

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : Technologie

DEPARTEMENT : Génie Civil

N° :



DOMAINE : Science et Technologie

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Intitulé

**ETAT DE CONNAISSANCE SUR LE TRANSFERT
ET LA DURABILITE DU BETON**

Dirigé par:

Dr: BOUALLEG
SAIDA

Présenté Par:

SACI SOFIANE AYMEN
CHEMINI WALID

Année universitaire : 2021 /2022

Remerciements :

Au nom de Dieu, le Très Miséricordieux, le Très Miséricordieux, et que la prière et la paix soient sur les messagers les plus honorables, notre Prophète Muhammad, que la prière et la paix de Dieu soient sur lui.

Je veux remercier Dieu, remercier Dieu pour cela

La force de compléter cette lettre

Et pour exprimer ma gratitude

Mme Boualleg Saida

Je tiens à exprimer mes remerciements à tous ceux qui ont soumis

Aidez de près ou de loin à développer cet humble travail.

Contribuez à tous nos travaux

Formation, qui nous a fait aimer la science et la connaissance, de l'école primaire d'Elijah Elementary School of the Elijah

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À nous parents

À nous frères

À la famille

À toutes les amies

RESUME :

Cet mémoire vise à résumer l'état des connaissances sur le transport et la durabilité des bétons et des différentes méthodes d'essais développées en objectifs, ainsi que la démarche adoptée dans le cadre de ce travail coordonné impliquant plusieurs laboratoires précédemment rappelés. Des résultats importants ont également été présentés pour la compréhension des mécanismes (transport d'eau, carbonatation, perméabilisation des chlorures) ou des outils de caractérisation des paramètres liés à la durabilité en relation avec la corrosion des armatures Entre les ions chlorures et la matrice cimentaire,

les mots clés :

Durabilité du béton, réactions physiques, perméabilité, transfert du béton, réactions chimiques

ABSTRACT :

This dissertation aims to summarize the state of knowledge on the transport and durability of concretes and the various test methods developed as objectives, as well as the approach adopted within the framework of this coordinated work involving several laboratories previously mentioned. Important results were also presented for understanding the mechanisms (water transport, carbonation, chloride permeabilization) or tools for characterizing parameters related to durability in relation to reinforcement corrosion Between chloride ions and the cementitious matrix ,

keywords :

Durability of concrete, physical reactions, permeability, transfer of concrete, chemical reactions

ملخص :

تهدف هذه الرسالة إلى تلخيص حالة المعرفة حول النقل والمتانة للخرسانة وطرق الاختبار المختلفة التي تم تطويرها كأهداف ، بالإضافة إلى النهج المعتمد في إطار هذا العمل المنسق الذي يشمل العديد من المختبرات المذكورة سابقاً. كما تم تقديم نتائج مهمة لفهم الآليات (نقل المياه ، الكربنة ، نفاذية الكلوريد) أو أدوات لتوصيف المعلمات المتعلقة بالمتانة فيما يتعلق بتآكل التعزيز بين أيونات الكلوريد والمصفوفة الأسمنتية ،

الكلمات الدالة:

متانة الخرسانة ، التفاعلات الفيزيائية ، النفاذية ، انتقال الخرسانة ، التفاعلات الكيميائية

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
RESUME	
Liste des tableaux:	
Liste des figures:	
INTRODUCTION	13

Chpitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1-NOTION SUR LA DURABILITE:	15
I-2-DEVELOPPEMEN DURABLEDEFINSIONET EXPLICATION: ..	16
I-2-1-Des approches opposées sur la notion de durabilité:	16
I-2-2-Enjeux et objectifs du développement durable:	17
I-2-3-Un modèle économique en question:	18
I-2-4-Une nouvelle démarche : « agir local, penser global »:	19
I-2-5-Les trois piliers:	20
I-2-6-Répondre aux besoins des générations actuelles et à venir:	21
I-3-LA DURABILITE DANS LE CONTEXTE NORMATIF:	22
I-3-1-Le corpus normatif du béton : un ensemble de textes homogènes et cohérents:	22

I-3-2-Les normes de dimensionnement : les Eurocodes:.....	23
I-3-3-Les normes sur les constituants du béton:	26
Les normes d'essais sur béton	28
I-3-4-Les recommandations et les fascicules de documentation:	29
I-3-5-Les normes pour les produits préfabriqués en béton :	31

Chpitre II : La durabilité des bétons selon la norme NF EN 206-1

II -1-LES CLASSES D EXPOSITION:	35
II -1-1-Le choix de la classe d'exposition est de la responsabilité du maitre d'ouvrage:	35
II -1-2-Valeurs limites pour le classement des attaques chimiques:	38

II -2-SÉLECTION DES INDICATEURS DE DURABILITÉ ET SPÉCIFICATIONS ASSOCIÉES	39
--	----

II -3-VIS-A-VIS DU RISQUE DE CORROSION DES ARMATURES: .	39
--	----

Chpitre III : MECANISMES D'ALTERATION DES BETONS

III -1-ACTIONS DES SULFATES :	43
III -1-1- Les sources de sulfates Dans le milieu extérieur au béton, les principales:	43
III -2-PROCESSUS D'ATTAQUE SULFATIQUE :	44
III -2-1-Réactions et attaques sulfatiques:	44
III -2-2-Réactions et attaques sulfatique interne :.....	44
III -2-4-Réactions et attaques sulfatique externe :	45
III -2-5-attaques sulfatique externe :	46

III-3-ACTION DES ACIDES :	47
III -3--On distingue deux types de détérioration:	48
III-4-ATTAQUE PAR LES IONS CHLORURES :	50
III -4-1-Mécanisme de pénétration des Cl-:	50
III -4-2-Pénétration des chlorures est favorisée par un béton :	50
III -5-1-Carbonatation du béton	52
III -5-2-Le gonflement et eclatementsles	52
 Chpître IV : IMPACT SUR LES PROPRIETES DE TRANSFERT DANS LA STRUCTURE POREUSE DU BETON	
IV-1-LA STRUCTURE POREUSE DU BETON:	55
IV-1-1-Définitions et caractérisation de la structure poreuse des bétons:	55
IV-1-2-Les méthodes de caractérisation de la structure poreuse desbétons:	57
IV-1-3-La structure poreuse du béton:	60
IV-2-TRANSPORT PAR DIFUSION :	63
IV-2-1-Ladiffusion dans les bétons:	63
IV-2-2-La diffusion ionique:.....	65
IV-2-3--Mesure des coefficients de diffusion:	66
IV-2-4-Diffusion dans les BHP:.....	66
 IV-3-Transport par écoulement hydraulique :la perméabilité , Hypothèse et loi 'écoulement du fluide :	
	68

IV-3-1-Definition de permeabilite:	68
IV-3-2- Définition de permeabilite pour un matériau isotrope:	68
IV-3-3-Couplage séchage – propriétés de transferts :	69
IV-3-4-les hypothese de loi d'ecoulement du fluide:	70
IV-3-5-Loi d'ecoulement : Loi de Darcy:	70

Chpitre V: Présentation des travaux expérimentaux de recherche dans le domaine de durabilité (impact des milieux agressifs sur les bétons)

V-1-Étude du comportement mécanique et de durabilité des bétons fibrés dans un milieu agressif):	72
---	-----------

V-2- (COMPORTEMENT DES BÉTONS DANS LES MILIEUX AGRESSIFS (CAS DE BISKRA.):	73
---	-----------

V-3- (Durabilité d'un béton exposé à un milieu Agressive (acide sulfurique) influence du rapport G/S):	73
---	-----------

V-4- (Influence du rapport E/C sur la durabilité des ciments et mortier à base de laitier exposés aux milieux agressifs):	75
--	-----------

V-5 (durabilité d'un béton exposé à un milieu aggressive(acide sulfurique), influence de la forme des granulats (concassé-roulées)):	76
---	-----------

V-6-(Durabilité Des Constructions De Génie Civil En Bétons Et L'impact D'un Environnement Agressif (pH>13):	78
---	-----------

V-7-Durabilité des produits en béton soumis à un environnement agressif	
vis-à-vis des armatures :.....	79
CONCLUSION.....	87
Références et bibliographies.....	88

Liste des tableaux:

Chpitre II:

Tableau II.1-1classes d'exposition des bétons selon la norme NF EN 206 / CN 36

Tableau II-2Valeurs limites pour les attaques chimiques des eaux de surfaces et souterraines.38

Tableau II-3Valeurs limites pour les attaques chimiques des sols naturels 38

Tableau II-4 Seuils des indicateurs à 90 jours en fonction des classes d'exposition 40

Chpitre III:

Tableau III -1 Composants du béton menacés par la corrosion 47

Liste des figures:

Chpitre I:

Figure I-1-: Une représentation des concepts du développement durable : gérer, restaurer et protéger des ressources plus ou moins renouvelables 15

Figur I-2-:Schéma du dispositif normatif du béton 23

Figure I-3-:shema du normes de dimensionnement 24

Chpitre III:

Figure III 1 la Sources de sulfates multiples 44

Figure III .2 la Sources de sulfates multiples 44

Figure III.3 Réactions et attaques sulfatique interne 45

Photo III .1 Cristallisation en aiguilles (microstructure) 45

Photo III .2 Identiques à la RAG à l'œil nu 45

Photo III.3 Expansion provoqué par la croissance d'aiguille d'ettringite (à l'œil nu) 46

Photo III.4 Expansion provoqué par la croissance d'aiguille d'ettringite (microstructure) 46

Figure III.5 du Pénétration des ions chlorures 52

Figure III.6 peut résumer l'attaque par les acides 53

Chapitre IV

Figure IV.1 :descriptions chématique d'un matériau poreu 55

Figure IV.2: structure poreuse d'une pâte de ciment Portland (E/C = 0,40, 28 jours) Comparaison entre les données de porosimétrie au mercure et d'analyse d'images, d'après	60
Figure IV.3: influence d'un adjuvant haut réducteur d'eau et de l'addition de fumée de silice sur la porosité à l'état frais, d'après	61
Figure IV.4: principe de la mesure du coefficient de diffusion effectif : essai de diffusion simple	66
Figure IV.5: variation du coefficient de diffusion effectif des bétons en fonction de leur résistance en compression à 28 jours, d'après	67
Figure IV.6: définition de la perméabilité	68
Figure IV.7: perméabilité intrinsèque en fonction du taux de saturation moyen pour un béton courant	69
Figure IV.8 : perméabilité intrinsèque en fonction du taux de saturation moyen pour un béton hautes performances	69

INTRODUCTION

GENERAL

INTRODUCTION

Le concept de durabilité est à l'origine issu des forêts, mais aujourd'hui il se décline en différentes dimensions: sociale, environnementale et économique. La dimension sociale concerne la société et les hommes et les femmes qui y vivent. La dimension écologique fait référence à l'environnement, dont nous avons tous besoin pour survivre. La dimension économique fait référence à un système économique de longue durée qui prend en compte des contraintes telles que la rareté des ressources

Repenser la croissance économique à l'échelle mondiale pour prendre en compte les aspects environnementaux et sociaux du développement.

Il s'agit aussi, à partir des nouvelles valeurs universelles (responsabilité, participation, participation, principe de précaution, débat, etc.), de privilégier une double approche :

- Dans le temps : nous avons le droit d'utiliser les ressources de la terre, mais il est de notre devoir d'assurer sa pérennité pour les générations futures ;
- Dans l'espace : chacun a le même droit aux ressources de la terre (principe de la destination universelle des biens).

Tous les secteurs d'activité sont concernés par le développement durable : agriculture, industrie, logement, planning familial, mais aussi services (finance, tourisme, etc.) qui, contrairement aux idées reçues, ne sont pas seulement sans importance.

Mais il y a d'autres dimensions qui sont également affectées par le concept de durabilité. C'est ainsi que les domaines de la durabilité politique et de la durabilité numérique ont émergé

Chapitre 01

I-1-NOTION SUR LA DURABILITE:

Les termes durabilité ou soutenabilité sont utilisés depuis les années 1990 pour désigner une configuration de la société humaine qui lui permet d'assurer sa pérennité. Une telle organisation humaine repose sur le maintien d'un environnement viable, permettant le développement économique et social à l'échelle planétaire et, selon les points de vue, sur une organisation sociale équitable. La période de transition vers la durabilité peut se faire par le développement durable, via la transition énergétique et la transition écologique notamment. [1]

En 1987, le rapport Brundtland définissait le développement durable comme l'objectif de développement compatible avec les besoins des générations futures. Il repose sur trois piliers : économique, environnemental et d'équité sociale.

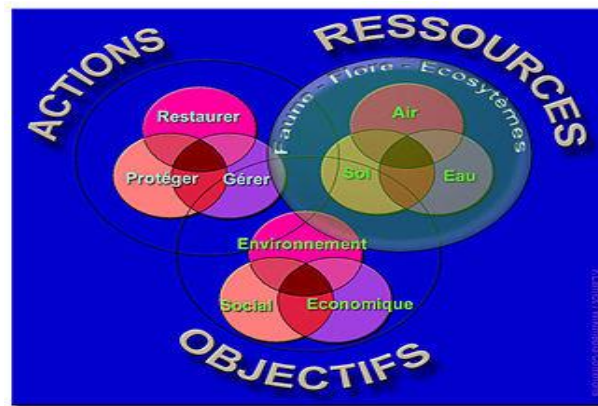


Figure1.1 : Une représentation des concepts du développement durable : gérer, restaurer et protéger des ressources plus ou moins renouvelables.

La durabilité est la qualité d'un bien qui dure. En droit, c'est la période d'utilisation d'un bien. Dans le domaine de la sûreté de fonctionnement, c'est l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint², ce qu'on appelle couramment la solidité d'un objet ou d'un équipement, par opposition à l'obsolescence [1]

I-2-DEVELOPPEMEN DURABLEDEFINSIONET EXPLICATION:

I-2-1-Des approches opposées sur la notion de durabilité:

Si les objectifs du développement durable font l'objet d'un relatif consensus, c'est son application qui demeure source d'oppositions. L'une des questions posées par le terme de « développement durable » est de savoir ce que l'on entend par « durable ». Or, la nature peut être vue de deux manières, complémentaires : il existe d'une part un "capital naturel", non-renouvelable à l'échelle humaine (la biodiversité par exemple), et d'autre part des ressources renouvelables (comme le bois, l'eau...). Cette distinction étant faite, deux conceptions sur la durabilité vont s'opposer. [2]

La première réponse à la question du développement durable est de type technico-économiste : à chaque problème environnemental correspondrait une solution technique, solution disponible uniquement dans un monde économiquement prospère. Dans cette approche, aussi appelée « durabilité faible », le pilier économique occupe une place centrale et reste prépondérant, à tel point que le développement durable est parfois rebaptisé « croissance durable ». C'est ainsi que dans la revue de l'École polytechnique, Jacques Bourdillon exhorte les jeunes ingénieurs à : « ne pas renoncer à la croissance [...] dont l'humanité a le plus grand besoin, même sous prétexte de soutenabilité ». L'une des réponses apportées du point de vue technologique consiste à rechercher la meilleure technique disponible (MTD, en anglais best available technology, BAT) pour un besoin identifié, ou des attentes exprimées par un marché, qui concile les trois piliers du développement durable d'une façon transversale.

Ce discours est légitimé par la théorie économique néoclassique. En effet, Robert Solow et John Hartwick supposent le caractère substituable total du capital naturel en capital artificiel : si l'utilisation de ressources non-renouvelables conduit à la création d'un capital artificiel transmissible de génération en génération, elle peut être considérée comme légitime. [2]

Certains acteurs, et notamment de nombreuses organisations non gouvernementales ou associations environnementales, ont un point de vue tout à fait opposé à l'approche technico-économiste : pour eux, « la sphère des activités économiques est incluse dans la sphère des activités humaines, elle-même incluse dans la biosphère » : le "capital naturel" n'est dès lors pas substituable. Afin d'insister sur les contraintes de la biosphère, les

tenants de cette approche préfèrent utiliser le terme de « développement soutenable » (traduction littérale de sustainable development). [2]

Les économistes systémiques légitiment cette approche : plutôt que de se concentrer sur l'aspect purement économique des choses, ceux-ci souhaitent avoir une vision « systémique [qui] englobe la totalité des éléments du système étudié, ainsi que leurs interactions et leurs interdépendances ». On peut citer Joël de Rosnay, E.F. Schumacher ou encore Nicholas Georgescu-Roegen.

Ces deux approches opposées ne sont bien entendu pas les seules : de nombreuses autres approches intermédiaires tentent de concilier vision technico-économiste et environnementaliste, à commencer par les acteurs publics. On pourra voir à ce sujet la typologie dressée par Aurélien Boutaud. [2]

I-2-2-Enjeux et objectifs du développement durable:

Crise écologique et sociale

La Révolution industrielle du XIXe siècle a introduit des critères de croissance essentiellement économiques, principal critère aisément mesurable : ainsi le produit intérieur brut dont l'origine remonte aux années 1930 est souvent vu comme l'indicateur de la richesse d'un pays. Des corrections ont été apportées dans la deuxième moitié du XIXe siècle sur le plan social, avec d'importantes avancées sociales. L'expression « économique et social » fait depuis partie du vocabulaire courant.

