

INTRODUCTION GENERALE

L'homme maîtrisait déjà extraordinairement l'art de construire en béton. De nombreux ouvrages, tels que le pont FANANDRANA Toamasina, l'immeuble CARLTON MADAGASCAR, en témoignent encore aujourd'hui et sont révélateurs des connaissances de cette époque.

Toutefois, ce n'est qu'au siècle passé, avec l'invention de structure en béton, que l'utilisation des granulats a pris un essor formidable dans la construction. L'invention de la structure en bétons légers a encore accru son domaine d'utilisation dès le milieu du XIXe siècle. Ce dernier procédé a permis la réalisation des structures légères et moins coûteuses.

Malheureusement, la structure légère est, dans son calcul des sollicitations aussi bien que dans ses différents modes de composition, non seulement différent de structure en béton, mais aussi plus complexe. De plus, le technicien qui a appris la technique des bétons un peu comme sa « langue maternelle » éprouvera sans doute des difficultés pour atteindre la même perfection dans le domaine de l'utilisation des bétons légers.

Toutes ces difficultés ne pourront être vaincues que par une étude approfondie de la matière. C'est l'objectif du présent travail :

« REFORMULATION DE LA COMPOSITION DE BETON LEGER DE POUZZOLANES NATURELLES »

Dans le document relatif au développement rapide et durable de Madagascar (Madagascar Action Plan), le point d'achèvement a déjà été finalisé, le gouvernement s'est engagé, entre autres, à exploiter les ressources minières et les matériaux de constructions. Cela entre dans le cadre du développement rapide et durable du pays, à travers lequel l'Etat priorise les zones à forts potentiels économiques.

Actuellement, trois axes principaux ont été définis comme pôles prioritaires et bénéficient du financement de la Banque Mondiale à travers le projet phare Pôles Intégrés de Croissance ou PIC : l'axe Antananarivo-Antsirabe, Nosy-Be et Fort-Dauphin.

Plus particulièrement, nous nous intéresserons à la zone Antsirabe-Betafo, car en étant non seulement le second pôle industriel de Madagascar, la ville offre encore plusieurs potentiels sous-exploités. Mais avec l'entrée du pays au sein de la South African Development Community ou SADC, son élection en tant que premier bénéficiaire du Millenium Challenge Account du gouvernement américain, dont profite d'ailleurs la région Vakinankaratra, il est plus que certain que cette zone constitue déjà un axe stratégique pour le développement de Madagascar.

Ce travail se situe dans le cadre des recherches menées au sein du département des sciences des matériaux et métallurgie sur la mise en œuvre et valorisation des ressources minérales naturelles Malagasy. Il vise à minimiser le coût de la construction par l'utilisation de technique et des matériaux appropriés. Plus précisément, la présente thèse se rapporte sur des granulats de pouzzolanes naturelles de la région d'Ambohinaorina Betafo.

La tendance actuelle dans la construction individuelle, est donc de favoriser des produits légers capables de remplir plusieurs usages. Le bâtisseur ne cherche plus seulement la performance mécanique mais il tente également d'améliorer les qualités thermiques et acoustiques des matériaux conservant des niveaux de performances suffisants. Ces matériaux sont alors étudiés simultanément sur deux thématiques: mécanique/thermique ou mécanique/acoustique.

Cependant, il ne semble pas y avoir d'étude générale qui aborderait à la fois les aspects mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau de construction. Ce travail s'inscrit donc dans une démarche nouvelle, visant à caractériser un matériau multi usages, non plus sur deux domaines mais sur trois.

- La première partie comporte une description de la structure morphologique du béton, des états de l'eau et de ses localisations, afin de mieux comprendre les phénomènes physico-chimiques agissant à l'échelle de la microstructure. Ensuite, les notions de bases relatives à un milieu poreux telles que la définition de la porosité, la connectivité des pores ou encore la distribution de tailles de pores sont abordées en partie1 de cette thèse. Une brève étude des granulats et des principaux résultats expérimentaux concernant les caractéristiques thermiques a permis aussi de comparer plusieurs approches qualitatives proposées dans la littérature. Enfin, une attention particulière est consacrée à l'extension de l'étude théorique de mesure de coefficient d'absorption d'un matériau et l'étude pratique des mélanges granulaires.

- La deuxième partie, qui contient deux chapitres, est entièrement consacrée aux techniques expérimentales relatives à des méthodes usuelles de mesure de la conductivité thermique, résistances mécaniques et du coefficient d'absorption acoustique d'un béton.

Les différentes caractéristiques chimiques et physico-chimiques des matériaux utilisées pour la confection de la matrice de notre composite ont été rapportées dans cette partie.

Le deuxième chapitre de cette partie est consacré aux essais expérimentaux. Il se pratique essentiellement par la reformulation des mélanges granulaires renfermés dans les bétons de granulats légers dans le cadre de l'optimisation des principales caractéristiques chimiques, physiques, mécaniques, thermiques et acoustiques.

A notre avis, dans ce cadre, l'exploitation des résultats expérimentaux y afférents faciliterait la définition de la formulation des bétons de pouzzolanes donnant les caractéristiques pratiques du présent travail

Chapitre I : DESCRIPTION DU MATERIAU BETON

De tous les matériaux fabriqués par l'homme, le béton est celui qui est le plus couramment utilisé. La grande popularité du béton s'explique d'abord par le fait qu'il est assez économique à produire.

I.LE BETON ET SES COMPOSANTS

Le mot béton, a été introduit par l'ingénieur français Belider (1697-1761) et vient de « betun, becton, beter » qui signifie « se solidifier ».

Le béton apparaît comme l'outil privilégié de la conception des projets de logement : outre la richesse de sa palette de matières et de textures qui, du béton brut aux traitements les plus subtils, autorise des choix plastiques adaptés à chaque contexte. Il offre des solutions techniques diversifiées qui permettent de répondre aisément aux différents besoins (Structure, isolation acoustique, sécurité incendie, etc...), que ce soit pour le bâtiment ou pour le traitement des sols et les aménagements urbains.

De manière la plus générale le matériau béton, est un composite dans lequel on distingue deux phases : la matrice ou la pâte du ciment durcie et les granulats c'est-à-dire les gravillons et sable.

I.1.Microstructure de la pâte de ciment

L'histoire du ciment commence en 3000 Avant. 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, la pouzzolane.

