, Brasil, 1986, sous-thème 4.1: Pore structure, permeability and diffusivity as related to durability. Finep, Rio de Janeiro, 1986, vol. 1, pp 323-335.
- [Oelimahefason M.S., 2016] **Oelimahefason Mendritsoa Samuel.** ‘Essai De Fabrication Et Caracterisation Detuile Fibrociment’. *Mémoire De Licence [En ligne]* Université D’antanarivo, 2016.

- [Olivier J -P. et al., 1995] **Ollivier Jean Pierre, Maso Jean Claude, Bourdette B.**, ‘Interfacial transition zone in concrete’. *Advanced Cement Based Materials*. Vol. 2, pp. 30-38.1995.
- [Olivier J.P., 2008] **Olivier J.P.**, ‘Durabilité des bétons’ livre [En ligne]. Edition : Presse de l’école nationales des ponts et chaussées, 2008.
- [Ožbolt J. et al., 2009] **Ožbolt J., Periškić G., Jelčić M., and Reinhardt H.W.**, ‘Modelling of concrete exposed to high temperature’. *In 1st International Workshop on concrete spalling due to Fire Exposure*, pages 461–469, Leipzig, 2009.

P

- [Phan L.T., Carino N.J., 2001] **Phan L.T., Carino N.J.**, ‘Mechanical properties of high strength concrete at elevated temperatures’. Gaithersburg, Maryland: NISTIR 6726, Building and Fire Research laboratory, National Institute of Standards and Technology; 2001.
- [Phan L.T., 2002] **Phan L.T.**, ‘High-strength concrete at high temperature- an overview’. National institute of standards and technology. *High performance concrete 6th international symposium proceeding*, Vol. 1, 2002.
- [Pilya P., 2010] **Pilya P.**, ‘Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l’amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée’, *Thèse doctorat*, Université de Cergy Pontoise, 2010
- [Poon C.S. et al., 2001] **Poon C.S., Azhar S., Anson M. and Wong Y.L.**, ‘Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures’, *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 1291–1300, 2001.
- [Poon C.S. et al., 2003] **Poon C.S., Azhar S., Anson M. and Wong Y.L.**, ‘Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures’, *Cement and Concrete Composite*, vol.25, pp. 83–89. 2003.

R

- [Rossi P., 2010] **Rossi Paolo**, ‘Tunnels et Espace Souterrain, Revue Bétons-n°218 -pp. 154-154, Avril 2010.

S

- [Saadi I., 2017] **Saadi Imen**, ‘Contribution à l’étude du comportement à haute température des bétons à hautes performances « Effet des additions minérales et fibres de polypropylène »’ *Thèse de doctorat [En ligne]*. Génie civil, Matériaux innovants et durabilité. Annaba: Université Badji Mokhtar, 2017, 147p.

Disponible sur : « <http://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2019/02/These-Saadi-Imene.pdf> » (Consulter le 06/06/2020).

- [Boualleg S., 2004] **Boualleg Saida**, 'Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires'. *Mémoire de Magister [En ligne]*. M'sila : Université Mohamed Boudiaf, 2004.
- [Samson E., 2008] **Samson E**, 'Durabilité du Béton', *Notes de cours [En ligne]*, Université Laval, 2008
- [Schneider U. et al., 1981] **Schneider U., Diederich U., EHM C.** 'Effect of temperature on steel and concrete for PCRVS'. *Nuclear engineering and design*, Vol. 67, 1981, p.245-258.
- [Schneider U., & Herbst H.J., 1989] **Schneider U. Herbst H. J.**, 'Porosity values for concrete', *TIZ Revue Allemande*, vol. 113, pp. 311-321, 1989.
- [Shuttleworth P., 2001] **Shuttleworth P.**, 'Fire protection of precast concrete tunnel linings on the Channel Tunnel Rail Link', *Concrete*, vol. 35(4), p. 12-22, 2001.
- [Sierra R., 1982] **Sierra Rose** 'Répartition des différentes formes d'eau dans la structure des pâtes pures de C₃S et de ciment Portland. *Bull. Liaison LPC*, 1982, n° 117, pp 77-81
- T**
- [Thelandersson S., 1974] **Thelandersson S.** 'Mechanical behaviour of concrete under torsional loading at transient, high-temperature conditions.' *Bulletin of Lund Institute of Technology* 46, 1974.
- [Toumi B., 2010] **Toumi Belkacem**, 'Étude de L'influence Des Hautes Températures Sur Le Comportement Du Béton.' *Thèse de doctorat [En ligne]*, Constantine : Université Mentouri, 2010.p166
- [Tlaji T., 2018] **Tlaji Tala** 'Développement et caractérisation du comportement thermomécanique des matériaux composites TRC' *phd thesis [En ligne]*, Université de Lyon, 2018.
- [Tran T. T., 2009] **Tran The Truyen**, 'Contribution à l'étude du comportement mécanique et hydromécanique du béton', *Thèse de doctorat*, Faculté des sciences appliquées, Université de Liège, Belgique, 2009, p. 257.
- [Truong B. T., 2016] **Ba Tam Truong** 'Formulation, performances mécaniques, et applications, d'un matériau TRC pour le renforcement et la réparation de structures en

béton/et béton armé : Approches expérimentale et numérique' *phd thesis*
 [En ligne], Université de Lyon, 2016

U

[ULM F.J., 1999]

ULM, F.J. 'Couplages thermo-chémo-mécaniques dans les bétons'. Un premier bilan. Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées

[URL]

<https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/masse-volumique-du-beton-et-de-ses-constituants/>

W

[Watanabe K., 1998]

Watanabe K., 'An overview of principles and techniques of moisture properties measurement for building materials and components'. *France-Japan workshop on Mass-Energy transfer and deterioration of building materials and components*. Tsukuba, Japan, 1998.

X

[Xing Z. 2011]

Xing Z., Beaucour A., Hebert R., Noumowe A., and Ledesert B., "Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 4, pp. 392–402, Apr. 2011.

Z

[Zeiml M. et al., 2006]

Zeiml M., Leithner D., Lackner R., Herbert A. Mang. 'How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?' *Cement and concrete research* vol.36, 929-942, pp. 2006.

[Zeiml M. et al., 2008]

Zeiml M., Lackner R., Leithner D., Eberharsteiner J., 'Identification of residual gas-transport properties of concrete subjected to high temperatures', *Cement and concrete research* vol. 38, pp. 699-716, 2008.

[Zhang B., 2011]

Zhang B., 'Effects of moisture evaporation (weight loss) on fracture properties of high performance concrete subjected to high temperatures'. *Fire Safety Journal*, Aout 2011.