Mais les pays développés ont pris conscience depuis les chocs pétroliers de 1973 et 1979 que leur prospérité matérielle était basée sur l'utilisation intensive de ressources naturelles finies, et que par conséquent, outre l'économique et le social, un troisième aspect avait été négligé : l'environnement. Pour certains analystes, le modèle de développement industriel n'est pas viable ou soutenable sur le plan environnemental, car il ne permet pas un "développement" qui puisse durer. Les points cruciaux en faveur de cette affirmation sont l'épuisement des ressources naturelles (matières premières, énergies fossiles pour les humains), la destruction et la fragmentation des écosystèmes, ainsi que la diminution de la biodiversité qui diminuent la résilience de la planète ou encore le changement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre et de manière générale la pollution due aux activités humaines. Les catastrophes industrielles de ces trente dernières années (Seveso (1976), Bhopal (1984), Tchernobyl (1986), Exxon Valdez (1989), etc.) ont interpellé

l'opinion publique et les associations telles que le WWF, les Amis de la Terre ou encore Greenpeace (Voir aussi Chronologie de l'écologisme).

Au problème de viabilité subsiste une pensée humaine à adapter. Ce qui s'ajoute à un problème d'équité : les pauvres subissent le plus la crise écologique et climatique, et il est à craindre que le souhait de croissance des pays sous-développés (souvent appelés pays du Sud) vers un état de prospérité similaire, édifié sur des principes équivalents, n'implique une dégradation encore plus importante et accélérée de l'habitat humain et peut-être de la biosphère. Ainsi, si tous les États de la planète adoptaient l'American Way Of Life (qui consomme près de 25% des ressources de la Terre pour 5% de la population) il faudrait 5 ou 6 planètes pour subvenir aux besoins de tous selon l'association écologiste WWF. [2]

Le développement actuel étant consommateur de ressources non renouvelables et considéré par ces critiques comme inéquitable, une réflexion a été menée autour d'un nouveau mode de développement, appelé « développement durable ».

I-2-3-Un modèle économique en question:

Ce qui est en question, c'est le rôle du progrès technique dans le développement économique par rapport aux problèmes environnementaux (mais aussi sociaux), comme le soulignait le philosophe Hans Jonas dès 1979 dans *Le Principe Responsabilité*. Depuis les chocs pétroliers de 1973 et 1979, ainsi que dans la succession des crises économiques et le tassement de la croissance économique observés depuis les années 1970, le modèle du capitalisme productiviste dans lequel les pays occidentaux se sont lancés au cours du XXe siècle semble être en crise. L'économiste Bernard Perret s'interroge sur la question de savoir si le capitalisme est durable.

Les modèles qui décrivaient l'accroissement de la productivité des facteurs de production atteignent leurs limites. Alors que les physiocrates considéraient la terre comme le principal facteur créateur de valeur, l'école classique et l'école néoclassique n'ont retenu que les deux facteurs de production capital et travail, négligeant le facteur terre (l'environnement). Certes, dans certains courants néoclassiques, comme le modèle de Solow, la productivité globale des facteurs correspond à une augmentation de la productivité qui n'est pas due aux facteurs de production capital et travail, mais au progrès technique. Encore faut-il que celui-ci respecte les contraintes environnementales.

Il semble donc que les problèmes environnementaux que nous rencontrons soient dus au fait que le facteur de production terre n'a pas été suffisamment pris en compte dans les

approches économiques récentes, notamment classique et néoclassique. Un modèle de développement qui permet de concilier progrès technique, productivité, et respect de l'environnement est donc à repenser. [2]

I-2-4-Une nouvelle démarche : « agir local, penser global »:

La Terre vue de la Lune : une des premières visions de la Terre comme un ensemble fini et fragile.

Les aspects essentiels du développement durable, sur les capacités de la planète et les inégalités d'accès aux ressources posent des questions philosophiques et éthiques.

Hans Jonas avança l'idée selon laquelle le modèle économique de l'Occident pourrait ne pas être viable sur le long terme s'il ne devenait pas plus respectueux de l'environnement. En effet Jonas posa l'idée d'un devoir vis-à-vis des êtres à venir, des vies potentielles et « vulnérables » que nous menaçons et il donne à l'homme une responsabilité. Depuis, l'un des thèmes de la philosophie qui interpelle le plus nos contemporains est celui de la philosophie de la nature, qui interroge sur la place de l'homme dans la nature. Ainsi, en 1987, Michel Serres décrit l'homme comme signataire d'un contrat avec la nature, reconnaissant les devoirs de l'humanité envers celle-ci. À l'inverse, le philosophe Luc Ferry souligne, dans *Le Nouvel Ordre écologique*, que l'homme ne peut pas passer de contrat avec la nature et estime que cette vision qui consiste à donner des droits à la nature participe d'une opposition radicale à l'Occident, de nature révolutionnaire et non-réformiste, doublée d'un anti-humanisme prononcé.

Jean Bastaire voit l'origine de la crise écologique chez Descartes selon qui l'homme devait se « rendre comme maître et possesseur de la nature ». Au contraire, la géographe Sylvie Brunel critique le développement durable, car elle y voit une conception de l'homme comme un parasite, et la nature comme un idéal. Or, pour elle, l'homme est souvent celui qui protège la biodiversité, là où la nature est le règne de la loi du plus fort, dans lequel « tout milieu naturel livré à lui-même est colonisé par des espèces invasives ». [2]

Sans en aborder tous les aspects philosophiques, le développement durable comporte également des enjeux très importants en matière d'éthique des affaires. André Comte-Sponville entre autres, aborde les questions d'éthique dans *Le capitalisme est-il moral ?*. Paul Ricœur et Emmanuel Lévinas le firent aussi sous l'angle de l'altérité et Patrick Viveret et Jean-Baptiste de Foucauld sur celui de la justice sociale.

Le philosophe français Michel Foucault aborde ces questions sur le plan épistémologique. Il parle de changements de conception du monde, qui se produisent à différentes époques de l'Histoire. Il appelle ces conceptions du monde, avec les représentations qui les accompagnent, des épistémès. On pourrait sans doute affirmer que le développement durable, et son corollaire la mondialisation, correspondent au concept d'épistémè, qui, appliqué à notre époque, est appelé hypermodernité par Michel Foucault. [2]

La formule « agir local, penser global », employée par René Dubos au sommet sur l'environnement de 1972, est souvent invoquée dans les problématiques de développement durable. Elle montre que la prise en compte des enjeux environnementaux et sociaux nécessite de nouvelles heuristiques, qui intègrent le caractère global du développement durable. Elle fait penser à la philosophie de Pascal, plutôt qu'à celle de Descartes, celle-ci étant davantage analytique. En pratique, elle devrait se traduire par des approches systémiques.

Depuis quelques décennies, les ONG environnementales et des leaders d'opinion comme Nicolas Hulot ont sensibilisé l'opinion publique sur les enjeux de l'environnement et du développement durable. [2]

I-2-5-Les trois piliers:

L'objectif du développement durable est de définir des schémas viables qui concilient les trois aspects économique, social, et écologique des activités humaines : « trois piliers » à prendre en compte par les collectivités comme par les entreprises et les individus. La finalité du développement durable est de trouver un équilibre cohérent et viable à long terme entre ces trois enjeux. À ces trois piliers s'ajoute un enjeu transversal, indispensable à la définition et à la mise en œuvre de politiques et d'actions relatives au développement durable : la gouvernance. La gouvernance consiste en la participation de tous les acteurs (citoyens, entreprises, associations, élus...) au processus de décision ; elle est de ce fait une forme de démocratie participative. Le développement durable n'est pas un état statique d'harmonie, mais un processus de transformation dans lequel l'exploitation des ressources naturelles, le choix des investissements, l'orientation des changements techniques et institutionnels sont rendus cohérents avec l'avenir comme avec les besoins du présent.

On peut considérer que les objectifs du développement durable se partagent entre trois grandes catégories :

Ceux qui sont à traiter à l'échelle de la planète : rapports entre nations, individus, générations ;

Ceux qui relèvent des autorités publiques dans chaque grande zone économique (Union européenne, Amérique du Nord, Amérique latine, Asie...), à travers les réseaux territoriaux par exemple ;

Ceux qui relèvent de la responsabilité des entreprises.

I-2-6-Répondre aux besoins des générations actuelles et à venir:

« Le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ».

Rapport Brundtland

La définition classique du développement durable provient du rapport Brundtland de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement. Ce rapport rappelle le propos prêté à Antoine de Saint-Exupéry : « Nous n'héritons pas de la Terre de nos ancêtres, nous l'empruntons à nos enfants ». Ce rapport insiste sur la nécessité de protéger la diversité des gènes, des espèces et de l'ensemble des écosystèmes naturels terrestres et aquatiques, et ce, notamment, par des mesures de protection de la qualité de l'environnement, par la restauration, l'aménagement et le maintien des habitats essentiels aux espèces, ainsi que par une gestion durable de l'utilisation des populations animales et végétales exploitées. [2]

Cette préservation de l'environnement doit être accompagnée de la « satisfaction des besoins essentiels en ce qui concerne l'emploi, l'alimentation, l'énergie, l'eau, la salubrité ». Cela étant, on se heurte à une difficulté, qui est de définir ce que sont les besoins des générations présentes, et ce que seront les besoins des générations futures. On pourrait retenir par exemple les besoins élémentaires pour se nourrir, se loger, et se déplacer.

Dans ce contexte, le développement durable a été inséré parmi les Objectifs du millénaire pour le développement fixés par l'ensemble des États membres de l'ONU. Afin de subvenir aux besoins actuels sans pour autant se reposer sur l'utilisation non durable de ressources non renouvelables, un scénario en trois points a été proposé :

efficacité (techniques plus performantes),

sobriété (techniques utilisées avec parcimonie),

utilisation de ressources renouvelables (par exemple : l'énergie solaire, les éoliennes, etc.).

Le patrimoine culturel ne doit pas être oublié : transmis de génération en génération et faisant preuve d'une grande diversité, l'UNESCO en souhaite la préservation.[2]

I-3-LA DURABILITE DANS LE CONTEXTE NORMATIF:

I-3-1-Le corpus normatif du béton : un ensemble de textes homogènes et cohérents:

Les ouvrages en béton disposent d'un ensemble de textes normatifs, constitué de normes européennes et de recommandations techniques françaises qui sont le fruit des retours d'expérience de multiples chantiers et de travaux d'études et de recherches menées durant ces dernières décennies.

Le nouveau contexte normatif et réglementaire qui encadre l'utilisation du matériau béton comprend :

- des normes de dimensionnement : les Eurocodes ;
- des normes sur les constituants du béton ;
- des normes d'essais sur béton frais et béton durci ;
- des fascicules de recommandations,
- des normes sur le béton ;
- des normes pour les produits préfabriqués en béton ;
- des normes et documents d'exécution.

Ces normes et recommandations constituent un ensemble cohérent, homogène et complet, qui s'inscrit dans une logique de progrès visant à optimiser :

- la qualité des bétons;

et la durabilité des ouvrages. [3]

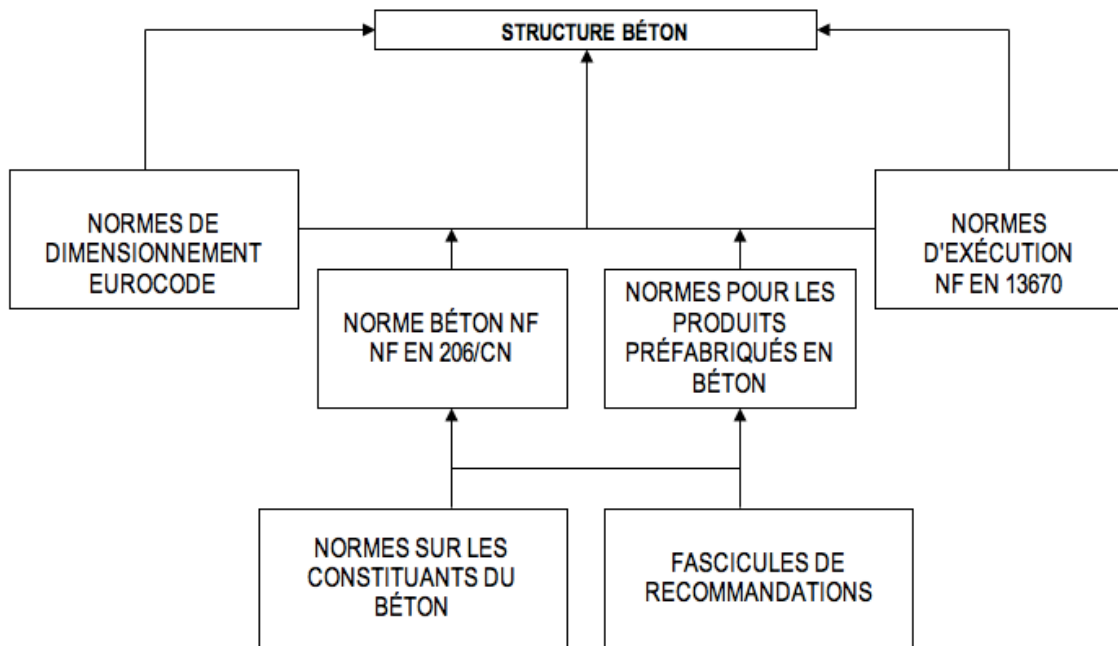


Fig I.2 Schéma du dispositif normatif du béton

I-3-2-Les normes de dimensionnement : les Eurocodes:

Les normes Eurocodes ont pour objet d’harmoniser les règles de conception et de calcul au sein des différents états de la Communauté européenne et de contribuer ainsi à la création du marché unique de la construction.

Elles forment un ensemble homogène de règles techniques harmonisées pour la conception et le calcul des structures de génie civil et des bâtiments. Elles s’appliquent à différents types de matériaux (béton, acier, bois...) et différents types de construction. Elles font appel à une approche semi-probabiliste de sécurité des constructions (méthode des coefficients partiels) avec des méthodes de dimensionnement fondées sur le concept des états limites (états limites de service et états limites ultimes) et permettent de dimensionner des ouvrages durables et robustes.

Elles fournissent une série de méthodes et de règles techniques communes à tous les pays européens pour calculer la stabilité, la résistance mécanique et la sécurité incendie des éléments ayant une fonction structurelle dans un ouvrage de construction.

Les Eurocodes constituent un ensemble de 58 normes regroupées en 10 documents :

- NF EN 1990 – Eurocode 0 : Bases de calcul des structures ;
- NF EN 1991 – Eurocode 1 : Actions sur les structures ;

- NF EN 1992 – Eurocode 2 : Calcul des structures en béton ;
- NF EN 1993 – Eurocode 3 : Calcul des structures en acier ;
- NF EN 1994 – Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton ;
- NF EN 1995 – Eurocode 5 : Calcul des structures en bois ;
- NF EN 1996 – Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie ;
- NF EN 1997 – Eurocode 7 : Calcul des structures en géotechnique ;
- NF EN 1998 – Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance au séisme ;
- NF EN 1999 – Eurocode 9 : Calcul des structures en alliages d'aluminium.

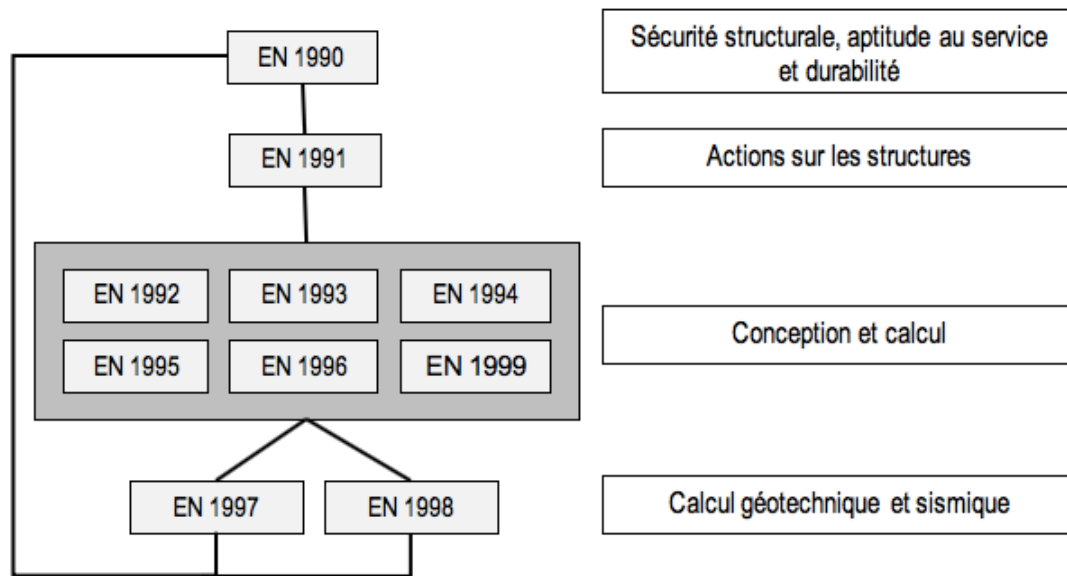


Fig I.3shema du normes de dimensionnement

a) Liens entre les Eurocodes

Chaque norme française Eurocode est constituée de la norme européenne, complétée par son Annexe Nationale française. Cette annexe précise en particulier les paramètres, les valeurs et les données climatiques à utiliser pour le calcul des structures en France (paramètres déterminés au niveau national – NDP, laissés au libre choix de chaque pays).

b) L'Eurocode 0 (norme NF EN 1990)

Elle décrit les principes et les exigences pour la sécurité, l'aptitude au service et la durabilité des structures.

c) L'Eurocode 1 (norme NF EN 1991)

Elle traite des actions pour le calcul des structures.