Le ciment est l'ingrédient essentiel pour la formation du béton. Mélangé avec de l'eau, il forme la pâte de ciment et donc la matrice du béton. Le terme ciment désigne plusieurs catégories de produits, chacune étant définie par sa composition et des classes caractérisant les résistances mécaniques atteintes à des échéances données après le début de l'hydratation. Selon la norme française NF P 15-301 [1], les ciments sont regroupés en cinq types principaux : le ciment Portland (type I), le ciment Portland composé (type II), le ciment de haut Fourneau (type III), le ciment pouzzolanique (type IV) et le ciment au laitier et aux cendres (type V).

En 1824, Joseph Aspdin 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. Le ciment Portland, le plus répandu parmi les liants hydrauliques, est un mélange de gypse et clinker.

Les principaux constituants d'un ciment, définis d'après la norme NFP 15-301 modifiée en 1995 [2] sont :

- Le clinker Portland qui entre dans la composition de tous les ciments.
- Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement de la scorie fondue de composition convenable provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Pour convenir à son emploi en cimenterie, il doit présenter des propriétés hydrauliques latentes, c'est à dire qui se manifestent quand le laitier subit une activation convenable [3].
- Les pouzzolanes naturelles sont des produits composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer qui présentent naturellement ou artificiellement des propriétés pouzzolaniques.

- Les cendres volantes siliceuses ou calciques sont des particules pulvérulentes obtenues lors du dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudières alimentées au charbon pulvérisé.
- Les schistes calcinés peuvent être utilisés sous réserve de caractéristiques convenables.
- Les calcaires résultent du broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) supérieure à 75%.
- Les fumées de silice sont des particules très fines ayant une forte teneur en silice amorphe, provenant de la réduction du quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique.
- Le sulfate de calcium (gypse) permet de régulariser la prise.
- Les constituants secondaires sont présents dans des proportions n'excédant pas 5% en masse. Ils sont obtenus par broyage fin de matières minérales, artificielles ou naturelles. Ils sont ajoutés afin d'améliorer les propriétés physiques du ciment telles que l'ouvrabilité, le pouvoir de rétention d'eau.
- Les additifs sont utilisés pour améliorer la fabrication ou les propriétés des ciments. Ils sont introduits au moment du broyage ou lors du gâchage. Par ailleurs, la quantité totale des additifs ne dépasse pas 0,5% en masse.

Pour simplifier les écritures nous utilisons les notations cimentières qui sont présentées dans le tableau ci-après :

Tableau n°01 : Convention chimique cimentière

Formule chimique	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	H ₂ O	SO ₃
Convention cimentière chimique	C	S	A	F	H	S̄

Le clinker est un produit obtenu en cuisant vers 1450°C des mélanges appropriés de calcaire et d'argile. Le clinker du ciment Portland est donc un mélange de plusieurs constituants minéralogiques [3]. La fonction du gypse dans le ciment Portland est d'éviter une prise trop rapide du clinker. Les principaux constituants du clinker et leur composition approximative sont présentés dans le tableau n°02.

Les caractéristiques granulaires du ciment sont exprimées par sa granulométrie et sa finesse de mouture.

Tableau n°02 : Composition chimique du ciment

Matières	Formule chimique	Convention chimique	Pourcentage
Silicate tricalcique	3 CaO.SiO ₂	C3S	50% - 70%
Silicate bicalcique	3CaO.SiO ₂	C2S	15% - 30%
Aluminate tricalcique	3CaO.Al ₂ O ₃	C3A	5% - 10%
Alumino ferrite tétracalcique	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C4AF	5% - 15%

I.1.1.Hydratation

L'hydratation du ciment est l'ensemble de réactions chimiques qui se produisent entre le ciment et l'eau. Ces réactions vont commencer dès la mise en contact de ces deux phases : lorsque l'on ajoute de l'eau à la poudre de ciment, les produits anhydres vont progressivement se transformer en hydrates.

Le silicate CSH, qui occupe le 50% à 70% de la masse du ciment, est le principal constituant du ciment portland hydraté. C'est le gel de tobermorite et c'est lui qui confère au ciment sa

résistance. Sa forme est très variée et il ne forme pas de véritable réseau cristallin. La variabilité vient du ratio C/S du mélange anhydre et de la température de cure.

La portlandite CH, qui occupe le 25% à 27% de la masse du ciment, est le second constituant du ciment portland hydraté. Elle se présente sous la forme de plaquettes hexagonales à proximité des grains de ciments partiellement hydratés. Elle se forme avant les CSH et son apport en terme de résistance est très faible.

I.1.2.Prise et durcissement

L'hydratation du ciment entraîne une évolution mécanique du matériau que l'on nomme prise et durcissement. Dès que le liant est mélangé à l'eau, des interactions attractives se manifestent entre les grains anhydres lorsqu'ils se rencontrent et les maintiennent en contact ce qui conduit à la formation d'une structure connexe. Cette structure peut facilement être détruite par une sollicitation mécanique, mais se reconstruit dès l'arrêt de celle-ci. C'est la période d'ouvrabilité. En revanche, dès que le processus de dissolution-précipitation s'accélère, les hydrates qui précipitent renforcent cette structure. C'est la prise et le durcissement.

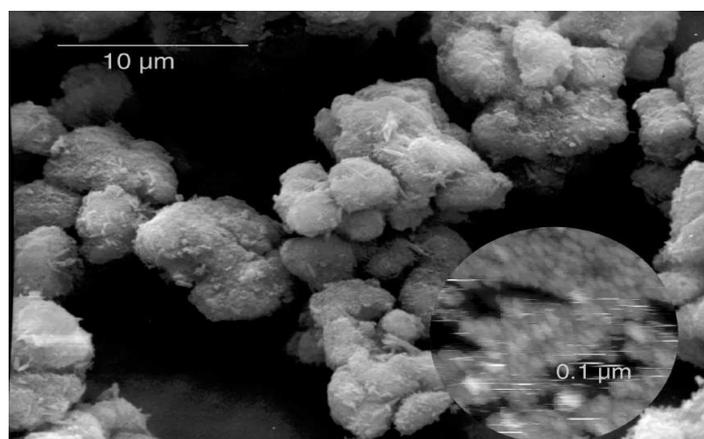


Figure n°01 : Structure connexe formée par les grains de ciment recouverts par des C-S-H. L'encart circulaire montre l'assemblage des particules de C-S-H qui renforce cette structure. [3]

I.2.l'eau

L'eau dans le béton peut être présentée sous des formes différentes, comme l'eau libre, capillaire, adsorbée à la surface des constituants solides, chimiquement liée avec les hydrates du ciment, absorbée par les granulats. Tous les vides de la matrice sont plus ou moins remplis d'eau. Elle sert aussi à mouiller les agrégats, et donc à assurer un bon lien avec la pâte de ciment. L'eau peut aussi présenter des caractéristiques négatives : celle qui reste en excès dans les pores est responsable de certains phénomènes entre autres le retrait de dessiccation. L'eau va donc jouer un rôle essentiel dans le comportement du béton non seulement du point de vue de son comportement mécanique mais aussi de la durabilité.