Elle se décompose en 10 normes qui définissent les actions pour la conception structurale des bâtiments et des ouvrages de génie civil, en particulier :

- les poids volumiques des matériaux de construction et des matériaux stockés,
 - le poids propre des éléments de construction,
 - les charges d’exploitation à prendre en compte pour les bâtiments,
 - les actions dues au trafic.
- NF EN 1991-1-1 : Actions générales – poids volumiques, poids propres, charges d’exploitation les bâtiments
 - NF EN 1991-1-2 : Actions générales – Actions sur les structures exposées au feu
 - NF EN 1991-1-3 : Actions générales – Charges de neige
 - NF EN 1991-1-4 : Actions générales – Charges du vent
 - NF EN 1991-1-5 : Actions générales – Actions thermiques
 - NF EN 1991-1-6 : Actions générales – Actions en cours d’exécution
 - NF EN 1991-1-7: Actions générales – Actions accidentelles
 - NF EN 1991-2 : Actions sur les ponts dues au trafic
 - NF EN 1991-3 : Actions induites par les grues et les ponts roulants
 - NF EN 1991-4 : Silos et réservoirs

Leur Annexe Nationale précise les actions à appliquer sur le territoire français telles que par exemple les charges de neige.

d) L’Eurocode 2 (norme NF EN 1992)

C’est la norme de base pour le calcul des structures en béton.

Elle comprend 4 normes :

- NF EN 1992-1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments ;
- NF EN 1992-1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu ;
- NF EN 1992-2 : Ponts – Calcul et dispositions constructives ;
- NF EN 1992-3 : Silos et réservoirs.

Elle permet le calcul des bâtiments et des ouvrages de génie civil en béton non armé, en béton armé ou en béton précontraint. Elle s’applique aussi pour le dimensionnement des produits préfabriqués en béton.

Elle traite, en conformité avec l’Eurocode 0, des principes et des exigences pour la sécurité, l’aptitude au service, la durabilité et la résistance au feu des structures en béton. Les autres exigences, telles que celles relatives aux isolations thermiques et acoustiques, par exemple, n’y sont pas traitées.

e) Norme NF EN 1992-1-1

Elle définit les principes généraux du calcul des structures et les règles spécifiques pour les bâtiments. Elle est commune pour tous les types d'ouvrages en béton.

f)Norme NF EN 1992-1-2

Cette norme permet le dimensionnement des ouvrages pour assurer leur stabilité et leur sécurité en cas d'incendie.

g)Norme NF EN 1992-2

Elle définit les principes, les règles de conception et les dispositions spécifiques pour les ponts en béton armé et en béton précontraint.

h)Norme NF EN 1992-3

Elle présente les règles complémentaires pour le calcul des structures en béton, destinées à contenir des liquides ou à stocker des produits granulaires ou pulvérulents.

I-3-3-Les normes sur les constituants du béton:

Les divers constituants du béton (ciments, granulats, adjuvants...) font l'objet de normes qui précisent en particulier diverses spécifications et recommandations relatives à la durabilité du béton.

a)Les normes ciments:

La norme NF EN 197-1

« Ciment – partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants » définit cinq types de ciments courants selon leur composition :

- CEM I : ciment Portland ;
- CEM II : ciment Portland composé ;
- CEM III : ciment de haut fourneau ;
- CEM IV : ciment pouzzolanique ;
- CEM V : ciment composé.

Elle est subdivisée en trois rubriques :

- la première partie est descriptive, elle définit les constituants du ciment (clinker portland, laitier granulé de haut fourneau, pouzzolanes, cendres volantes silicieuses ou calciques, schistes calcinés, calcaires, fumée de silice, sulfate de calcium) et délimite les différents types de ciments courants ;
- la deuxième partie définit les classes de résistance et les spécifications mécaniques et physico-chimiques ;

- la troisième partie est consacrée aux critères de conformité, aux fréquences d'essais et aux valeurs limites.

Nota : Marquage CE et marque NF

Les ciments courants doivent être marqués CE depuis le 1er avril 2002. Ce marquage obligatoire atteste leur conformité à la norme harmonisée EN 197-1 et le respect des exigences du Règlement sur les Produits de Construction en matière de santé, sécurité et respect de l'environnement.

La marque de qualité NF, volontaire et complémentaire du marquage CE (certification de niveau +1), atteste que le ciment est conforme au niveau de qualité requis par le marché français en fonction des conditions climatiques et environnementales ainsi que des techniques de mise en œuvre pratiquées en France. Les ciments faisant l'objet de la marque NF, bénéficient de garanties complémentaires sur leur composition, leurs performances et leurs contrôles.

b) Les autres normes sur les ciments:

Pour certaines classes d'exposition ou certains ouvrages particuliers, des exigences complémentaires relatives aux caractéristiques des ciments peuvent être requises.

Les ciments possédant ces caractéristiques font l'objet de normes spécifiques :

- Ciments pour travaux à la mer (PM) : norme NF P 15-317 ;
- Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (ES) : norme NF P 15-319 ;
- Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint (CP) : norme NF P 15-318 ;
- Ciments de haut fourneau à faible résistance à court terme : norme NF EN 197-4 ;
- Ciments sursulfatés (CSS) : norme NF P 15-313.

c) Les normes granulats:

La norme NF EN 12620 (Granulats pour béton)

Elle spécifie les caractéristiques des granulats et des fillers élaborés à partir des matériaux naturels, artificiels ou recyclés, qui sont utilisés dans la fabrication du béton. Elle prescrit des catégories de valeurs maximales pour chaque caractéristique physique ou mécanique.

Elle concerne en particulier les bétons conformes à la norme NF EN 206/CN, les granulats entrant dans la composition des produits préfabriqués en béton et les bétons routiers. Elle précise les caractéristiques physiques et chimiques relatives à l'évaluation de la conformité des granulats, et au système de maîtrise de la production.

d) La norme NF P 18-545 (Granulats, éléments de définition, conformité et codification):

Elle définit les règles générales permettant d'effectuer les contrôles des granulats. Elle regroupe en codes (A.B.C.D.), les catégories définies dans la norme NF EN 12620 pour les divers usages possibles (granulats pour chaussées, pour béton de ciment, pour mortiers, etc.). Elle définit des critères de régularité et de conformité et les Fiches techniques produit.

e)Les normes adjuvants pour béton:

La norme de référence pour les adjuvants est la norme NF EN 934-2. Elle fixe en particulier les exigences sur les adjuvants et spécifie les caractéristiques et les critères de conformité.

f)La norme eau:

L'eau utilisable pour la fabrication du béton fait l'objet de la norme NF EN 1008. Cette norme définit les prescriptions pour l'eau convenant à la production du béton et décrit les méthodes permettant d'apprécier son aptitude à l'emploi.

Les normes additions [3]

Des additions normalisées peuvent être utilisées pour la formulation des bétons.

Il existe 6 types d'additions normalisées :

- Fillers d'origine siliceuse : norme NF P 18-509 ;
- Fillers d'origine calcaire : norme NF P 18-508 ;
- Fumée de silice : norme NF EN 13263 ;
- Cendres volantes : norme NF EN 450 ;
- Laitiers vitrifiés moulus de haut fourneau : norme NF P 18-506 ;
- Métakaolin : norme NF P 18-513.

Les normes d'essais sur béton

Les principaux essais pour déterminer les propriétés, les caractéristiques et les performances du béton font l'objet des séries de la norme NF EN 12350 pour le béton frais et NF EN 12390 pour le béton durci. [3]

I-3-4-Les recommandations et les fascicules de documentation:

En France, des documents spécifiques (recommandations et fascicules de documentation) synthétisent des principes de prévention pour des problématiques de durabilité en complétant les normes européennes.

Quatre principaux documents :

- les recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction ;
- les recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel ;
- les recommandations pour la prévention des désordres dus aux réactions sulfatiques internes ;
- le fascicule de documentation FD P 18-011 : Béton, classification des environnements agressifs.

Nota : Le fascicule FD P 18-011 définit des environnements agressifs pour les bétons armés et les bétons précontraints, et les classes d'agressivités correspondantes. Il recommande des mesures préventives pour la formulation des bétons résistants à ces environnements agressifs. [3]

a)La norme béton:

La norme NF EN 206/CN (Béton, partie 1 : spécifications, performances, production et conformité) concerne les bétons prêts à l'emploi, les bétons fabriqués sur chantier et les produits préfabriqués en béton, destinés aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil.

Elle définit les spécifications sur les bétons à l'état frais et à l'état durci, la production, la livraison et le contrôle de conformité des bétons, et prend en compte la durabilité en s'appuyant sur la notion de classes d'exposition.

Elle couvre :

les bétons dont l'air occlus (autre que l'air entraîné) est négligeable,

les bétons de masse volumique normale (comprise entre 2 000 et 2 600 kg/m³),

les bétons lourds (masse volumique supérieure à 2 600 kg/m³),

les bétons légers (masse volumique comprise entre 800 et 2 000 kg/m³).

Elle ne concerne pas les bétons non structuraux et les bétons particuliers tels que les bétons de tranchée, de remplissage, de calage, de propreté...

Elle définit des classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement auxquelles les bétons de l'ouvrage ou de la partie de l'ouvrage vont être soumis pendant leur durée d'utilisation.

Elle spécifie les exigences applicables :

aux constituants du béton ;

aux propriétés du béton frais et durci et à leur vérification ;

aux limitations imposées à la composition du béton ;

à la spécification du béton ;

à la livraison du béton frais ;

aux procédures de contrôle de production ;

aux critères de conformité et à l'évaluation de la conformité.

Elle définit des valeurs limites spécifiées, relatives à la composition et aux propriétés du béton, en fonction de chaque classe d'exposition, dans 2 principaux tableaux (NA.F.1 et NA.F.2).

Elle précise pour les bétons de structures en plus des spécifications relatives au béton, les responsabilités du prescripteur (responsable de la spécification du béton) et du producteur (responsable de la conformité et du contrôle de la production).

Son Complément National précise les dispositions complémentaires à respecter en France, en tenant compte des spécificités climatiques et géographiques françaises.

I-3-5-Les normes pour les produits préfabriqués en béton :

a)Les normes de produits:

Les normes de référence pour les produits préfabriqués en usine sont les normes de produits. Elles définissent les caractéristiques des produits et leurs constituants.

La plupart des normes de produit disposent d'une partie harmonisée qui ouvre au marquage CE. De nombreuses normes sont dites « autoportantes » car elles contiennent en elles-mêmes toutes les spécifications nécessaires. C'est le cas pour les blocs par exemple.

b)La norme NF EN 13369:

Intitulée « Règles communes pour les produits préfabriqués en béton », c'est la norme de base pour toutes les normes de produits structuraux.

Elle spécifie la terminologie, les prescriptions, les critères relatifs aux performances de base, les méthodes de vérification et d'évaluation de la conformité pour la fabrication de produits préfabriqués en béton en usine.

Elle précise les exigences relatives aux constituants et au béton, ainsi que les conditions générales d'application des Eurocodes pour le dimensionnement des produits préfabriqués en béton. Les Règles Communes servent également de texte de référence pour les produits non couverts par des normes ou des Agréments Techniques Européens (ATE).

c)Les documents et normes relatifs à l'exécution des ouvrages :

Quelques soient les précautions prises pour adapter et optimiser la formulation du béton, il ne pourra assurer sa fonction durablement que si les « règles de l'art » ont été respectées lors de sa mise en œuvre (vibration correcte, cure adaptée, prise en compte des conditions climatiques lors du bétonnage, retrait maîtrisé, respect des valeurs d'enrobage des armatures, etc.). Pour obtenir la durabilité spécifiée, il convient de respecter les recommandations ou les normes d'exécution des ouvrages.

s)La norme NF EN 13670:

La norme NF EN 13670 "Exécution des ouvrages en béton" constitue le texte de référence pour ce qui est de l'exécution des structures en béton.

Chpitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Elle couvre l'exécution des bétons coulés en place et la mise en place des produits préfabriqués en béton pour la réalisation de béton.

Elle s'applique :

-aux travaux en béton sur site,

aux constructions utilisant des éléments préfabriqués en béton, pour les ouvrages provisoires ou définitifs

-Elle concerne l'exécution des structures en béton (bâtiments et structures de génie civil), afin d'assurer le niveau de sécurité et d'aptitude au service au cours de la durée d'utilisation de l'ouvrage en conformité avec la norme NF EN 1990 (Eurocode).

-Cette norme a trois fonctions principales :

-Transmettre au constructeur les exigences définies au cours de la conception (donc établir un lien entre le projet et l'exécution) ;

-Donner un ensemble d'exigences techniques normalisées pour l'exécution d'une structure en béton ;

-Fournir à l'auteur du projet une liste de vérifications pour s'assurer qu'il transmet au constructeur toute l'information technique nécessaire pour l'exécution de l'ouvrage.

-Pour satisfaire ces trois fonctions, il est fait référence aux « spécifications d'exécution » qui regroupent tous les documents, dessins, plans, ...

-Le contenu de la norme se décline en 10 chapitres et 8 annexes.

d)La norme NF P 18-201 (DTU 21):

Il faut différencier la conformité du béton en tant que matériau qui relève de la norme NF EN 206/CN, et sa conformité dans l'ouvrage qui relève de la norme NF P 18-201.

La norme NF P 18-201 est à considérer comme un document d'application de la norme NF EN 13670 pour ce qui est des ouvrages de bâtiment en béton (armé ou précontraint).

Elle définit les catégories d'ouvrages en fonction de leur importance et les contrôles associés.

Elle précise en outre les éléments relatifs au dossier d'étude « béton », ainsi que toutes les dispositions concernant la fabrication, le transport, la mise en place, les reprises de bétonnage, les effets des conditions ambiantes et le décoffrage.

e) Fascicule 65:

C'est le document d'application de la norme NF EN 13670 pour les ouvrages de génie civil en béton armé et précontraint.

Il fixe les obligations de l'entrepreneur concernant :

les règles techniques à observer pour l'exécution des ouvrages ;

les règles de l'organisation à mettre en place en vue d'assurer l'obtention de la qualité requise.
[3]

Chapitre

02

Chpitre II : La durabilité des bétons selon la norme NF EN 206-1

II -1-LES CLASSES D EXPOSITION:

II -1-1-Le choix de la classe d'exposition est de la responsabilité du maitre d'ouvrage:

À chacune des classes correspondent des spécifications sur la composition des bétons, sous forme de valeurs limites à respecter.

Chaque classe fait l'objet d'une description des conditions environnementales et est illustrée d'exemples informatifs.

CLASSE XO : aucun risque de corrosion ou d'attaque

CLASSES XC1 à XC4 : corrosion induite par carbonatation

CLASSES XD1 à XD3 : corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine

CLASSES XS1 à XS3 : corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer

CLASSES XF1 à XF4 : attaque gel / dégel avec ou sans agent de déverglaçage

CLASSES XA1 à XA3 : attaques chimiques

Nota : En France, la désignation des classes d'exposition doit être suivie du sigle (F) car leur définition a été adaptée au contexte climatique et géographique français.

La prise en compte de toutes les classes d'exposition permet de définir avec précision l'environnement de chaque partie d'ouvrage et d'optimiser les performances des bétons et leur durabilité.

NOTA : Les actions dues à l'environnement correspondent à des actions physiques et chimiques auxquelles le béton est exposé, qui entraînent des effets sur le béton et les armatures et qui ne sont pas considérées comme des charges pour la conception de la structure. [4]

L'Eurocode 2 définit pour les ouvrages structurels des dispositions constructives et des spécifications pour le dimensionnement (valeur minimale d'enrobage, valeur limite d'ouverture des fissures) en fonction de chaque classe d'exposition.

Le Fascicule de Documentation FD P 18-011 fournit des recommandations complémentaires aux exigences de la norme NF EN 206/CN, pour les bétons soumis aux environnements chimiquement agressifs. [4]

Si plusieurs classes d'exposition sont spécifiées pour un même béton, il doit respecter toutes les exigences prévues pour chaque classe d'exposition.

Tableau II.1-1 classes d'exposition des bétons selon la norme NF EN 206 / CN

Classe d'exposition	Description de l'environnement	Béton concerné
XO	Aucun risque de corrosion ou d'attaque	Béton non armé ou béton armé en environnement très sec
XC	Corrosion induite par carbonatation	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées exposé à l'air et à l'humidité
XC1	Sec ou humide en permanence	
XC2	Humide, rarement sec	
XC3	Humidité modérée	
XC4	Alternance d'humidité et de séchage	
XD	Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées soumis au contact d'une eau ayant une origine autre
XD1	Humidité modérée	que marine contenant des chlorures, y compris des sels de déverglaçage
XD2	Humide, rarement sec	
XD3	Alternance d'humidité et de séchage	
XS	Corrosion induite par les chlorures	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées soumis au contact des

	présents dans l'eau de mer	chlorures présents dans l'eau
XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin mais pas en contact direct avec l'eau de mer	de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin
XS2	Immergé en permanence	
XS3	Zone de marnage, zone soumise à des projections ou des embruns	
XF	Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage	Béton soumis à une attaque significative due à des cycles gel/dégel alors qu'il est
XF1	Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage	mouillé
XF2	Saturation modérée en eau avec agent de déverglaçage	
XF3	Forte saturation en eau sans agent de déverglaçage	
XF4	Forte saturation en eau avec agent de déverglaçage	
XA	Attaques chimiques	Béton exposé aux attaques chimiques se produisant dans les sols naturels, les
XA1	Environnement à faible agressivité chimique	eaux de surface et / les eaux souterraines
XA2	Environnement d'agressivité chimique modérée	
XA3	Environnement à forte agressivité chimique	

NOTA : La classe « XO » concerne les bétons ne comportant aucun risque de corrosion, ni d'attaque. Cette classe ne peut concerner que les bétons non armés, ou faiblement armés avec un enrobage d'au moins 5 cm à condition qu'ils ne soient soumis ni au gel, ni à l'abrasion, ni à des attaques chimiques.

II -1-2-Valeurs limites pour le classement des attaques chimiques:

La norme NF EN 206/CN définit les valeurs limites des paramètres correspondants aux attaques chimiques. Ces seuils correspondent à des caractéristiques chimiques des eaux de surfaces et souterraines ou des sols.

Tableau II-2 Valeurs limites pour les attaques chimiques des eaux de surfaces et souterraines

Caractéristiques Chimique	Classe d'exposition		
	XA1	XA2	XA3
SO4 ²⁻ en mg/l	200 à 600	600 à 3000	3000 à 6000
Ph	5,5 à 6,5	4,5 à 5,5	4 à 4,5
CO2 en mg/l	15 à 40	40 à 100	de 100 jusqu'à saturation
NH4 ⁺ en mg/l	15 à 30	30 à 60	60 à 100
Mg 2 ⁺ en mg/l	300 à 1000	1000 à 3000	de 3000 jusqu'à saturation

Tableau II-3 Valeurs limites pour les attaques chimiques des sols naturels

Caractéristiques chimiques	Classe d'exposition		
	XA1	XA2	XA3
SO4 ²⁻ en mg/l	2 000 à 3 000	3 000 à 12 000	12 000 à 24 000
Acidité ml/kg	Supérieur à 200	n'est pas	dans la

	Baumann Gully	rencontré	pratique
--	---------------	-----------	----------

NOTA : le choix de la classe d'attaques chimiques se fait par rapport à la caractéristique chimique conduisant à l'agression la plus élevée.

Pour ce type d'environnement la norme NF EN 206/CN renvoie au fascicule de documentation FDP 18-011 « Bétons – classification des environnements chimiquement agressifs », notamment pour le choix de ciments. [4]

II -2-SÉLECTION DES INDICATEURS DE DURABILITÉ ET SPÉCIFICATIONS ASSOCIÉES:

Pour chaque partie d'ouvrage et pour chaque risque de dégradations identifié à l'étape précédente, le maître d'ouvrage définit les indicateurs de durabilité pertinents ainsi que les valeurs de seuil à respecter, par référence aux tableaux ci-après.

À l'issue de la présente étape, le maître d'ouvrage sera en mesure de rédiger les articles de CCTP relatifs aux exigences portant sur le béton (voir exemple de clauses de CCTP en annexe II).

L'approche performante elle proposée portant uniquement sur la durabilité, il faut évidemment compléter les spécifications résultant de cette démarche par les autres exigences du projet notamment en matière de performance mécanique, par exemple la résistance à la compression du béton f_{c28} .

II -3-VIS-A-VIS DU RISQUE DE CORROSION DES ARMATURES:

Les indicateurs de durabilité retenus sont :

la porosité accessible à l'eau (P_{eau}),

la perméabilité au gaz (K_{gaz}),

le coefficient de diffusion des chlorures (D_{app}),

auxquels s'ajoute, en complément, dans la perspective des épreuves d'étude, de convenance et de contrôle, la mesure de la résistivité électrique (ρ).

L'annexe I précise les modes opératoires correspondants.

D'une manière générale, le nombre d'indicateurs et la sévérité des seuils à respecter augmentent avec la sévérité de l'environnement.

Les seuils indiqués dans le tableau I s'appliquent à des valeurs moyennes mesurées sur un béton âgé de 90 jours, pour des ouvrages dont la durée d'utilisation de projet est de 100 ans. Pour des durées supérieures, se reporter au guide AFGC.

Tableau II-4 Seuils des indicateurs à 90 jours en fonction des classes d'exposition

d'utilisation de projet 100 ans	Seuils des indicateurs à 90 jours	Exemples informatifs illustrant le choix
Classes d'exposition		
<p>XC1 Sec ou humide en permanence</p> <p>XC2 Humide, rarement sec</p>	<p>Peau 90j □ 15</p>	<p>Fondations (immergées ou non) Parties enterrées des appuis</p>
<p>XC3 Humidité modérée</p> <p>XC4 Alternance d' humidité et de séchage</p>	<p>Peau 90j □ 13 et Kgaz 90j □ 150</p>	<p>Bétons protégés par une étanchéité</p> <p>Bétons exposés à l' air</p>
<p>XS1 Exposé à l' air véhiculant du sel marin</p> <p>XS2 Immergé en permanence dans l' eau de mer</p> <p>XD1 Exposé à des chlorures non marins transportés par voie aérienne</p> <p>XD2 Humide rarement sec, béton exposé à des eaux industrielles contenant des chlorures</p>	<p>Peau 90j □ 13 et Dapp 90j □ 7</p>	<p>Ouvrages à proximité d'une côte</p> <p>Partie d'ouvrage immergée en permanence dans l'eau de mer</p> <p>Zones d'un ouvrage faiblement exposées aux sels de déverglaçage (semelles ou radiers non profonds à proximité de ou sous voies fréquemment salées)</p>

<p>XS1 Exposé à l'air véhiculant du sel marin</p>	<p>Peau 90j □ 11 et Kgaz 90j □ 150 et Dapp 90j □ 3</p>	<p>Piles d' un ouvrage très exposées aux sels de déverglaçage</p>
<p>XS2 Immergé en permanence dans l'eau de mer</p>		<p>Ouvrage soumis aux embruns (à moins de 100 m de la côte dans le cas général) Zones de marnage</p>
<p>XD1 Exposé à des chlorures non marins transportés par voie aérienne</p>		
<p>XD2 Humide rarement sec, béton exposé à des eaux industrielles contenant des chlorures</p>		

Lenrobage des armatures est un paramètre fondamental de la durabilité du béton armé vis-à-vis du risque de corrosion. En application de l'Eurocode 2, le concepteur s'attachera donc à déterminer un enrobage cohérent avec les exigences de durée d'utilisation de projet, les caractéristiques du béton et les classes d'exposition des parties d'ouvrage [Structures en béton conçues avec l'Eurocode 2

– Note technique sur les dispositions relatives à l'enrobage pour l'application en France – LCPC, novembre 2005 – (Guide technique)].

Des valeurs d'enrobage inférieures à celles résultant de l'application directe de l'Eurocode peuvent être adoptées dans le cadre de l'application de la note 1 du tableau 2.2 NF de la NF EN 1992-1-1/NA clause.2.1 qui permet de moduler l'enrobage par application de la démarche performantielle, en substitution de la modulation liée à la classe de résistance. On pourra s'autoriser une minoration de la classe structurale allant jusqu'à 2 au sens du tableau 2.2 NF, ce qui correspond dans la plupart des cas à une minoration du c_{min} dur pouvant aller jusqu'à 1 cm.

[5]

Chapitre 03

Chpitre III : MECANISMES D'ALTERATION DES BETONS

III -1-ACTIONS DES SULFATES :

III -1-1- Les sources de sulfates Dans le milieu extérieur au béton, les principales:

a)sources de sulfates sont :

- **Les sols :**

Leur concentration est généralement faible (0,01 et 0,05 % du sol sec). Toutefois, dans certaines régions où le sous-sol peut contenir du gypse ou de l'anhydrite, les valeurs peuvent être bien plus élevées (> 5%). Les sols gypseux en Algérie, sont très répandus ; on en compte 8000 km² ce qui représente 12% des sols gypseux du monde selon le classement (FAO, 1990). Aussi, le taux de sulfate dans les sols des régions sahariennes est compris entre 0.9 et 5.4 % [6]

- **Les eaux souterraines :**

Les eaux d'infiltration venant en contact avec les sols sulfatiques se chargent en ions SO₄²⁻. La concentration en ions de l'eau va dépendre de la solubilité du sulfate qui dépend de la température et de la présence d'autres sels. Les concentrations de sulfate SO₄²⁻ dans les régions sud Est de l'Algérie varient entre 3606 mg/l et 367 mg/l

- **L'eau de mer :**

La concentration en sulfates dans l'eau de mer est d'environ 2800 mg/l . L'eau de mer renferme des ions variés ; mais c'est l'action du sulfate de magnésium qui peut entraîner le plus de désordres d'origine chimique dans un béton. I.3.4.

- **Atmosphère :**

Les environnements industriels et urbains peuvent contenir de l'anhydride sulfureux SO₂ 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. comme le montre la Figure I.1 qui présente aussi le degré d'agressivité selon le milieu souterrain. [6]

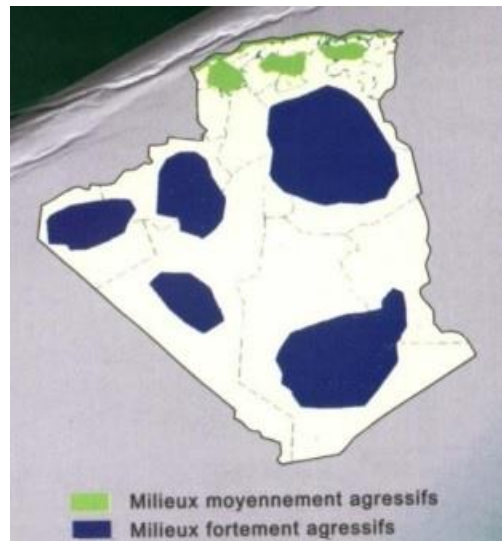


Figure III.1 : Localisation des régions selon le degré d'agressivité de leur milieu souterrain

[6]

III -2-PROCESSUS D'ATTAQUE SULFATIQUE :

III -2-1-Réactions et attaques sulfatiques:

Sources de sulfates multiples :

Internes au béton :

Externes au béton :

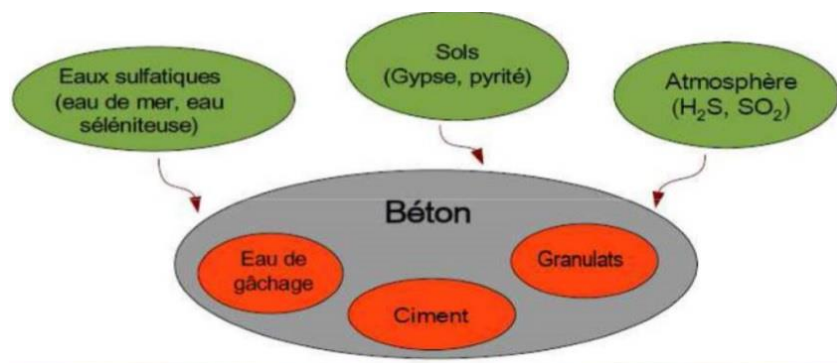


Figure III .2 la Sources de sulfates multiples

III -2-2-Réactions et attaques sulfatique interne :

- Formation différée d'ettringite expansive

- Ions sulfates contenus dans béton (solution interstitielle) réagissent avec les aluminates du ciment
- 3 conditions d'apparition de la pathologie [7]

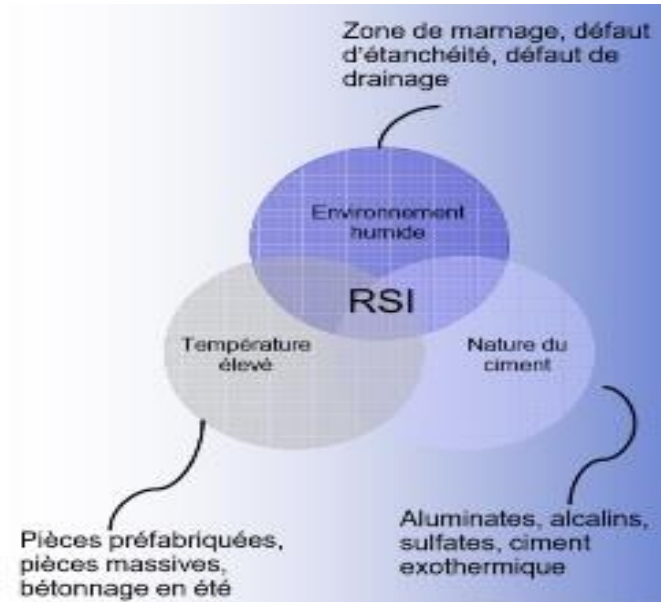


Figure III.3 Réactions et attaques sulfatique interne

III -2-3-Réaction sulfatique interne Symptômes:

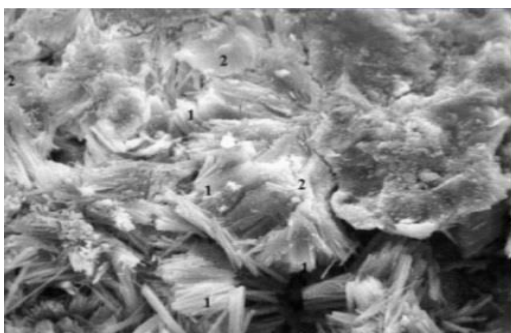


Photo III .1 Cristallisation en aiguilles (microstructure)



Photo III .2 Identiques à la RAG à l'œil nu

[7]

III -2-4-Réactions et attaques sulfatique externe :

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 [30-33] 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. [8]

Etape 1 :

Sulfate de calcium + Portlandite \Rightarrow Gypse secondaire \Rightarrow (expansion)

(eau agressive) (ciment)

Etape 2 :

Gypse secondaire + Aluminate de calcium \Rightarrow Ettringite \Rightarrow (expansion)

(ciment)

III -2-5-attaques sulfatique externe :

Expansion provoqué par la croissance d'aiguille d'ettringite

Expansion se traduit par une fissuration et un éclatement superficiel du béton

Les fissures facilitent la pénétration des agents agressifs et accélère le processus de dégradation [9]



Photo III.3 Expansion provoqué par la croissance d'aiguille d'ettringite (à l'œil nu)



Photo III.4 Expansion provoqué par la croissance d'aiguille d'ettringite (microstructure)

[9]

III-3-ACTION 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.1 mentionne les composants du béton menacés par la corrosion. [10]

Tableau III -1 Composants du béton menacés par la corrosion.

Composants du béton	Désignation	Formule chimique
Pâte de ciment	Hydroxyde de calcium (CH)	Ca(OH) ₂
	Silicate de calcium hydraté (CSH)	3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O
	Aluminate de calcium hydraté	3CaO·Al ₂ O ₃ ·6H ₂ O
	Aluminate de calcium ferrique hydraté	6CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃ ·12H ₂ O
Granulats	Calcaire (Carbonate de calcium)	CaCO ₃
	Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂
	Grès amorphe	SiO ₂ ·xH ₂ O

III -3--On distingue deux types de détérioration:

a)- L'agression résolvente ;

b)- Le gonflement.

a)- Agression résolvente :

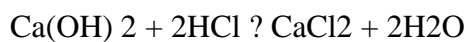
Lorsqu'il y a suffisamment d'eau en qualité de fluide de transport, les composants de la pâte de ciment sont détachés de la surface par l'eau douce ou les substances chimiques nuisibles qu'elle contient. Les granulats non-solubles et des parties de la pâte de ciment durcie sont alors mis à nu, ils se forment une surface en forme de "béton lavé" et la porosité augmente. [10]

L'attaque par l'acide est provoquée par la réaction d'un acide et la partie d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) de la pâte de ciment qui produit un sous-produit de sel de calcium fortement soluble. Ces sels de calcium solubles sont facilement enlevés de la pâte de ciment affaiblissant de ce fait la structure de la pâte dans l'ensemble. Cette réaction de base est montrée ci-dessous :

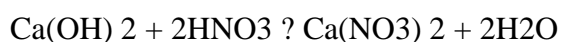


acide hydroxyde de calcium sel de calcium eau

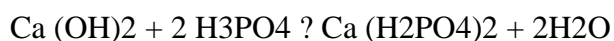
Par exemple :



Hydroxyde de calcium + acide chlorhydrique ? chlorure de calcium + eau



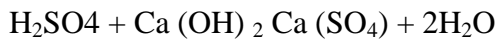
Hydroxyde de calcium + acide nitrique ? nitrate de calcium + eau



Hydroxyde de calcium + acide orthophosphorique ? hydrogène phosphate de calcium

Des acides plus agressifs tels que les acides chlorhydriques, acétiques, nitriques, et sulfuriques produisent les sels de calcium qui sont très solubles. Les acides moins agressifs tels que les acides phosphoriques et humiques produisent des sels de calcium avec une faible solubilité. Ces sels de basse solubilité peuvent agir en tant qu'inhibiteur partiel au processus global en bloquant les pores dans la pâte de ciment par lesquels l'eau passe. Ceci réduit la quantité de sels de calcium qui entrent dans la solution et retardent le processus global.