L'eau capillaire est constituée de la phase condensée remplissant le volume poreux et séparée de la phase gazeuse par des ménisques. Elle obéit donc aux lois de la capillarité. Les gros pores sont des volumes dans lesquels réside de l'eau libre.

L'eau adsorbée physiquement est en fait le résultat de la condensation de l'eau vapeur sur la surface du solide formé par les grains de ciment et les granulats. La liaison est assurée par des attractions de type Van der Waals. L'eau chimiquement liée peut être de l'eau de solvatation ou

de l'eau de cristallisation. La solvatisation correspond à la formation d'un ion complexe alors que la cristallisation correspond à l'emprisonnement de l'eau dans la structure solide.

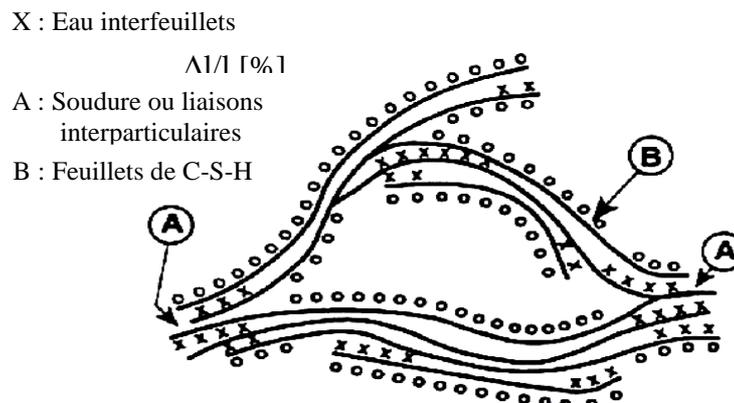


Figure n°02: Représentation schématique des feuillets de C-S-H [4]

I.3.Granulat

Les matériaux réels sont toujours discontinus, hétérogènes et anisotropes, à une ou plusieurs échelles d'observation comprises entre celle de l'observation macroscopique et celle des atomes (exemple : matériaux granulaires, poreux ou polycristallins).

L'influence des agrégats est très forte sur le béton en terme de performances mécaniques. Les agrégats présentent en général de bonnes caractéristiques mécaniques, meilleures de celles de la pâte de ciment qui est donc le maillon faible du béton du point de vue de la résistance mécanique. Il n'est pas suffisant de choisir un agrégat de bonne qualité, mais il faut aussi une granulométrie appropriée c'est-à-dire la distribution de taille des agrégats doit conduire à une réduction du volume des vides et à une optimisation de la compacité du béton.

Dans le béton frais, les granulats servent au remplissage de l'espace (ils occupent environ 70% de volume). De plus en raison de leur porosité ouverte, ils peuvent absorber une certaine quantité d'eau (effet de mouillage) mais dans le béton durci, les granulats apparaissent comme des inclusions dures. Ils ont un rôle important de donner le matériau durci une résistance importante. Dans ce cas, lorsque le béton est soumis à une sollicitation, la rupture peut commencer dans l'agrégat, la matrice ou l'interface d'agrégat matrice; ou n'importe quelle combinaison de ces derniers peut se produire.

Diverses natures de granulats légers sont employées pour la fabrication de bétons. Dans le domaine morphologique, on assiste à l'existence de toute une gamme de variétés granulaires ; grains relativement scoriacés, ronds et ramassés, anguleux ou exfoliés.

Cependant, leur texture vacuolaire offre aux granulats légers une masse volumique plus ou moins faible par comparaison avec ceux qui sont d'usage courant.

Les granulats légers se classifient en deux catégories en fonction de leur origine. Ainsi, il existe les granulats naturels et les granulats artificiels.

I.3.1.Granulats naturels [5]

Avec ou sans traitements thermiques et/ou chimiques, ce type de granulats forme deux classes, à savoir :

- Les granulats naturels comme les pouzzolanes naturelles qui fait l'objet de la présente étude ;

- Les granulats naturels traités comme les schistes, les argiles expansées, la vermiculite exfoliée, le bois ...

1.3.1.1. Les pouzzolanes naturelles

Les pouzzolanes naturelles sont exploitées pour la production des ciments composés économiques. Elles sont des cendres volumiques dont l'utilisation est proche de celle des cendres volantes mais elles sont produites à haute température par les éruptions volcaniques.

Les pouzzolanes naturelles sont aussi des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre. Les variétés de pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées en Amérique du Nord à l'heure actuelle comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin. De la terre de diatomées est également utilisée en Californie.

1.3.1.2. Granulats de bois

Les granulats proviennent essentiellement de troncs d'épicéa ressués au moins deux mois en forêt. Le bois réceptionné est stocké sur parc de façon à assurer un roulement minimum de 2 mois entre la réception et l'utilisation. [6]

Les troncs sont déchiquetés par des couteaux dont la coupe détermine la longueur des granulats environ 20 mm.

La matière passe ensuite dans un broyeur dont les marteaux sont réglés en fonction de la qualité désirée. Les granulats subissent un traitement thermique ayant pour but de retirer à ces derniers toute leur eau libre et également une partie de l'eau adsorbée.

Les caractéristiques des granulats sont données ci-après :

- Granulométrie : 4 à 10 mm,
- Longueur : 20 mm,
- Masse volumique sèche (à 12% d'humidité en masse) : 150 Kg/m³,
- Masse volumique moyenne à la livraison : 220 Kg/ m³,
- Conductivité thermique sèche : 0,07 W/m.K,
- Chaleur spécifique (à 10% d'humidité) : 0,446 Wh/Kg.K,
- Diffusivité thermique : 0,00057 m²/h

1.3.2. Granulats artificiels

Ces granulats comprennent les déchets industriels ainsi que les produits de manufacture ayant une structure grenue et expansée comme la mâche fer, sous produit de la distillation du charbon, du laitier expansé, du caoutchouc, du polystyrène, les sous produits de l'industrie métallurgique voire les résidus de l'industrie du bois.

1.3.2.1. Poussières de caoutchouc

Les poussières de caoutchouc utilisées sont issues de la transformation par déchiquetage de déchets de l'industrie automobile. Il s'agit de la poudre récupérée dans les dépoussiéreurs (hottes d'aspiration) et dont la taille est inférieure à un millimètre. La masse volumique absolue des poussières de caoutchouc, mesurée à l'aide d'un pycnomètre à air, est de 440 Kg/m³.