Un cas plus agressif et plus destructif d'attaque par l'acide se produit lorsque le béton est exposé à l'acide sulfurique. Le sel de calcium produit par la réaction de l'acide sulfurique et de l'hydroxyde de calcium est un sulfate de calcium qui cause alternativement une dégradation accrue due à l'attaque de sulfate. Ce processus est illustré ci-dessous :



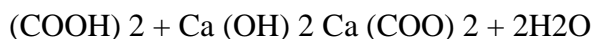
Acide sulfurique + hydroxyde de calcium sulfate de calcium + eau.

(Le produit de sulfate de calcium contribue à l'attaque de sulfate).

La dissolution de l'hydroxyde de calcium provoquée par l'attaque acide procède en deux phases. La première phase étant la réaction acide-hydroxyde de calcium dans la pâte de ciment. La deuxième phase étant la réaction acide-silicate de calcium hydraté, cette phase ne commencera pas jusqu'à ce que tout l'hydroxyde de calcium soit consommé. La dissolution de silicate de calcium hydraté, dans les cas les plus avancés de l'attaque par l'acide, peut endommager considérablement le béton. [10]

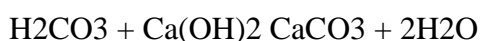
Les attaques acides sont, dans leur principe, similaires au phénomène de lixiviation. En effet, l'acide réagit avec la portlandite qui est dissoute, puis avec les autres hydrates qui sont décalcifiés. On mettra de côté ici l'action des acides forts comme l'acide chlorhydrique ou l'acide nitrique, qui dissolvent entièrement le béton, conduisent à un recul de l'interface matériau-acide, et pour lesquels une protection de surface du béton est absolument nécessaire.

La nocivité de l'attaque acide dépend essentiellement de la solubilité du sel formé par réaction avec la portlandite. Par exemple, pour l'acide oxalique on a:



Le sel formé (oxalate de calcium) est insoluble dans l'eau et donc le béton n'est pas endommagé. C'est aussi le cas avec les acides phosphorique et tartrique.

Le cas de l'acide carbonique (solution aqueuse de CO_2) est un peu particulier. En effet, comme dans le cas du CO_2 sous forme gazeuse, l'acide carbonique réagit avec la portlandite pour former de la calcite. Mais, s'il y a du CO_2 en excès et si l'eau est douce, la calcite va réagir avec l'acide carbonique pour donner du bicarbonate de calcium très soluble dans l'eau (165g/l). Il y a alors lixiviation. L'agressivité d'une eau contenant du gaz carbonique dépend donc de la quantité de gaz dissous et de la dureté de l'eau.



Dioxyde de carbone Calcite



Bicarbonate de calcium [10]

III-4-ATTAQUE PAR LES IONS CHLORURES :

III -4-1-Mécanisme de pénétration des Cl-:

Entrainement mécanique par l'eau qui pénètre dans le béton sous l'effet de l'humidification ou d'une pression

Si béton constamment humide : pénétration due à un gradient de concentration

Loi de diffusion

- **Source de Cl -:**

Constituants du béton (sables, gravillons, adjuvants)

Sels de déverglaçage

Sels marins [11]

III -4-2-Pénétration des chlorures est favorisée par un béton :

Fissuré

Mal mis en œuvre

Pas suffisamment compact (adéquation de la formule avec l'environnement)

La diffusion des chlorures nécessite de l'eau. Les ions chlorures pénètrent dans le béton par diffusion ou absorption capillaire.

a)Pénétration des ions chlorures :

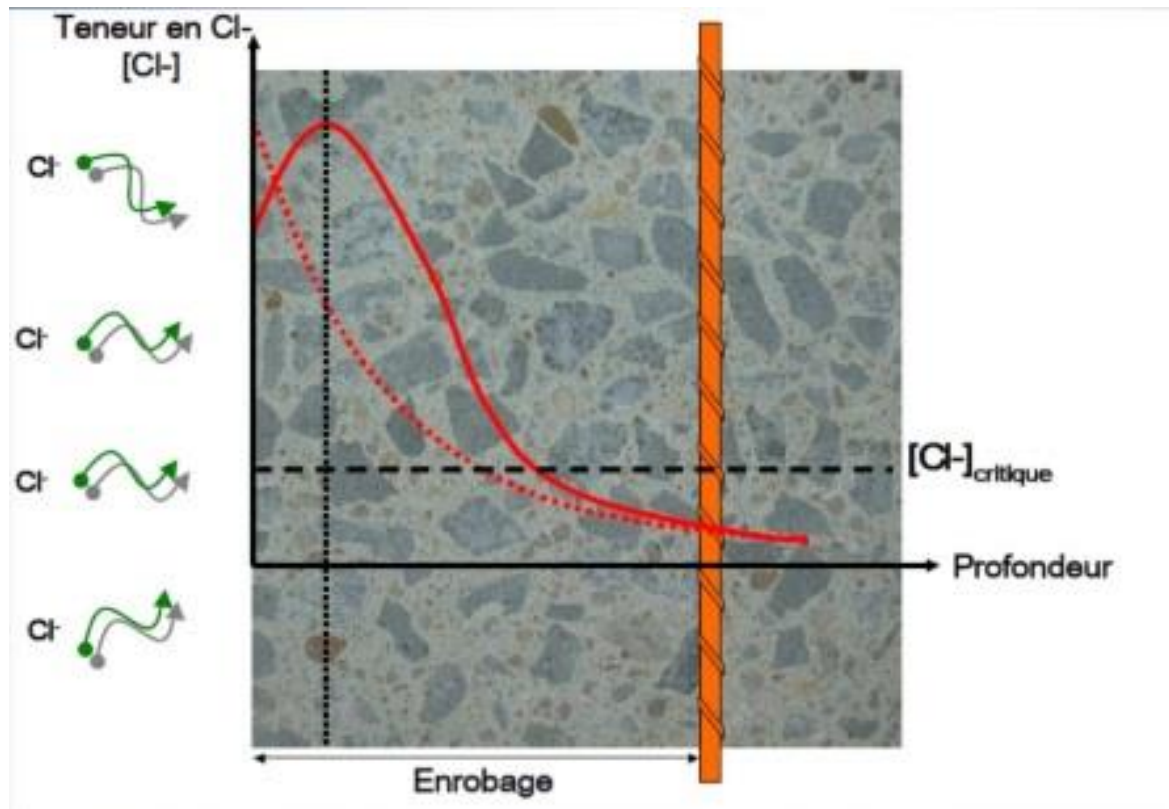


Figure III.4 du Pénétration des ions chlorures

b) A la profondeur des armatures :

si $[Cl^-] > [Cl^-]_{critique}$

initiation de la corrosion

$[Cl^-] / [OH^-] > 0,6$ l'acier n'est plus protégé

$[Cl^-]_{critique} \gg 0,4\%$ (% vs masse de ciment)

Exemple : béton dosé à 350 kg/m^3

avec

$r = 2\,500 \text{ kg/m}^3$

$[Cl^-]_{critique} = 0,056\%$ (% vs masse de béton)

III-5-ACTION DE L'ACIDE CARBONIQUE :

=> Transformation de la portlandite (chaux) en carbonate :



Portlandite

Calcite

=> Baisse du pH ($\text{pH} < 9$)

Dépassivation des armatures => Corrosion

III -5-1-Carbonatation du béton

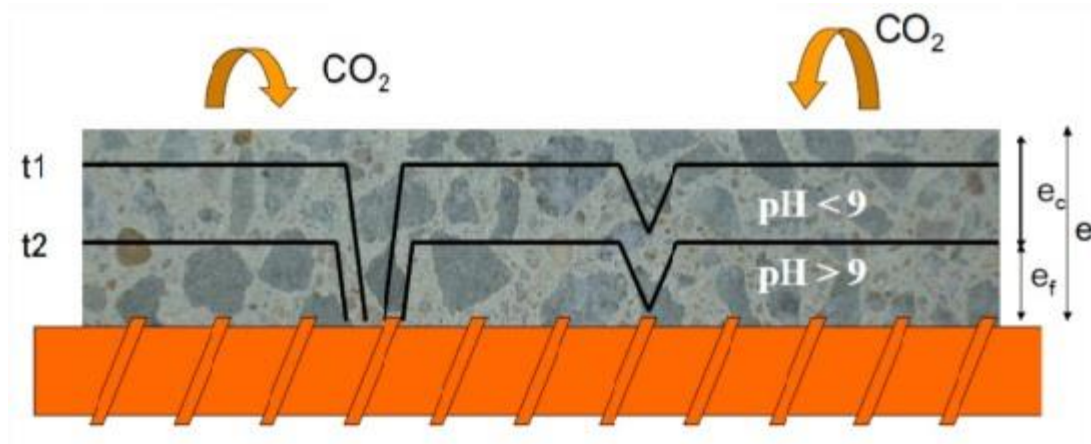


Figure III.5 du Pénétration des ions chlorures

e : enrobage

e_c : profondeur de béton carbonatée

e_f : enrobage efficace

pénétration du CO_2 = loi de diffusion

$$e_c = \sqrt{(D_c \cdot t)} \quad [11]$$

III -5-2-Le gonflement et eclatementsles

Les attaques sous la forme de gonflement sont provoquées par les réactions des matières transportées dans la structure susceptibles de donner naissance à des formations nouvelles très volumineuses. A l'état plastique, les pressions de cristallisation et d'hydratation sont neutres étant donné qu'il y a des possibilités de déformation. Ce n'est qu'après un état de durcissement minimal que les réactions de gonflement peuvent causer des dommages. (C'est pourquoi une eau contenant des sulfates peut tout à fait être appropriée en qualité d'eau de gâchage, bien qu'elle causerait des dommages ultérieurement au béton durci.) [12]

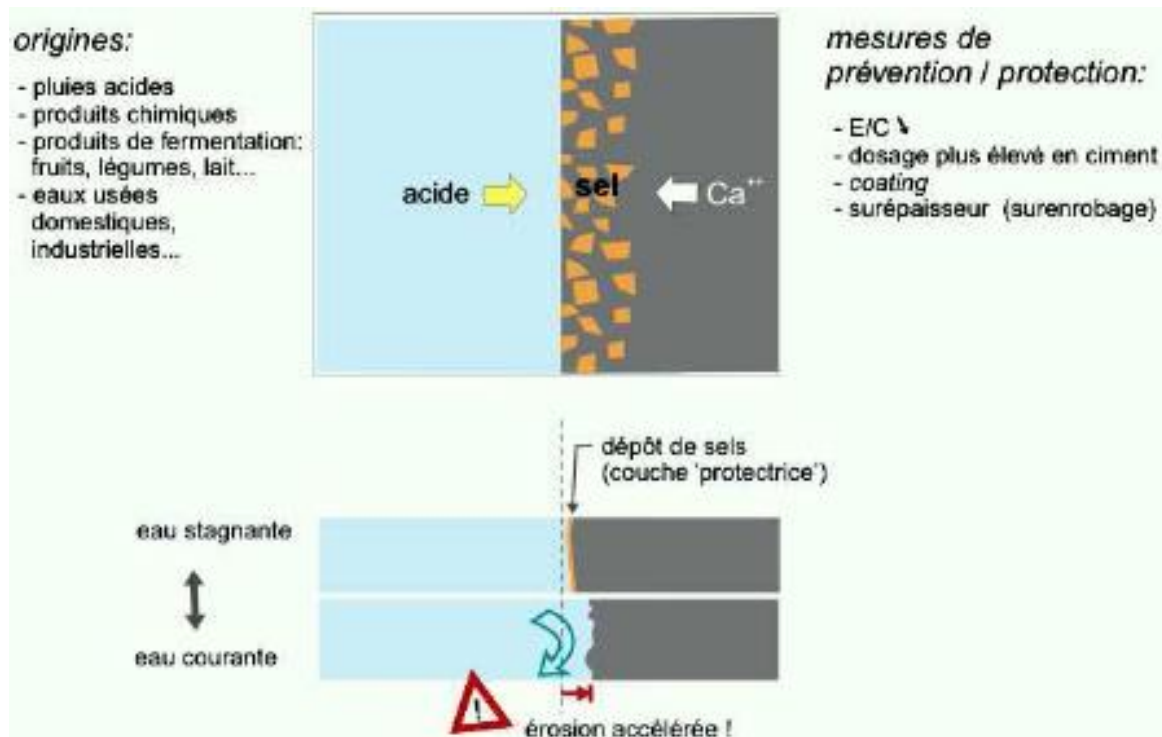


Figure III.6 peut résumer l'attaque par les acides [12]

Chapitre

04

Chpitre IV : IMPACT SUR LES PROPRIETES DE TRANSFERT DANS LA STRUCTURE POREUSE DU BETON

IV-1-LA STRUCTURE POREUSE DU BETON:

Dans le chapitre 4 presente les agressions chimiques résultent du déséquilibre entre la solution interstitielle contenue dans les vides de la structure poreuse du béton et son environnement. La durabilité du béton est ainsi intimement liée à ses capacités d'échanges avec le milieu l'extérieur qui sont conditionnées par la nature des phases en présence mais aussi par les caractéristiques de sa structure poreuse. La recherche d'une forte compacité sera toujours une condition nécessaire pour une bonne durabilité. Le béton étant un matériau composite associant une phase granulaire et une phase liante, sa structure poreuse dépend de l'arrangement granulaire et de la structuration de la phase liante. Concevoir un béton durable consistera donc à optimiser le squelette granulaire et à rechercher une phase liante dense, ceci en conciliant les autres impératifs de fabrication, notamment des propriétés à l'état frais compatibles avec les moyens de mise en œuvre

IV-1-1-Définitions et caractérisation de la structure poreuse des bétons:

Le béton est un matériau polyphasique. Il est composé d'une phase solide, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse. Le solide est constitué des granulats, des hydrates et des parties du liant non hydratées. La phase liquide est la solution interstitielle et la phase gazeuse est un mélange d'air et de vapeur d'eau.

Schématiquement, le béton, matériau poreux, peut être représenté selon la figure 4-1-1

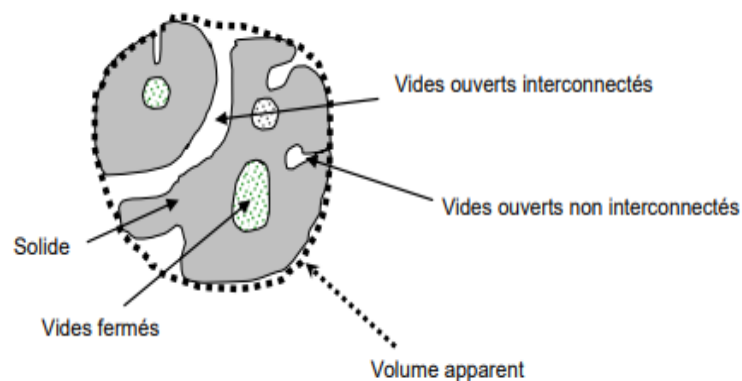


Figure IV.1 : descriptions chématique d'un matériau poreu

Pour décrire un solide poreux, on définit les grandeurs suivantes:

- V_a , le volume apparent contenu dans l'enveloppe du matériau
- v_s , le volume de la partie solide du matériau
- v_o , le volume des pores « ouverts », c'est-à-dire communicant avec l'extérieur,
- $v_{o,i}$, le volume des pores ouverts interconnectés à travers lesquels un fluide peut traverser le matériau,
- $v_{o,ni}$, le volume des pores ouverts non interconnectés,
- v_f , le volume des pores fermés.

On peut écrire les relations suivantes entre ces volumes:

$$V_a = v_s + v \quad \text{ou} \quad v = v_o + v_f \quad \text{et} \quad v_o = v_{o,i} + v_{o,ni}$$

On définit également des porosités en rapportant les volumes de vides au volume apparent:

Porosité ouverte interconnectée : $p_{o,i} = v_{o,i} / v_a$ Porosité ouverte non interconnectée : $p_{o,ni} = v_{o,ni} / v_a$

Porosité ouverte : $p_o = v_o / v_a$ porosité fermée $p_f = v_f / v_a$

Porosité (totale) : $p = v / v_a = p_o + P_f$

A titre d'exemple, la porosité d'un béton courant est de l'ordre de 15% à 28 jours, celle d'un béton à hautes performances de 10 à 12 % et celle d'un béton à très hautes performances peut varier entre 7 et 9%.

Les différentes propriétés d'usage des bétons dépendent des porosités définies ci-dessus. En particulier la durabilité est associée à la porosité ouverte et plus particulièrement à la porosité ouverte interconnectée qui autorise la pénétration des agents agressifs extérieurs dans le béton.

L'état d'humidité du béton peut être caractérisé par deux grandeurs :

La teneur en eau , $w = \frac{m_e}{m_s}$, où m_e est la masse d'eau liquide contenue dans le béton et m_s la masse du béton sec,

Le degré de saturation, $s = \frac{v_e}{v_o}$ où V_e est le volume d'eau contenu dans les vides ouverts.

Pour caractériser la géométrie d'un réseau poreux d'un matériau on utilise aussi trois notions:

La tortuosité T , définie par [13] comme le carré du rapport entre la longueur moyenne de l'écoulement dans le milieu poreux L_e à la longueur du matériau mesurée dans la direction macroscopique de l'écoulement L : $T = L_e^2 / L^2 \sqrt{3}$

La tortuosité n'est pas mesurable car il n'est pas possible de mesurer la longueur L_e mais elle peut être calculée dans certains cas simples (sphères empilées de même diamètre). Dans un milieu poreux, elle est comprise entre 1 et 3 [14]: Dans les milieux homogènes

Chpitre IV: IMPACT SUR LES PROPRIETES DE TRANSFERT DANS LA STRUCTURE POREUSE DU BETON

isotropes, T est une fonction de la porosité ouverte et peut être prise entre 1 et 1,15. Pour la plupart des arrangements compacts, T est proche de 1,15. La constrictivité δ est un paramètre qui rend compte de façon qualitative de la variation de section qu'offrent les pores à l'écoulement ($\delta < 1$). Elle peut être définie par le rapport entre la plus grande et la plus petite section efficace. Dans des arrangements compacts de sphères identiques isotropes, δ est proche de 0,75 [15]

le facteur de formation F [14] défini selon la relation $F = \sigma / \sigma_0$ où σ est la conductivité électrique de la solution

interstitielle contenue dans le milieu poreux et σ_0 la conductivité électrique du même milieu poreux saturé par cette solution. Le facteur de formation est relié à la porosité ouverte et à la tortuosité T du réseau poreux par la relation : $1/F = p\delta/T$

Les grandeurs que nous venons de définir permettent de caractériser globalement (macroscopiquement) un matériau poreux. Les propriétés de transfert des matériaux (perméabilité, diffusion des ions) dépendent de la porosité mais elles sont aussi influencées par la taille des pores et leur connexion.

La connexion des pores peut être décrite au moyen de la théorie de la percolation

IV-1-2- Les méthodes de caractérisation de la structure poreuse des bétons:

La structure poreuse des bétons est complexe et les méthodes de caractérisation sont nombreuses. Les vides dans les bétons sont ouverts et inter connectés et on peut donc confondre la porosité avec la porosité ouverte et la porosité ouverte inter connectée. La méthode de mesure la plus utilisée est celle de la « porosité accessible à l'eau » qui consiste à saturer le matériau sous vide. Le volume apparent est déterminé au moyen d'une pesée hydrostatique et le volume des vides est obtenu par différence entre la masse de l'échantillon saturé et celle mesurée après séchage. La méthode fait l'objet d'une recommandation qui fixe en particulier la taille minimum de l'échantillon et les modalités du séchage [16]. En pratique il faut éviter de comptabiliser sous forme d'eau libre la partie de l'eau chimiquement liée qui correspond à la déshydratation partielle des hydrates tout en n'imposant pas une durée de séchage excessive.

La détermination de la taille des pores est beaucoup plus complexe. L'espace poreux est continu et il n'est pas évident de le décrire par un assemblage de pores ayant des formes géométriques simples. En pratique, les méthodes de mesure font appel à différents principes et à chacune d'elles correspond une convention pour la définition du pore et de sa taille. Trois méthodes sont principalement utilisées pour caractériser la structure poreuse des bétons.

La première repose sur l'exploitation des isothermes de sorption d'eau. Elle suppose qu'il y a coexistence d'eau liquide condensée dans les pores et d'eau adsorbée sur les parois des pores. La distribution de la taille des pores est obtenue à partir de la courbe de désorption en faisant l'hypothèse que les pores sont cylindriques, que le rayon des pores remplis d'eau est donné par la relation de Kelvin-Laplace et que les pores sont recouverts d'une couche d'eau dont l'épaisseur varie avec l'humidité relative. Cette méthode est particulièrement utilisée pour caractériser les pores dont le rayon est de l'ordre de la dizaine de nm.

La deuxième méthode utilise l'analyse d'images. Des images numériques de sections polies de béton obtenues généralement en microscopie électronique à balayage (en mode d'électrons rétro diffusés comme à la figure 3.10 par exemple) sont analysées. Grâce à des traitements morphologiques et aux outils de la stéréologie, des données tridimensionnelles sont obtenues à partir de l'observation des sections en 2D. Toutes les mesures effectuées sur une section polie n'ont pas une correspondance simple avec des grandeurs en 3D (il suffit pour s'en convaincre d'imaginer un coupe traversant un matériau granulaire ; les dimensions de grains mesurées dans le plan de coupe ne permettent pas simplement de connaître la dimension des grains en 3D). La porosité est par contre une grandeur facile à connaître puisqu'elle est égale à la fraction surfacique des vides observée sur une coupe [17]. Depuis les travaux de Scrivener [18] cette méthode est aussi utilisée pour connaître les teneurs volumiques des différents hydrates et les degrés d'hydratation. Par contre, la dimension des pores ne se mesure pas facilement en analyse d'images. Il faudrait pour cela disposer d'images à fort grossissement car les plus petits pores des hydrates sont de l'ordre du nanomètre. En pratique cette méthode est peu adaptée à l'étude de la structure poreuse des bétons car elle nécessite des quantités d'images considérables pour disposer d'une représentation significative. En outre la taille des pores n'est pas uniforme dans le béton car, comme cela sera discuté plus loin, les granulats sont entourés d'une zone plus poreuse appelée « auréole de transition ». L'analyse d'image peut toutefois fournir des informations utiles si on limite l'investigation aux pores les plus gros.

La troisième méthode, la plus utilisée, est la porosimétrie au mercure. Un échantillon préalablement séché est soumis à des pressions croissantes de mercure. Ce liquide non mouillant pénètre progressivement dans le matériau. Si on suppose que les pores sont des cylindres, la loi de Washburn exprime la relation entre la pression d'injection P et le rayon des pores remplis :

$$P = 2\sigma_{Hg} \cos\theta / r$$

σ_{Hg} est la tension superficielle du mercure (environ 0,48 N/m) et θ son angle de raccordement (environ 140 degrés).

Chpitre IV: IMPACT SUR LES PROPRIETES DE TRANSFERT DANS LA STRUCTURE POREUSE DU BETON

Cette méthode nécessite un séchage préalable de l'échantillon qui risque de modifier sa microstructure. La comparaison de données issues de protocoles différents est donc délicate et pour faciliter les comparaisons, l'AFGC a proposé une recommandation pour la préparation des échantillons [19]. Comme pour les méthodes précédentes, il est nécessaire de disposer d'un échantillon dont la taille est suffisante pour être représentative. Ce n'est pas le cas avec les porosimètres disponibles dans le commerce car les cellules de mesure ont des tailles très petites et ne permettent d'étudier que des échantillons de quelques cm³. En plus de ces réserves, il faut mentionner plusieurs limitations à cette méthode. La première concerne la taille minimale des pores accessibles. En général, compte tenu des pressions maximales disponibles, le diamètre minimum accessible est de 3 nm. La pression correspondante, de l'ordre de 490 MPa, endommage vraisemblablement le matériau et les volumes de pores mesurés sont sujets à discussion. D'autre part, le modèle de description de la structure poreuse est celui d'un ensemble de cylindres accessibles au mercure depuis la périphérie du matériau. Il est évident que tous les plus gros pores ne communiquent pas avec l'extérieur et ne sont accessibles au mercure que par des pores plus petits. Le volume des pores les plus gros est donc sous-évalué au bénéfice des plus petits pores. On peut considérer que le porosimètre à mercure donne une information sur le diamètre d'accès aux pores. Des méthodes ont été développées pour mieux rendre compte de la réalité de la structure poreuse. Elles consistent à exploiter la courbe d'injection et la désaturation du mercure dans l'échantillon à pression décroissante. Dans la pratique courante de la description de la structure poreuse des bétons, ces méthodes ne sont que rarement utilisées.

La comparaison de données montre que les résultats varient beaucoup selon la méthode utilisée. Par exemple, la figure 3.5 illustre les différences entre l'analyse d'images et la porosimétrie au mercure. La première méthode est limitée à des tailles de pores de l'ordre du micromètre à cause des grossissements maximum utilisés en microscopie à balayage. On remarque bien que la porosimétrie au mercure survalue fortement le volume des petits pores. Dans ce qui suit, les structures poreuses seront caractérisées au moyen du porosimètre à mercure car le domaine de tailles de pores obtenu par cette méthode est le plus étendu et les données sont plus nombreuses dans la littérature scientifique. Il faut toutefois conserver en mémoire que la représentation donnée par cette méthode comporte de nombreux biais et qu'il convient de les analyser de façon comparative. Nous montrerons dans la troisième partie de ce chapitre que la description de la structure poreuse par porosimétrie au mercure est pertinente pour la prédiction des transferts dans le béton.

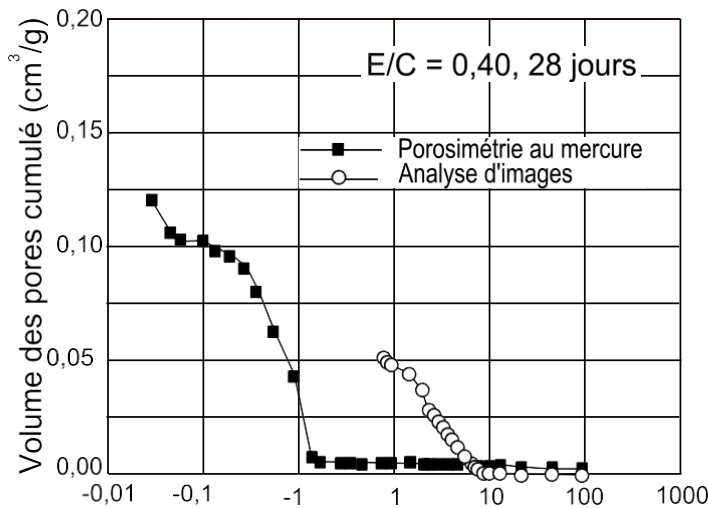


Figure IV.2: structure poreuse d'une pâte de ciment Portland (E/C = 0,40, 28 jours). Comparaison entre les données de porosimétrie au mercure et d'analyse d'images, d'après [20]

Le porosimètre à mercure permet aussi d'évaluer la porosité ouverte, le volume des vides ouverts étant calculé par le volume total de mercure injecté dans l'échantillon à haute pression. Les valeurs obtenues ainsi sont systématiquement inférieures à celles mesurées à l'eau ([21], [22]). Ce résultat est généralement expliqué par le fait que le porosimètre à mercure ne comptabilise pas les très petits pores car la pression maximale appliquée est limitée alors que tous les pores sont en principe accessibles consécutif à une quantité d'hydrates plus faible (les comparaisons ne sont pas ici à même classe de résistance). La réactivité des cendres volantes et des laitiers qui se développe après quelques semaines, vient en forcer les effets de l'hydratation du clinker et conduit à long terme à une porosité du même ordre de grandeur et à une diminution de la taille des plus gros pores. Ces résultats dépendent fortement de la réactivité des cendres volantes et du laitier, de la durée de la cure et de la température.

IV-1-3-La structure poreuse du béton:

Importance du squelette granulaire A l'état frais, le béton est un mélange de grains et d'eau. Les grains sont de tailles diverses, depuis les plus gros, le gravillon jusqu'aux plus fins, les grains de ciment dans les bétons courants.

Pour réduire la porosité des bétons il convient donc de réduire le plus possible la porosité du mélange de grains, donc le dosage en eau, tout en respectant les autres éléments du cahier

Chpitre IV: IMPACT SUR LES PROPRIETES DE TRANSFERT DANS LA STRUCTURE POREUSE DU BETON

des charges (mise en place aisée compte tenu des moyens de mise en œuvre choisis, résistance à la compression à 28 jours...) et tout ceci au moins en coût. Si on limite le propos à la seule structure poreuse du béton, il faut discuter des moyens de réduire la quantité d'eau. Caquot [23] a établi de façon empirique une loi qui permet de raisonner sur les moyens d'action. Cette loi exprime la porosité minimale p_{min} d'un assemblage de grains, comme une fonction de la dimension minimale - d - et maximale - D - des grains:

$$P_{min} = p_0 (5\sqrt{d/D})$$

Dans cette relation p_0 est un coefficient de proportionnalité qui dépend de la maniabilité du béton

Dans les bétons courants, les grains de ciment sont les grains les plus fins et, sous l'effet des forces d'interactions, ils sont floculés. D'un point de vue géométrique, les amas ou floccs ainsi constitués ont une dimension apparente supérieure à la dimension des grains individuels qui les constituent. La dimension minimale de l'assemblage des grains peut être diminuée en défloculant les grains de ciment. Ceci est assuré par les adjuvants plastifiants ou superplastifiants. Dans le cadre envisagé ici où la maniabilité des mélanges est considérée comme constante, la réduction de d entraîne une diminution de la porosité et l'adjuvant agit comme « réducteur d'eau ». Ce mode d'action permet l'obtention de bétons à hautes performances.

Les bétons à très hautes performances sont élaborés selon une démarche analogue en complétant la squelette granulaire par des particules plus fines que les grains de ciment, en général de la fumée de silice. Pour qu'elles remplissent leur rôle de complément granulaire, ces particules doivent être défloculées ce qui impose l'utilisation de superplastifiant réducteur d'eau. À titre d'exemple, la figure 3.19 montre l'évolution de la porosité de mortiers dont la maniabilité est réglée à une même valeur en ajustant la quantité de l'adjuvant réducteur d'eau.

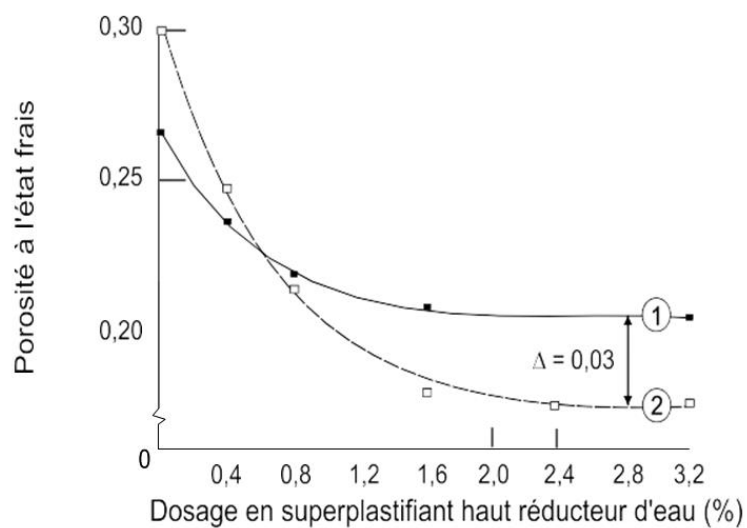


Figure IV.3: influence d'un adjuvant haut réducteur d'eau et de l'addition de fumée de silice sur la porosité à l'état frais, d'après [24]

IV-2-TRANSPORT PAR DIFUSION :

IV-2-1-Ladiffusion dans les bétons:

a)Lesloisdela diffusion;

Ladiffusionmoléculaire,relationsentrelescoefficients dediffusion

La diffusion désigne le processus de transport d'un constituant dans un milieu donné sous l'effet de son agitation à l'échelle moléculaire. S'il existe une différence de concentration entre deux points du milieu, ce phénomène engendre un transport global du constituant considéré, orienté de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée. Jusqu'à ce qu'il y ait équilibre des concentrations.

Les transports par diffusion peuvent intervenir sous deux formes : en phase liquide ou en phase gazeuse.

Le premier mode concerne le transport d'espèces ioniques en solution dans la phase aqueuse interstitielle ; il intervient par exemple lors de l'attaque du béton par les sulfates de l'eau de mer ou par l'acide carbonique d'un sol riche en matières organiques.

Les transports de gaz dans les bétons ne se produisent généralement pas par écoulement (sous l'effet de différences de pression) mais plutôt par diffusion dans l'air contenu dans les pores ou les fissures du matériau.

Ladiffusion en phase gazeuse concerne notamment la dessiccation d'un béton déjà partiellement séché (transport de vapeur d'eau), ainsi que la pénétration de gaz agressifs pour le béton ou pour ses armatures tels que le gaz carbonique ou l'oxygène.

Pour décrire le transport diffusif, nous supposons dans un premier temps que les particules sont à l'état atomique ou moléculaire. C'est bien le cas des gaz ; par contre, en solution les

particules sont des ions et en plus du moteur qui constitue la différence de concentration, des forces d'interactions électriques interviennent dans le transport puisque chaque ion est entouré par d'autres espèces ioniques. Dans ce cas les lois que nous allons présenter dans cette première approche doivent être modifiées.

Diffusion en milieu infini:

Le processus est caractérisé par un coefficient de diffusion D défini par la première loi de Fick $j_x = -D(c\delta/\delta x)$

Où J_x est le flux du constituant dans la direction x et $c\delta/\delta x$ est son gradient de concentration

Dans cette direction. Le coefficient de diffusion est caractéristique de l'espèce diffusante, du milieu dans lequel elle diffuse et de la température. Diffusion dans un pore:

Dans un pore, les parois perturbent le transport dans la direction du gradient de concentration et le flux J_x^* s'exprime encore par la première loi de Fick mais le coefficient de diffusion D^* est plus petit que D

$$j_x^* = -D^*(c\delta/\delta x)$$

Diffusion dans un milieu poreux, coefficient de diffusion effectif:

Dans un milieu poreux, on décrit le transport à l'aide du flux effectif

quantité de constituant qui traverse le matériau par unité de temps et par unité de surface du matériau dans la direction x . Ce flux reste proportionnel au gradient de concentration de l'espèce dans

la phase support où elle diffuse (la solution interstitielle pour une espèce ionique ou l'air pour le CO_2 atmosphérique par exemple) et le coefficient de proportionnalité est donné par la première loi de Fick appliquée au milieu poreux:

$$j_{e,x} = -D_e(c\delta/\delta x) \text{ REFAIRE L ECRITURE}$$

est appelé « coefficient de diffusion effectif » et dépend de l'espèce diffusante, de la phase support, de la structure poreuse du matériau et de la température. Il dépend aussi de l'état de saturation. Dans ce qui suit nous considérerons que le milieu poreux est saturé par la phase support.