1.3.2.2. Polystyrène

Les billes de polystyrène sont parfaitement sphériques. Cela permet d'être en accord avec les modèles d'empilement classiques [7]. La coupe d'une bille révèle une structure alvéolaire et une enveloppe constituée de deux membranes. Ceci explique d'une part son extrême légèreté et d'autre part sa totale imperméabilité à l'eau. En effet, des essais réalisés par Yamura et al [8] ont

montré que des billes de polystyrène immergées dans l'eau pendant un mois n'ont pas absorbé d'eau.

Les propriétés mécaniques des billes de polystyrène expansé sont négligeables devant celles de la matrice cimentaire. En effet, ces billes ont un module d'Young compris entre 4 et 8 MPa et une résistance en compression de l'ordre de 80 KPa [7]. Les bétons légers de polystyrène ont une faible conductivité thermique notamment pour un taux de billes très important (de l'ordre de 70%) [7]. Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique dans les bâtiments.

Cependant, bien qu'ils soient technologiquement très prometteurs, les bétons légers de polystyrène posent encore de nombreux problèmes au niveau de la compréhension de leurs propriétés mécaniques en liaison avec leur microstructure.

1.3.2.3.les pouzzolanes artificielles

Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux ou aluminosiliceux qui, en soit, ne présentent peu ou pas de propriété liante, mais qui, sous forme finement divisée, en présence d'humidité et à des températures ambiantes normales, réagissent avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment Portland pour former des composés qui possèdent des propriétés liantes.

Les pouzzolanes artificielles les plus couramment employées sont les cendres volantes des centrales thermiques, les laitiers de haut fourneau, les bauxites et les argiles calcinées.

I.4. Les adjuvants

Les adjuvants sont de produits en faible dosage ajoutés au béton afin d'améliorer certaines qualités. En principe, l'effet produit par un adjuvant peut être obtenu en modifiant la composition du béton : la justification pour l'emploi d'un adjuvant est l'avantage qu'il apporte par rapport aux autres solutions. Par conséquent, même s'ils ne sont pas indispensables, ils s'avèrent nécessaires pour obtenir le meilleur béton possible.

I.4.1. Retardateurs ou accélérateurs de prise

Les retardateurs de prise sont des molécules organiques qui empêchent la nucléation du CSH [8]. L'effet inverse est obtenu grâce aux accélérateurs de prise. On peut dans la même catégorie introduire les retardateurs ou accélérateurs de résistance qui rendent plus lent ou rapide le développement des caractéristiques mécaniques.

I.4.2. Plastifiants

Les plastifiants (ou fluidifiants) sont sans doute les adjuvants les plus utilisés dans la production du béton. Ils ont la propriété de rendre plus facile la maniabilité du béton, et donc, à maniabilité égale, de réduire fortement la quantité d'eau de gâchage et d'augmenter donc la résistance du béton (en diminuent le rapport e/c). Un plastifiant réduit le rapport eau/ciment de l'ordre du 5%; lorsqu'il est nécessaire d'obtenir la réduction du rapport e/c de l'ordre de 20-40% on parle d'adjuvant super-plastifiant.

I.4.3. Les entraîneurs d'air

Ils sont à base de molécules tensioactives qui permettent la formation, au moment du malaxage, d'un réseau uniforme de petites bulles d'air qui subsistent dans le béton durci. Ceci permet l'amélioration de la résistance au gel du béton : la présence des bulles d'air proches des

pores capillaires remplis d'eau en train de se transformer en glace, permet la réduction de la pression hydraulique grâce au passage de l'eau du pore capillaire vers les bulles d'air. Au moment du dégel, l'eau rentre dans les pores capillaires par succion ; les bulles ont un diamètre de l'ordre de 100 – 500µm, donc considérablement plus grand que le diamètre des pores capillaires. L'effet de protection par rapport au gel offert par les micro-bulles est préservé tant qu'elles sont remplies d'air et pas d'eau lorsque leur action est requise.

I.4.4.Les waterproofers

Adjuvants imperméabilisants, les waterproofers ou hydrofuges sont des produits repoussant l'eau qui protègent le béton de la pénétration de l'eau pour des pressions très basses, comme c'est le cas lors de pluies.

I.5.Caractéristiques de la structure poreuse

La structure poreuse de la pâte de ciment hydraté et du béton durci peut être caractérisée à travers des paramètres tels que la porosité, la distribution de la taille des pores, la connectivité ou la tortuosité des pores. Ces paramètres influencent aussi bien les propriétés mécaniques que la durabilité du béton par l'intermédiaire des propriétés de transferts.

I.51.Porosité

Nous rappelons que la porosité totale p d'un matériau poreux est définie par :

$$P = V_p / V_t$$

où V_p est le volume des vides du matériau, alors que V_t est le volume total. La porosité totale d'un béton ordinaire durci est de l'ordre de 10 % [9]. Cette porosité résulte de celle de la pâte, des granulats (porosité de l'ordre de 2 % pour certains granulats calcaires) [10] et de l'interface pâte-granat. Cependant, différents niveaux de connectivité peuvent exister pour un pore : interconnecté aveugle (bras mort) isolé. Les pores interconnectés permettent le transport de matières dans le matériau, contrairement aux pores aveugles ou aux pores isolés.

1.5.1.1. Détermination de la porosité

La porosité (ou le volume poreux) est définie comme le volume cumulé des pores par unité de volume de milieu poreux. Sa détermination est généralement une technique destructive. Les techniques les plus usuelles utilisées sont :

- Porosité à l'eau : la porosité totale est mesurée avec cette méthode. Elle permet de connaître la quantité d'eau totale contenue dans le béton après le séchage et la saturation de l'échantillon.
- Porosité au mercure : permet de connaître la porosité en poussant du mercure à travers les réseaux de pores ouverts du béton. La quantité de mercure qui entre dans le béton à différentes pressions permet de lier la pression aux différentes tailles des pores et d'obtenir la distribution de la taille des pores. Avec cette méthode on peut explorer des pores de tailles 50Å-100µm c'est à dire la région des pores capillaires.

La principale limite des méthodes de détermination de la porosité est liée au fait que, indépendamment du fluide utilisé pour la percolation, tous les pores ne vont pas être remplis par la phase mouillante. En plus, il faut aussi prendre en compte le fait que certains liquides (notamment l'eau) ne sont pas inertes vis à vis de la matrice cimentaire i.e. ils entraînent un changement de la microstructure.