Les coefficients de diffusion s'expriment en m^2/s .

Les modèles physiques relient le coefficient de diffusion effectif D_e d'un constituant donné au coefficient de diffusion D de ce même constituant dans la phase qui remplit les pores. Une relation du type suivant est généralement utilisée, dans laquelle est introduit le paramètre de constrictivité τ qui rend compte des effets de la variation de section des pores:

$$D_e = (\tau P_o / T) D$$

Où p_o est la porosité ouverte et T la tortuosité. Cette relation est analogue à celle qui définit le

Facteur de formation F . On retrouve: $F = \sigma / \sigma_e = D / D_e$

Ce modèle montre que, contrairement au cas de la perméabilité, la taille des pores n'a pas d'influence sur les propriétés de transport par diffusion.

IV-2-2-La diffusion ionique:

La solution interstitielle des bétons est fortement concentrée en espèces ioniques : c'est un électrolyte. Les ions étant eux-mêmes électriquement chargés, leur mouvement dans la solution interstitielle n'est pas seulement gouverné par le gradient de concentration mais aussi par le gradient $\Delta\psi/\delta x$ de potentiel local dû aux autres ions et connu sous le nom de potentiel de membrane.

Le flux dû à ce potentiel de membrane s'exerçant sur un ion i est donné par la relation

$$J_{i,x} = -u_i c_i (\delta\psi/\delta x)$$

étant la concentration de l'espèce i au point considéré et u_i sa mobilité ionique. Le flux total est la somme de la contribution due au gradient de concentration, donnée par la première loi de Fick, et de celle du eau potentiel de membrane soit;

$$J_{i,x} = -D(\delta c_i/\delta x) - u_i c_i (\delta\psi/\delta x)$$

La mobilité ionique est relié au coefficient de diffusion par l'équation de Nernst-Einstein:

$$u_i = D_i z_i F / RT$$

En portant cette valeur dans la relation précédente on obtient l'équation de Nernst-Planck:

$$J_{i,x} = -D_i (\delta c_i/\delta x) - (z_i F / RT) c_i D_i (\delta\psi/\delta x)$$

Où F est la constante de Faraday, R la constante des gaz parfait et T la température. Si on considère cette fois la diffusion dans un matériau poreux, la relation donnant le flux effectif s'établit de façon analogue et on peut écrire:

$$J_{e,i,x} = -D_{e,i} \frac{\partial c_i}{\partial x} - \frac{z_i F}{RT} c_i D_{e,i} \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

Dans la pratique, le flux d'un ion est généralement exprimé par la première équation de Fick. Remarquons qu'il s'agit là d'une simplification puisque en procédant ainsi on ne prend pas en

compte les interactions électriques créées par les autres ions de la solution interstitielle. Les erreurs commi

ses en faisant cette simplification ne sont pas très importantes mais elle expliquent des résultats qui seraient inexplicables par la loi de Fick. Nous y reviendrons dans le titre

IV-2-3--Mesure des coefficients de diffusion:

Le principe des méthodes habituelles de mesure consiste à établir un gradient de concentration constant (ou de pression partielle dans le cas des gaz) de part et d'autre d'une éprouvette d'épaisseur L et de mesurer les quantités d'espèce diffusante sortant de l'échantillon. Les concentrations sont maintenues constantes de chaque côté de l'échantillon en renouvelant régulièrement les solutions contenues dans deux compartiments. Le dispositif utilisé pour les espèces ioniques ou les radioséléments en solution est présenté à la figure 3.36. Remarque sur l'essai de diffusion de diffusion simple :

- Le calcul du coefficient de diffusion effectif se fait à partir du flux en régime permanent en appliquant la première loi de Fick (équation 14). Il s'agit d'une simplification puisque le flux doit s'exprimer en toute rigueur selon la loi de Nernst-Planck (équation 20). Pour utiliser l'équation de Nernst-Planck il faudrait connaître le champ électrique local créé par les autres ions ce qui est compliqué en pratique. Les valeurs obtenues par application de la première loi de Fick dépendent de la concentration dans le compartiment amont et, pour les espèces ioniques, de la nature du contre ion associé. Il s'agit là d'une conséquence de l'approche simplifiée[22]. La durée permettant d'obtenir le régime permanent est très longue (plus d'un an pour un béton courant de 3cm d'épaisseur. Le temps de mesure n'est donc pas compatible avec les exigences de contrôle de qualité ou de mise au point d'une formule de béton. Dans la pratique et pour les espèces ioniques, on réalise des essais accélérés en appliquant un champ électrique extérieur (Figure 4-2-1)

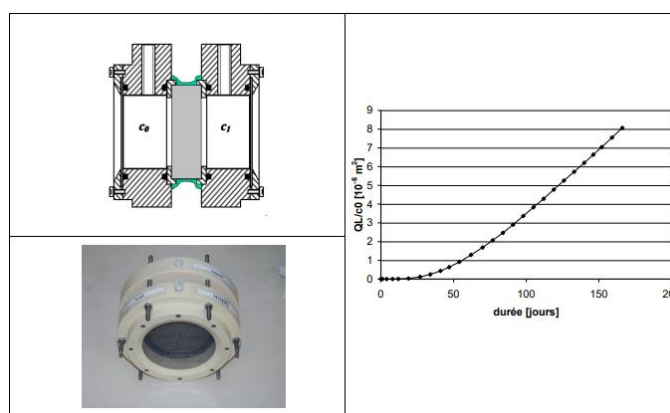


Figure IV.4: principe de la mesure du coefficient de diffusion effectif : essai de diffusion simple

IV-2-4-Diffusion dans les BHP:

Chpitre IV: IMPACT SUR LES PROPRIETES DE TRANSFERT DANS LA STRUCTURE POREUSE DU BETON

Le coefficient de diffusion effectif des bétons diminue lorsque la résistance augmente comme l'illustre la figure 3.45.

Le coefficient de diffusion des BHP est inférieur à celui des bétons courants d'un facteur de 100 à 1000. L'autodessiccation des BHP et la microfissuration qui pourrait en résulter ne conduisent pas à une augmentation du coefficient de diffusion.

Notons qu'au laboratoire, les échantillons sont saturés sous vide avant les essais alors qu'en service, du fait de leur auto dessiccation, les BHP sont probablement moins saturés et les possibilités de diffusion sont plus faibles. Ce point est discuté au titre suivant

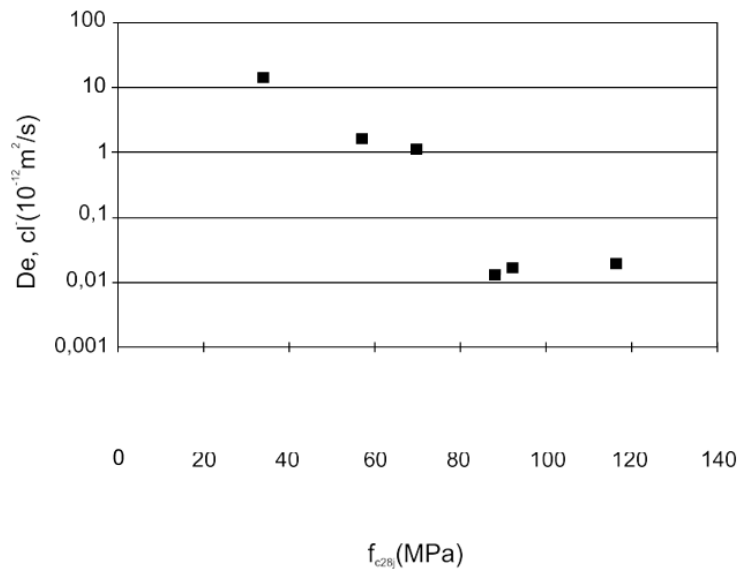


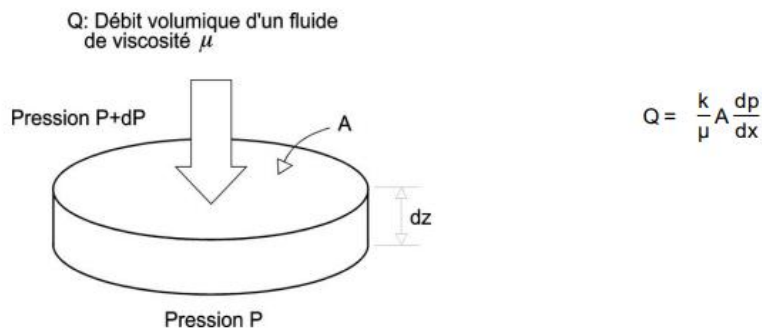
Figure IV.5:variation du coefficient de diffusion effectif des bétons en fonction de leur résistance en compression à 28 jours, d'après [26]

Les bétons de cette étude sont réalisés avec du ciment CEM I ou du ciment CEM II et peuvent contenir de la fumée de silice. Après 24 heures de cure humide, ils sont conservés dans l'air à 20°C et 50%HR jusqu'à 1 an, âge de l'essai. Le coefficient de diffusion est mesuré au moyen d'un essai accéléré sous champ électrique sur des éprouvettes préalablement saturées sous vide. Comme pour la perméabilité au gaz, on peut noter que le coefficient de diffusion effectif ne diminue plus pour des résistances supérieures à 85 MPa. La figure 4-2-2 montre qu'une voie d'amélioration peut consister à combiner plusieurs additions minérales.

IV-3-Transport par écoulement hydraulique : la perméabilité , Hypothèse et loi 'écoulement du fluide :

IV-3-1-Definition de permeabilité:

La perméabilité d'un milieu poreux mesure son aptitude à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression ou d'un champ de gravité. Cette quantité est liée à la loi de Darcy. L'absence de perméabilité s'appelle l'imperméabilité.



$$q = \rho v f = -\frac{k}{\nu} (\Delta p - \rho g)$$

Figure IV.6: définition de la perméabilité

IV-3-2- Définition de permeabilité pour un matériau isotrope:

Pour un matériau poreux isotrope traversé par un écoulement le coefficient de perméabilité k est une valeur scalaire définie à partir de la loi de Darcy donnant le débit massique q ou la vitesse moyenne dans le milieu V f (vitesse de filtration) d'un fluide de masse volumique ρ , de viscosité cinématique ν sous l'influence d'un gradient de pression ∇p et d'un champ gravitationnel g :

$$\mathbf{q} = \rho \mathbf{V}_f = -\frac{k}{\nu} (\nabla p - \rho \mathbf{g})$$

k a la dimension d'une surface. L'unité standard de perméabilité est donc le m².

Pour un matériau isotrope mais non homogène à l'échelle de la porosité le coefficient de perméabilité est une distribution statistique dont on ne retient généralement que la moyenne.

IV-3-3-Couplage séchage – propriétés de transferts :

a)Influence sur la perméabilité :

Comme cela a déjà été indiqué au titre 3.1, la perméabilité aux gaz d'un béton dépend fortement de son état de saturation. Ceci est dû au fait que les gaz ne peuvent passer pratiquement que par les pores qui ne sont pas saturés. Les figures 3.54 et 3.55 montrent les fortes évolutions de la perméabilité intrinsèque en fonction du taux de saturation, que ce soit pour un béton ordinaire ou hautes performances [27]. Des résultats comparables ont été obtenus par Abbas [28]. Ils expliquent pourquoi il est nécessaire de connaître expérimentalement la teneur en eau du béton lorsque l'on mesure sa perméabilité et, du point de vue de la modélisation, pourquoi il faut faire varier la perméabilité avec la teneur en eau (par exemple avec une relation du type de celle proposée par Van Genuchten pour les sols non saturés [29]).

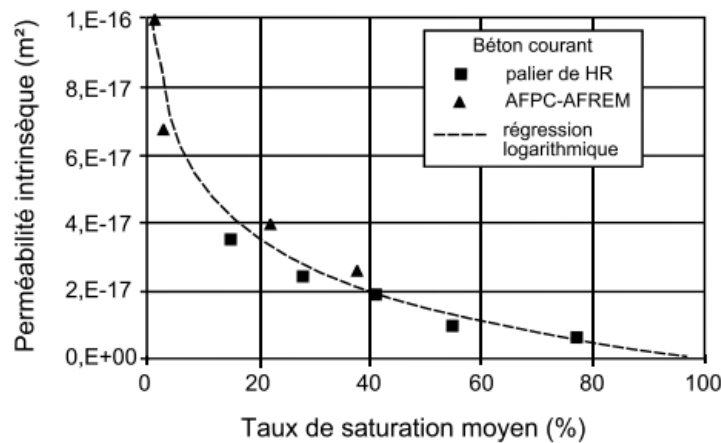


Figure IV.7: perméabilité intrinsèque en fonction du taux de saturation moyen pour un béton courant [27].

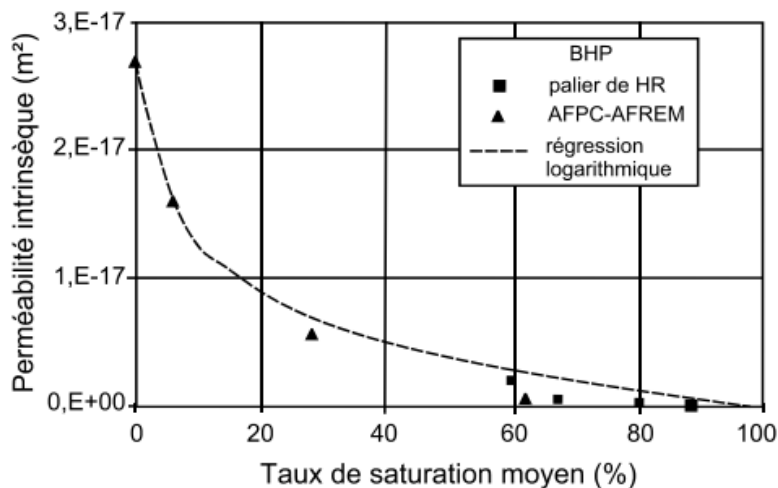


Figure IV.8 : perméabilité intrinsèque en fonction du taux de saturation moyen pour un béton hautes performances [27]

IV-3-4-les hypothese de loi d'ecoulement du fluide:

Une hypothèse sous-jacente à la définition est que l'écoulement dans le milieu est un écoulement en régime de Stokes. Cette hypothèse est utilisée pour établir l'équation de Darcy à partir de la description de la porosité par la méthode de prise de moyenne volumique ou par homogénéisation.

a) la méthode de prise de moyenne volumique:

La prise de moyenne volumique, souvent désignée par son nom anglais volume averaging, est une technique mathématique de changement d'échelle largement utilisée dans l'étude des milieux poreux, dont l'objectif est de créer des modèles macroscopiques à partir de problèmes à l'échelle microscopique. [30]

b) homogénéisation:

la théorie de l'homogénéisation est de proposer une équation « effective » (ou « homogénéisée ») généralement plus simple, qui décrive le comportement de la solution de l'équation considérée dans la limite où la petite échelle tend vers 0. Un des buts de cette théorie est de simplifier ainsi la simulation numérique de systèmes physiques complexes faisant intervenir plusieurs échelles. [31]

IV-3-5-Loi d'ecuolement : Loi de Darcy:

La loi de Darcy est une loi physique qui exprime le débit d'un fluide incompressible filtrant au travers d'un milieu poreux. La circulation de ce fluide entre deux points est déterminée par la conductivité hydraulique ou le coefficient de perméabilité du substrat et par le gradient de pression du fluide. Dans le cas d'un cours d'eau ou d'un réservoir alimentant une nappe, ce gradient est lié à la hauteur de l'eau.

Loi de Darcy exprime le débit Q d'un fluide incompressible qui s'écoule en régime stationnaire au travers d'un milieu poreux de section A et de longueur L sous l'effet d'une différence de charge ΔH .

$$Q=KA(\Delta H/L)$$

avec :

Q : le débit volumique (m³/s) filtrant ;

K : la conductivité hydraulique ou « coefficient de perméabilité » du milieu poreux (m/s), qui dépend à la fois des propriétés du milieu poreux et de la viscosité du fluide ;

A : la surface de la section étudiée (m²)

$\left\{\frac{\Delta H}{L}\right\}$: le gradient hydraulique, où ΔH est la différence des hauteurs piézométriques en amont et en aval de l'échantillon, L est la longueur de l'échantillon.

[31]

Chapitre 05

Chpitre V: Présentation des travaux expérimentaux de recherche dans le domaine de durabilité (impact des milieux agressifs sur les bétons):

V-1-Étude du comportement mécanique et de durabilité des bétons fibrés dans un milieu agressif):

L'hydrogène sulfuré (H₂S) dégagé dans les réseaux d'assainissement, provoquent de différentes altérations qui peuvent causer des dégradations partielles où la ruine des ouvrages de l'assainissement. L'impact de ces dégradations est très néfaste pour l'homme côté hygiène, santé et économie.