1.5.1.2. Distribution de la taille des pores

Le béton est caractérisé par un large spectre de taille des pores. Deux familles de taille de pores sont à considérer :

- Les pores capillaires
- Les pores internes aux hydrates

Les pores capillaires sont détectables par porosimétrie au mercure. Ils représentent les espaces intergranulaires et sont directement liés au rapport Eau / Ciment du mélange de la pâte de ciment. En raison de la maniabilité du béton (surtout ordinaire), le volume d'eau fourni pour la fabrication du béton est supérieur au volume nécessaire pour l'hydratation. Par conséquent, cet excédent d'eau s'évacue par séchage au cours du temps et laisse des pores capillaires disponibles pour la circulation de gaz. Cependant, les pores internes aux hydrates (en particulier au gel C-S-H), ne sont pratiquement pas affectés par le rapport Eau / Ciment. Cette porosité, intrinsèque aux hydrates, peut être observée à l'aide de l'adsorption gazeuse [9].

A ces deux familles de taille de pores, les vides dus aux bulles d'air et les fissures (diamètre supérieur à 1 μm) sont à ajouter.

1.5.1.3. Connectivité

La connectivité (C_t) est un paramètre de la topologie de la structure poreuse [11] qui caractérise le degré avec lequel une structure poreuse est connectée. Elle correspond au plus grand nombre de branches du réseau poreux pouvant être coupées sans déconnecter de nœuds du reste du réseau. Dans notre cas, nous retenons la relation :

$$C_t = b - nd + 1$$

où b est le nombre de branches (pores, bras, cavités) et nd le nombre de nœuds connectés aux différentes branches.

Le schéma suivant présente l'exemple d'un réseau poreux dans lequel chaque nœud représente un pore, chaque nœud étant relié ou non à ceux qui l'entourent.



Figure n°03 : Représentation schématique de la connectivité d'un réseau poreux

Remarquons qu'un pore isolé, mais qui se connecte par exemple par microfissuration aux pores interconnectés, peut désormais participer aux écoulements à travers le matériau. On a alors une connectivité qui augmente par fissuration.

1.5.1.4. Tortuosité

La tortuosité (τ), introduite dans le modèle géométrique de la perméabilité de J.J. Kollek [12], caractérise le chemin d'écoulement d'un fluide à travers le réseau poreux par :

$$\tau = (L_e/L)^2$$

Dans laquelle L est la longueur moyenne des lignes traversant l'échantillon et L_e la longueur de l'échantillon. Une estimation expérimentale de ce paramètre peut être obtenue en utilisant diverses méthodes comme la porosimétrie au mercure, l'analyse d'image, la diffusion de gaz et d'ions ou les ondes acoustiques.

Un matériau poreux constitué d'un réseau de pores fortement tortueux et discontinu est généralement très imperméable aux agents agressifs.

I.5.2 Perméabilité

La perméabilité K d'un milieu poreux correspond à son aptitude à se laisser traverser par un fluide (liquide ou gaz) sous l'effet d'un gradient de pression. La perméabilité représente le deuxième indicateur de la durabilité de béton. Elle dépend fortement du réseau poreux et de sa connectivité. Plus la valeur de K est élevée, plus le matériau est perméable et, inversement, plus la valeur de K est faible, plus le matériau est imperméable.

La perméabilité K est une caractéristique intrinsèque du matériau dans la mesure où certaines conditions sont satisfaites. Elle s'exprime en m^2 . L'écoulement doit se faire dans des conditions données (température et caractéristiques constantes du matériau en fonction du temps) et il ne doit pas y avoir d'interactions physiques et chimiques entre le fluide et le matériau ce qui est rarement vrai dans le cas du béton.

Dans le cas du béton, on peut mesurer expérimentalement la valeur K en utilisant des appareils spécialement conçus à cet effet. En pratique, des méthodes différentes sont utilisées pour mesurer la perméabilité à l'eau et au gaz du béton.

I.5.2.1. Loi de Darcy [13]

L'étude fondatrice des écoulements dans les poreux a été réalisée par l'ingénieur Darcy en 1856 avec un « Mémoire sur les fontaines publiques de la ville de Dijon ». Il a formulé la loi de la vitesse d'écoulement de l'eau dans un corps poreux, à la suite de travaux sur l'écoulement de l'eau dans une couche filtrante de sable. D'après Darcy, cette loi se traduit par l'équation :

$$Q = K.S. \frac{H+e}{e}$$

Où:

- Q : Volume d'eau écoulé par unité de temps (débit).
- S : Surface de la couche filtrante.
- e : Epaisseur de couche.
- H : Hauteur de la colonne d'eau au-dessus de la couche filtrante.
- K : Coefficient lié à la nature du sable, lorsque la pression sous le filtre est égale à la pression atmosphérique.

Considérons l'ensemble du matériau poreux de section apparente A , siège d'un écoulement établi en régime laminaire. Le débit volumique Q_x du fluide de viscosité μ dans la direction Ox sous un gradient de pression est donné sous forme différentielle par la loi de Darcy,

$$Q_x = \frac{K_x}{\mu} A \frac{dP}{dx}$$

Avec :

- K_x : Perméabilité au fluide du matériau dans la direction Ox considérée,
- μ : Viscosité du fluide,
- A : Section,
- P : Pression,
- x : Longueur.
- Q_x : Débit volumique du fluide.

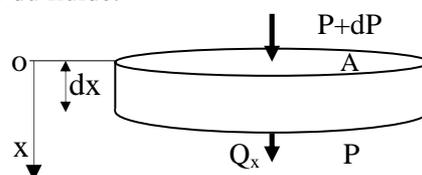


Figure n°04 : Loi de Darcy sur un élément de volume

Des écarts avec la loi de Darcy sont observés expérimentalement [13]. En effet, pour une mesure de perméabilité sur un matériau donné (âge et préconditionnement fixés), la nature du fluide s'écoulant à travers le matériau et la pression appliquée pendant la mesure influencent les résultats car il existe des interactions fluide-milieu poreux. Enfin, l'état hydrique du matériau influence sa perméabilité.

Il est à remarquer qu'un Darcy correspond à la perméabilité d'un corps assimilé à un milieu continu et isotrope à travers lequel un fluide homogène de viscosité égale à celle de l'eau à 20°C (un centipoise) s'y déplace à la vitesse de 1 cm/s sous l'influence d'un gradient de pression de 1 atm/cm (10^7 Pa/m). 1 Darcy = $0,97 \cdot 10^{-12} \text{m}^2$

1.5.2.2. Rapport E/C

De nombreuses études conduites notamment sur des pâtes de ciment, ont confirmé que la porosité est directement liée au rapport E/C en raison de son influence sur la structure du réseau de pores capillaires. Dans les conditions de durcissement habituelles, l'hydratation s'effectue sans apport d'eau externe, au moins au cœur du béton. La porosité capillaire d'une pâte de ciment totalement hydratée sans apport d'eau externe, diminue rapidement avec le rapport E/C, jusqu'à une valeur de 0,42 environ d'après modèle de Powers, [14]. Pour des rapports E/C inférieurs à 0,42, la perméabilité et la diffusivité diminuent moins rapidement.

Les bétons à fort ratio E/C contiennent un pourcentage élevé de pores. Ils possèdent donc une capacité de rétention importante de l'eau dans le béton.

Dans le cas où le béton en service serait exposé pendant une longue durée à une source d'eau non agressive et si l'on recherche à réduire la perméabilité, il paraît intéressant de réduire le rapport E/C en dessous de 0,36. Dans ces conditions, l'apport d'eau externe permet une poursuite de l'hydratation jusqu'au remplissage de la porosité capillaire [9].

1.6. Comportement et chargement du béton

Lors du durcissement du béton, une opposition à la contrainte entraîne automatiquement une fissuration, qui dépend du compromis (suivant la nature du ciment) entre la vitesse du retrait et la vitesse d'accroissement de la résistance à la traction [15].

Sous des sollicitations courantes de courte durée, le béton durci est généralement considéré comme un matériau élastique linéaire [16]. C'est le cas par exemple pour des chargements en compression ne dépassant pas 50 à 60% de la résistance à la rupture en compression [15]. En traction, le comportement est plus linéaire, mais la rupture apparaît plus tôt qu'en compression. Les résistances en traction des bétons étant 10 à 15 fois plus faibles que celles en compression.

1.6.1. Résistance mécanique

La résistance mécanique est l'une des caractéristiques essentielles du béton. Le béton est employé, en général, comme matériau porteur et le taux de travail d'un ouvrage en béton dépend de sa résistance mécanique qui évolue avec le durcissement du béton. La résistance mécanique d'un béton dépend de plusieurs paramètres à savoir :

➤ la nature et la qualité des constituants (ciments, granulats, eau, adjuvant) : un agrégat arrondi et doux aura une adhérence faible avec la matrice, alors qu'un agrégat angulaire ou irrégulier ou un agrégat avec une texture de surface rugueuse a une bonne adhérence avec la matrice, ce qui donne une bonne résistance au béton.

- les conditions de mise en oeuvre de ces constituants ;
- les conditions thermo hygrométriques ambiantes de conservation.

Elle est définie par la résistance à la compression et par la résistance à la traction.

1.6.1.1. Résistance à la compression

Elle est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton et en béton armé. Le béton est caractérisé par la résistance à la compression R_{c28} mesurée sur des éprouvettes écrasées à 28 jours selon la norme NF EN 12390-3 [17].

1.6.1.2. Résistance à la traction

Elle est moins étudiée que la résistance en compression car le béton est conçu essentiellement pour résister à la compression, et son comportement en traction est quasi fragile. La connaissance de la résistance en traction est indispensable afin de caractériser le comportement complet du béton ou lorsqu'on souhaite estimer une charge correspondante à une certaine ouverture de fissure qui gouverne la résistance du béton à la pénétration des agents agressifs (vis à vis de la durabilité).

Le comportement en traction du béton peut être identifié par l'essai de flexion sur trois points, désignée par F_{t28} [18].

I.6.1. Evolution des résistances mécaniques du béton

Les propriétés mécaniques du béton évoluent en fonction de l'état d'avancement des réactions d'hydratation. La figure n°05, présente schématiquement le processus de durcissement du béton et les différentes phases de la vie d'un béton. La période appelée court terme démarre avec le commencement des phénomènes de prise du béton. C'est une période caractérisée par une grande activité chimique, suivait d'une croissance rapide de la résistance du béton (Vernet et Cadoret, 1992) [19].

Au-delà de la période de prise, le béton durci et acquiert ses performances mécaniques, entre autre la résistance qui augmente avec la diminution du rapport E/C, qui conditionne la porosité et l'avancement de l'hydratation du ciment. La résistance d'un ciment portland croit irrégulièrement. Au troisième jour, elle atteint à peu près 40 à 50% de la résistance caractéristique du ciment. Et au septième jour, de 60 à 70%, après l'évolution de la résistance, se ralentit, pour atteindre la résistance caractéristique au 28 jour [15].

Cependant, parmi les facteurs qui influent sur la résistance de la pierre du ciment ainsi que sur sa vitesse de durcissement, on peut citer : la composition minéralogique du ciment sa finesse de mouture, le rapport E/C, etc.

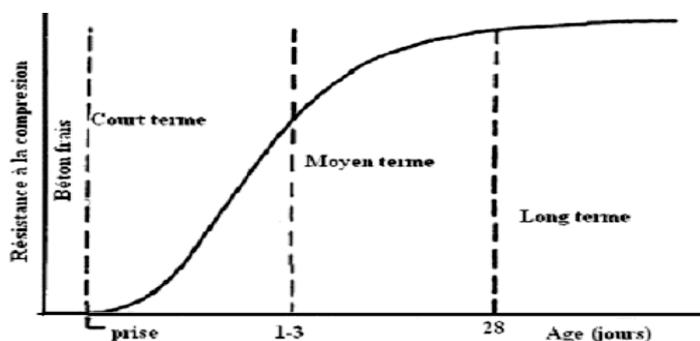


Figure n°05: processus de durcissement du béton représenté schématiquement par l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps, d'après Byfors [20]

I.6.2. Influence du rapport E/C sur les résistances du béton

Le rapport E/C est un indice important, car il influe de façon sensible sur la résistance mécanique du béton. Sachant que la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation du ciment est de l'ordre de 28% de la masse du ciment actif. Un très faible E/C peut donc empêcher l'hydratation complète des grains de ciment, ce qui entraîne une chute de résistances mécaniques finales. Aussi, un rapport E/C élevé entraîne-t-il un excès d'eau, qui ne sera jamais lié au particule de ciment. L'évaporation de cette eau crée une porosité à l'intérieure de la pâte durcie, qui affaiblit les résistances mécaniques du béton et diminue sa durabilité [15].

II.DEFORMATION THERMIQUE DU BETON

Comme la plupart des matériaux, le béton subit une déformation thermique, lorsqu'il est soumis à un changement de température. La déformation thermique du béton est la superposition des déformations de la matrice et des granulats au cours de l'échauffement.

La déformation totale d'une éprouvette de béton non chargée soumise au chauffage est due essentiellement :

- à l'expansion thermique des constituants du béton,
- au retrait de dessiccation de la pâte,
- aux transformations chimiques au sein du béton,
- aux fissurations,
- et à la détérioration physique des divers constituants.

Dans ce paragraphe, nous présentons les effets physico-chimiques de la température sur la pâte et sur les granulats, et puis nous étudions par la suite le comportement à haute température du béton

II.1.Effet thermique de la pâte de ciment

En raison de la présence de l'eau sous différentes formes dans le béton, comme nous l'avons déjà dit [15], les principales modifications physico-chimiques se passent dans la pâte de ciment. Elle durcit et se dilate seulement dans la plage de températures allant jusqu'à 150°C [21]. A partir de 150°C, la pâte de ciment subit un retrait important. Ce mouvement provient de la diminution de la tension capillaire de l'eau absorbée dans la pâte, au cours de l'échauffement.

J. Lemaitre and J. Mazars [22] ont observé entre 200 et 300°C, à l'aide de la diffraction aux rayons X, un phénomène d'hydratation qui se traduit par une augmentation de la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et par une diminution de C3S.

Compte tenu de la diversité des phénomènes physiques et chimiques qui se produisent dans la pâte de ciment chauffé et notamment de l'irréversibilité des déformations de celle ci, il est difficile de parler de coefficient de dilatation thermique pour ce matériau. La dilatation thermique ne peut pas être considérée comme une grandeur physique, comme c'est le cas du coefficient de la dilatation d'un matériau stable et homogène.

II.2.L'eau dans le béton à haute température

D'abord, l'eau a une influence sur le béton à température ambiante en étant, en premier lieu, l'une des composantes de la réaction chimique de formation du CSH. Lorsqu'on dépasse 100°C, l'eau libre ou évaporable quitte le béton avec une influence sur certaines caractéristiques (ex. conductivité, expansion thermique, . . .). A partir de la température conventionnelle de 105°C, on

considère que toute l'eau libre a quitté le béton, et que la réaction de dissociation de la pâte de ciment commence (déshydratation). Ceci entraîne toute une série de modifications dans le béton en affectant toutes ses propriétés (mécaniques, de transport, . . .).

Ensuite, la pression dans les pores, avec la vaporisation de l'eau, monte et contribuerait au phénomène de spalling. Dans le cadre de ce processus, la perméabilité joue un rôle très important.

Enfin, la présence d'éléments légers dans l'eau, notamment l'hydrogène, joue un rôle dans la propagation des radiations nucléaires en ralentissant leur diffusion [23].

Il est à remarquer aussi qu'après refroidissement, l'eau libre supplémentaire que l'on retrouve dans le béton, se lie au ciment anhydre. Par contre, la réhydratation du CaO forme de l'ettringite secondaire, avec une augmentation significative du volume qui détruit la pâte de ciment.

II.3.Effet thermique des granulats

Les granulats constituent le squelette en principe du béton aux températures ambiantes (sauf cas pathologique, comme celui d'une réaction alcali-granat), mais aux températures élevées, leur comportement est totalement différent. Les granulats de pouzzolanes constituent 60-80% du volume du béton. Les variations de leurs propriétés durant l'échauffement ont une grande influence sur les propriétés du composite.

II.4.Effet thermique sur le béton

En général, la dilatation est une fonction linéaire de la température. La simple prise en compte des propriétés thermiques (conductivité thermique, chaleur spécifique) n'est pas suffisante pour décrire de manière satisfaisante le comportement du béton. Un chauffage entraîne dans le béton de forts changements au niveau de sa microstructure, changements qui entraînent une modification des propriétés acoustiques.

La déformation totale d'une éprouvette de béton non chargée soumise au chauffage est donc essentiellement au retrait de dessiccation de la pâte de ciment, à l'expansion thermique des granulats et aux fissurations d'où aux propriétés acoustiques.

II.4.1.Conductivité thermique

La conductivité thermique mesure l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Les principaux paramètres de cette variation sont: la teneur en eau, le type de granulat et la formulation du béton. Le degré de saturation est le facteur principal puisque la conductivité de l'air (la conductivité thermique de l'air à 20°C est de $0.0034 \text{ Wm}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) est inférieure à celle l'eau (la conductivité thermique de l'eau à 20°C est de $0.515 \text{ Wm}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$). Ainsi, la diminution de conductivité thermique en fonction de la température est assez marquée pour un béton de granulat silico-calcaire, faible pour un béton de granulats calcaires, et peu significative pour le béton léger [24].

La conductivité thermique du béton diminue, d'une manière générale, lorsque la température augmente. Ce comportement met en évidence la détérioration de la microstructure. Les microfissures limitent les transferts de la chaleur.

La teneur en eau, le type de granulat, le type de ciment et la formulation du béton sont les principaux paramètres de cette variation.

Les évolutions de la conductivité en fonction de la température proposées par le DTU et l'EUROCODE 4 [25] sont traduites sur les courbes suivantes :

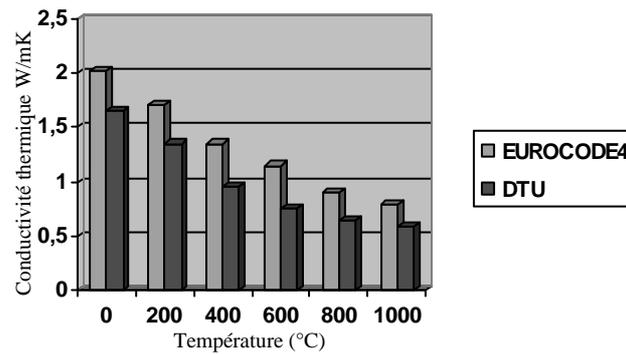


Figure n°06 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température selon les normes

II.4.2. Chaleur spécifique

La chaleur spécifique mesure la quantité d'énergie nécessaire pour faire monter de 1°C la température d'un kilogramme de matériau. Comparativement à la conductivité thermique, les variations de cette propriété avec la température sont moins maîtrisées (Neville 1990).

La chaleur spécifique varie peu avec le traitement thermique. L'EUROCODE 4 propose une évolution polynomiale du second degré en fonction de la température pour un béton sec, avec un pic entre 100 et 200°C caractérisant le changement de phase de l'eau contenue dans le béton.

$$\text{EUROCODE : } C_p = 900 + 80 \cdot (T/120) - 4 \cdot (T/120)^2 \text{ (J/Kg}^\circ\text{C)}$$

Le DTU considère une valeur constante de la chaleur spécifique telle que $c = 921/\text{Kg}^\circ\text{C}$.

II.4.3. Diffusivité thermique

La diffusivité thermique représente la vitesse à laquelle la chaleur se propage à l'intérieur d'un matériau. La diffusivité thermique dépend fortement de la teneur en eau du béton. Schneider (1988) a souligné l'importante dispersion observée sur les résultats de mesures expérimentales rapportés dans la littérature. L'auteur explique cette dispersion par la difficulté des mesures directes devant être réalisées en régime transitoire, et qui sont très sensibles aux conditions d'essais et au traitement thermique subi par les spécimens testés avant les mesures. On peut toutefois indiquer que la diffusivité thermique décroît progressivement avec la température.

II.4.4. Résistance en compression

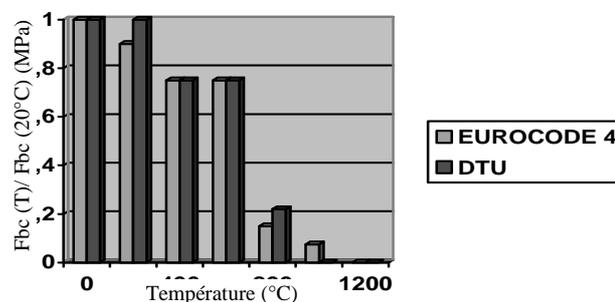


Figure n°07 : Evolution de la résistance en compression proposée par le DTU et l'EUROCODE4

Plusieurs auteurs ont remarqué que la raison principale de la diminution de résistance en compression du béton à haute température est l'évolution de la microstructure à cause de la déshydratation [26] [27].

La résistance en compression est donc proportionnelle au degré d'hydratation du béton. Le caractère irréversible de la réaction de déshydratation est à l'origine de la baisse résiduelle de la résistance. Nous représentons ci-après les courbes de l'EUROCODE4 et le DTU.

II.4.5. Résistance en traction

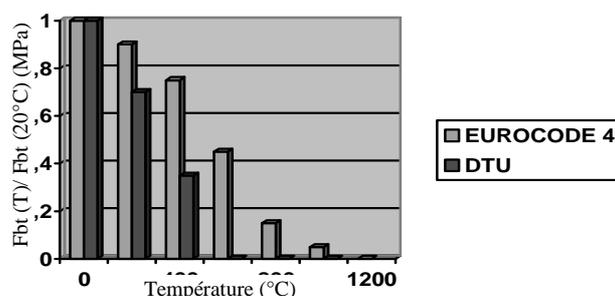


Figure n°08 : Evolution de la résistance en traction proposée par le DTU et l'EUROCODE4

Dans la littérature, il existe peu de résultats concernant l'évolution de la résistance en traction en fonction de la température. Bien que le béton soit principalement utilisé pour résister à la compression, la réponse à des sollicitations de traction est aussi importante pour une description complète de son comportement. Les valeurs proposées par l'EUROCODE4 et le DTU sont présentées sur les courbes de la figure n°08.

II.5. Interface pâte granulats

Au voisinage de l'interface pâte-granat, les conditions locales d'hydratation sont modifiées dès le début des réactions à cause de la présence d'un excès d'eau dû, soit à l'effet de paroi, soit au ressuage. Il en résulte, d'une part, une augmentation locale du volume des pores dans lequel les hydrates peuvent se développer et, d'autre part, la formation d'un gradient de teneur en eau. La structuration de la pâte ciment est ainsi modifiée sur une distance de quelques dizaines de micromètres. Cette zone interface influencée par la présence des granulats, appelée aussi « auréole de transition » est composée de fines aiguilles d'étringite et de particules d'hydroxydes de calcium non réactives enveloppant le grain inerte. (Figure n°9)

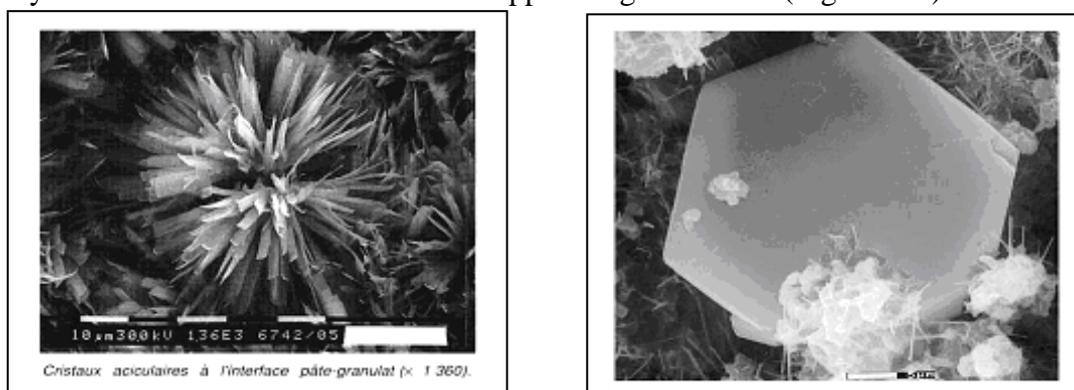


Figure n°09:(a)Aiguilles d'étringite à l'interface pâte de ciment – granulat. (b)Hydroxyde de calcium hexagonal (Portlandien) [28]

L'interface pâte de ciment/granulats est une zone plus poreuse que la matrice et ne possède pas une orientation préférentielle des cristaux. Elle est considérée comme le maillon faible du béton. L'eau adsorbée entourant le granulat entraîne, suite à son départ, une modification fondamentale de la liaison. Les granulats et la pâte se dilatent jusqu'à des températures de 150°C. Au-delà, on assiste à des dilatations thermiques opposées : dilatations et retrait de la pâte dû à la déshydratation. La liaison pâte/ granulats est alors fortement endommagée au cours du chauffage.

III. CONCLUSION

Ce chapitre avait pour objectif de faire quelques rappels sur les généralités du béton et son comportement à haute température. Plus de détails sur chaque espèce (notamment les phases solides et liquides) qui forment le béton ont été donnés. La compréhension des transformations microstructurales intervenant au sein de béton au cours d'un traitement thermique nécessite l'identification des mécanismes qui en sont responsables. Dans cet objectif, nous avons étudié l'évolution des propriétés du ciment portland, depuis son hydratation à basse température jusqu'à sa transformation à haute température.

On a toutefois déjà remarqué que, suite à la grande complexité et hétérogénéité du béton, la description et la prévision de son comportement à haute température s'avèrent très compliquées

Dans le prochain chapitre, on commence tout d'abord par introduire le comportement acoustique du béton.

Nous pourrions aussi commencer à établir quels sont les besoins expérimentaux et/ou théoriques en terme de caractérisation des phases qui s'avèrent nécessaires pour la modélisation de notre milieu poreux.