Afin de mieux comprendre ces phénomènes, pr.OurdiaFedaoui-Akmoussi à penché cette étude sur le comportement mécanique et la durabilité des bétons fibrés. Elle à réalisé trois essais, les essais de résistances mécaniques, le test à la phénolphtaléine et l'étude microstructurale (MEB). Les compositions ont été fabriquées avec des rapports eau sur ciment (0,5 ; 0,65 ; 0,8), un dosage en fibres métalliques de 0,5 %. Après une année de conservation dans trois environnements différents qui sont: environnement témoin humide (20°C et 95% HR), environnement cycles (mouillage et séchage), et environnement agressif (égouts), elle à caractérisé les performances mécaniques et de durabilité des mortiers étudiés.

Dans ce document pr.OurdiaFedaoui-Akmoussi présenté les résultats de cette étude concernant l'apport des fibres sur la durabilité des mortiers dans les différents environnements (humide, cycles et égouts). Après une année de conservation, dans les trois environnements, les caractéristiques mécaniques des échantillons ont été déterminées par la flexion 3 points sur des éprouvettes 4×4×16 cm³, et par la compression sur des cubes de 4×4×4 cm³ des mortiers renforcés de fibres métalliques. Les caractéristiques de durabilité ont été déterminées par les mesures de l'épaisseur du béton à pH réduit en utilisant comme indicateur la phénolphtaléine, et par des observations au microscope électronique à balayage afin d'expliquer les différentes modifications microstructurales de la matrice cimentaire.

Les résultats de cette étude, après une année de conservation dans le milieu égouts, nous montrent que:

- Les résistances en compression des mortiers conservés dans les deux environnements sont sensiblement les mêmes.
- Pour la flexion, les mortiers fibrés (MN_{fm}) conservés dans l'environnement égouts présentent une diminution de résistance par rapport à ceux conservés dans l'environnement humide
- Les épaisseurs à pH réduit obtenues sur les mortiers fibrés sont plus importantes que celles obtenues sur les mortiers non fibrés
- Les observations au MEB ont mis en évidence : un début de colonisation bactérienne, présence d'une faible épaisseur des C-S-H dégradés, formations d'ettringite secondaire. [32]

V-2- (COMPORTEMENT DES BÉTONS DANS LES MILIEUX AGRESSIFS (CAS DE BISKRA).):

-L'attaque sulfatique externe est l'une des causes de détériorations les plus agressives qui affecte la durabilité des structures en béton. Cette problématique est très courante dans les régions de la commune de Lioua willaya de Biskra, où les concentrations des sulfates sont très élevées dans les sols, et dans les eaux souterraines.

-dans cette étude SAYAD Youcef basée sur la préparation du ciment avec la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (Algérie) en remplaçant un certain pourcentage de clinker par deux pourcentages de l'ajout [20%, 30%] du poids de ciment. Afin d'étudier les caractéristiques du ciment à base de pouzzolane et le comportement mécanique du béton en milieu agressive (sol dans la commune de Lioua).

-Les résultats ont montré que cette substitution s'accompagne d'une diminution des propriétés mécaniques à court terme, par contre, elle conduit à une importante amélioration à long terme, en particulier pour durées de conservation supérieures à 180 jours. Ceci indique que l'addition de la pouzzolane naturelle au clinker génère des réactions chimiques lentes. Les résultats ont montré également que l'ajout utilisé entraîne un changement remarquable des caractéristiques physiques des ciments préparés.

- Une observation au microscope électronique à balayage a été réalisé sur les échantillons de rapport (E/C = 0,6) afin de mieux visualiser les différentes modifications de la microstructure de la matrice. L'observation au MEB montre qu'il y'a une détérioration de la surface externe des échantillons par les phénomènes biochimiques qui sont provoqués par une attaque sulfatique dans le sol. Les résultats ont également montré que le ciment contenant de [20%,30%] de pouzzolane montrent une répartition homogène et dense des parties du matériau.

- Enfin les meilleures performances mécaniques et physiques ont été observées sur le ciment composé contenant respectivement (20%,30%) de pouzzolane, ce dernier diminue la porosité et la perméabilité à l'eau et améliore la durabilité des bétons, notamment vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe.

- Enfin, on peut conclure que le choix d'utiliser la pouzzolane comme substituant au ciment est avantageux du point de vue économique et écologique. De plus, il permet d'améliorer la durabilité des bétons actuellement fabriqués en Algérie en utilisant des matériaux locaux, ainsi que la contribution liante des additions minérales à un double effet, l'une un rôle structurant des liaisons de la matrice cimentaire du point de vue mécanique et l'autre un rôle quantitatif sur la réduction de la porosité. Cette contribution structurante se traduit en termes de durabilité à une meilleure résistance à l'agression chimique [33]

V-3- (Durabilité d'un béton exposé à un milieu Agressive (acide sulfurique) influence du rapport G/S):

Dans cette étude expérimentale Ferhatitaiebrévèle l'effet du rapport gravier/sable sur les propriétés du béton frais et durci en milieu agressif.

La variation du rapport G/S de 1,7, 2,0 et 2,3 à une influence directe sur la durabilité du béton. On remarque que la diminution de la taille des gros granulats engendre une augmentation de la durabilité

En augmentant le rapport gravier / sable la porosité de la matrice du béton devient moins compacte. Et facilite la pénétration des agents agressif dans le béton, la durabilité donc est affectée par ces agents agressifs

L'augmentation de la concentration de l'acide sulfurique engendre une diminution de la résistance du béton ainsi la durabilité est affectée négativement

Résultat:

le rapport E/C diminue en augmentant le rapport G/S, la présence d'un pourcentage important de gros granulats diminue la surface spécifique des grains d'où la diminution du rapport E/C

La masse volumique augmente jusqu'à 28 jours, puis diminue après l'introduction des éprouvettes dans le milieu acide de concentration 5%, la diminution de la masse volumique du béton B1 avec (G/S = 1,7) est plus importante La masse volumique augmente jusqu'à 28 jours, puis diminue après l'introduction des éprouvettes dans le milieu acide de concentration de 10%, la diminution de la masse volumique du béton B1 avec (G/S = 1,7) est plus importante que pour la concentration de 5% d'acide.

une augmentation de la résistance de compression jusqu'à 28 jours puis une diminution de la résistance après 28jours a cause de l'attaque des acides, cette diminution est plus importante pour le béton B3 avec G/S = 2,3 la présence d'une masse plus importante de gros granulats laisse beaucoup de vides entre les grains l'acide peut pénétrer facilement dans le béton et provoque des dégâts considérable.

une diminution de la résistance de traction après 28jours a cause de l'attaque des acides, la diminution est plus importante pour le béton B3 avec G/S = 2,3 la présence d'une masse plus importante de gros granulats laisse beaucoup de vides entre les grains l'acide peut pénétrer facilement dans le béton et provoque des dégâts considérable.

une augmentation de la résistance à la compression jusqu'à 28 jours puis une chute de la résistance après 28jours a cause de l'attaque des acides de concentration plus élevée (10%), la diminution est de concentration plus élevée (10%), plus importante pour le béton B3 avec G/S = 2,3 la présence d'une masse plus importante de gros granulats laisse beaucoup de vides entre les grains l'acide peut pénétrer facilement dans le béton et provoque des dégâts considérable.

une chute de la résistance de traction après 28jours a cause de l'attaque des acides de concentration plus élevée (10%), la diminution est plus importante pour le béton B3 avec G/S = 2,3 la présence d'une masse plus importante de gros granulats laisse beaucoup de vides entre les grains l'acide peut pénétrer facilement dans le béton et provoque des dégâts considérable. [34]

V-4- (Influence du rapport E/C sur la durabilité des ciments et mortier à base de laitier exposés aux milieux agressifs):

Les mortiers confectionnés avec une addition minérale ont fait l'objet de nombreuses études. Toutes fois aucune lois générale n'a encore été dégagé pour quantifier les effets de telles additions, vis-à-vis des propriétés des mortiers, et notamment leur résistance aux agressions des milieux environnants. Dans cette travaille HAMRIT Abdelbasset à étudié la durabilité du laitier conservé dans les sulfates la résistance à la compression, la porosité comme paramètre d'évaluation et essayer d'apporter une contribution à la compréhension des principaux paramètres de l'étude telque le dosage de laitier et, le rapport E/C ainsi le milieu de conservation.

Le présent travail s'inscrit un peu plus dans cette optique des résultats prennent en compte la valorisation des déchets dans la fabrication des mortiers et ciment avec différents rapport E/C. Étudiés les différentes propriétés de mortier au laitier d'El Hadjar

Les résultats expérimentaux montrent que le laitier est plus sensible au sulfate que le ciment ordinaire, ce qui rend le développement des résistances des ciments au laitier conservé moins favorable qu'à l'eau. Le ciment peut être substitué partiellement par le laitier jusqu'à 30%. La prédiction de l'évolution des résistances du mortier au laitier soumis au sulfate variable est possible à partir des résistances de référence en utilisant la méthode du temps équivalent

Ce travail a traité l'effet de plusieurs paramètres influant l'hydratation du ciment au laitier. L'étude s'est étendue sur le mortier .l'examen des propriétés mécaniques et physique. D'après les résultats obtenus, il apparait clairement la conservation à l'eau des mortiers avec et sans ajout à ces propriétés par rapport au sulfate,:

-Le remplacement partiel du ciment par le laitier engendre une réduction de la résistance à la compression et la porosité.

-L'incorporation du laitier dans le mortier conservé dans les sulfates améliore la résistance au jeune âge est confirmé que le laitier a une bonne tenue que le ciment ordinaire.

-Le taux optimal utilisé dans ce cas est de 30%. Le type de ciment utilisé avec le laitier a une influence considérable sur le taux de substitution

-Le rapport E/C joue aussi un rôle important dans le développement de la résistance et la porosité.

-un rapport E/C =0.64, présente une bonne fluidité par conséquence une bonne résistance et porosité faible. [35]

V-5 (durabilité d'un béton exposé à un milieu aggressive(acide sulfurique), influence de la forme des granulats (concassé-roulés)):

Développé sans cesse depuis la fin du XIXe siècle, le béton est aujourd'hui le matériau de construction le plus répandu dans le monde. Si le béton a la capacité de résister aux attaques chimiques, encore faut-il connaître à quelles conditions et comment car il existe pourtant des situations où les ouvrages en béton se dégradent plus vite ou plus sévèrement que prévu suite à des différents facteurs qu'on a présenté dans ce mémoire. Ainsi, les méthodes de diagnostic des ouvrages permettent de quantifier, par croisement de différentes techniques, l'état de dégradation dû aux attaques chimiques. Selon l'état d'avancement des dommages, des mesures préventives, de réhabilitation, seront utilisées afin de garantir la sécurité de l'ouvrage.

La durabilité du béton, armé ou non, dans les conditions agressives, est devenue un sujet d'intérêt majeur et, par conséquent, un domaine de recherche largement exploré. C'est dans ce cadre que s'insère la présente étude. Nous avons donc cherché à comprendre le comportement des granulats face aux attaques chimiques.

Dans ce mémoire L'objectif de Debihabdelmohcene est de rappeler , bien définir , étudier l'influence de la qualité des granulats en milieux aggressive parce qu'elles vont également fixer la durabilité du béton. Cette étude est basée sur les bétons en milieux agressives et l'influence des attaques chimiques sur les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons,

Les résultats des essais vont nous permettre de générer un ensemble de données qui vont servir à valider le choix des classes granulaires spécifiques. Pour cela, la formulation de plusieurs mélanges de béton a été élaborée. L'étude c'est faite sur les caractéristiques des granulats, des classes granulaires et des bétons . A partir des résultats obtenus, nous vérifions l'influence des acides sulfurique avec différents pourcentages de concentration, sur nos mélanges de bétons, et nous vérifions l'influence de la qualité des graviers (roulés et concassés) et leurs résistances aux attaques acide.

Pour la Masse volumique des différentes mélanges Sur granulat on remarque que la masse volumique du mélange de gravier augmente en augmentant le pourcentage de gravier roulé.

Pour la Porosité des différentes mélanges Sur granulat on remarque que la porosité du mélange de gravier diminue en augmentant le pourcentage de gravier roulé.

Pour on remarque que l'introduction de gravier roulé dans le mélange de béton favorise la maniabilité du béton , et on remarque une augmentation de la masse volumique du béton frais en augmentant le pourcentage de gravier roulé .

Pour l'affaissement on remarque L'affaissement de nos mélanges de bétons est maintenue constante, on peut pas travailler sur plusieurs paramètres à la fois.

Pour le rapport E/C on remarque une diminution du rapport E/C pour le mélange B3 avec 100 % gravier roulé, l'absorption des graviers roulés est faible par rapport aux graviers concassés cela améliore le rapport E/C Pour la masse volumique à l'état durci des bétons on remarque la masse volumique augmente avec le temps j'us qua 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes remarque une diminution de la masse volumique à 60 jours et 90 jours, Avec de concentration de l'acid sulfurique (5%) on remarque aussi que le mélange B3 avec 100% de gravier concassé est plus affecté par l'attaque acide que les mélange contenant des graviers roulé .

Pour la masse volumique à l'état durci des bétons la masse volumique augmente avec le temps j'us qua 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes remarque une diminution de la masse volumique à 60 jours et 90 jours, Avec de concentration de l'acide sulfurique (10%) on remarque aussi que le mélange B1 avec 100% de gravier concassé est plus affecté par l'attaque acide que les mélange contenant des graviers roulé .

Pour la résistance de la compression on remarque la résistance de la compression augmente avec le temps j'usqua 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes on remarque une diminution de la résistance à 60 jours et 90 jours, Avec de concentration de l'acides sulfurique (5%) on remarque aussi que le mélange B3 avec 100% de gravier roulé est plus affecté par l'attaque acide que les mélange contenant des graviers concassé

Pour la résistance de la compression on remarque la résistance de la compression augmente avec le temps j'us qua 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes remarque une diminution de la résistance à 60 jours et 90 jours, Avec de concentration de l'acide sulfurique (10%) on remarque aussi que le mélange B3 avec 100% de gravier roulé est plus affecté par l'attaque acide que les mélange contenant des graviers concassé .

Pour la résistance de la traction on remarque la résistance de la traction augmente avec le temps j'us qua 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes remarque une diminution de la résistance à 60 jours et 90 jours, Avec de concentration de l'acide sulfurique (5%) on remarque aussi que le mélange B3 avec 100% de gravier roulé est plus affecté par l'attaque acide que les mélange contenant des graviers concassé .

Pour la résistance de la traction on remarque la résistance de la traction augmente avec le temps j'us qua 28 jours, avec l'immersion en milieu acide de nos éprouvettes remarque une diminution de la résistance à 60 jours et 90 jours, Avec de concentration de l'acide sulfurique (10%) on remarque aussi que le mélange B3 avec 100% de gravier roulé est plus affecté par l'attaque acide que les mélange contenant des graviers concassé .

Pour la résistance de la compression à 60 jours on remarque que plus en augmente la concentration de l'acide sulfurique à 10% dans le milieu de conservation résistance à la compression diminue .

Pour la résistance de la compression à 90 jours on remarque que plus en augmente la concentration de l'acide sulfurique à 10% dans le milieu de conservation résistance à la compression diminue .

Pour la résistance de la traction à 60 jours on remarque que plus en augmente la concentration de l'acide sulfurique à 10% dans le milieu de conservation, plus la résistance à la compression diminue .

Pour la résistance de la traction à 90 jours l'augmentation de la concentration de l'acide sulfurique à 10% dans le milieu de conservation influe d'avantage sur la résistance à la compression qui diminue d'une façon plus importante . [36]

V-6-(Durabilité Des Constructions De Génie Civil En Bétons Et L'impact D'un Environnement Agressif (pH>13):

Le béton est un matériau relativement durable, c'est le matériau le plus utilisé aujourd'hui dans le domaine des travaux publics BTP. Mais les constructions en béton sont enclines aux risques des attaques chimiques lors de leurs fonctionnements, ce qui reflète sur sa durée de vie, et éventuellement la minimise. La prédiction des divers signes d'endommagement ainsi le L'Et temps d'apparition de ces désordres sont l'objectif de nombreuses recherches dans le domaine de conception. D'où, la seule démarche disponible pour analyser le cycle de vie des ouvrages d'art et estimer le degré d'endommagement au cours du temps se limite uniquement à la simulation numérique et expérimentale. Dans ce contexte,

Dans cette recherche BOUABDALLAH Fouzia porte sur une validation des résultats numériques par une simulation expérimentale faite au sein du laboratoire de génie civil à l'université d'Annaba. Un modèle numérique macroscopique de Baghdadi et ces collègues est programmé par le logiciel Matlab (version 2014), en simulant l'effort de compression dans des éprouvettes ($\emptyset 11$; h22) cm. Et cela en cas des attaques chimiques sous un impact environnemental hyperbasique d'un béton à base de granulats fortement réactifs apportés d'une carrière Algérienne de Guelma (Bouhachana). Les résultats montrent une bonne fiabilité de ce modèle numérique par rapport à d'autres modèles existants, car les écarts calculés de déformation étaient assez faibles d'environ 0.08 au maximum.

En conclusion, les ponts Américaines ont subi de plusieurs traitements durant plusieurs années (2006-2013) avec une procédure de réhabilitation combinante (le traitement chimique, électrochimique...). En utilisant le Li, Silane et siloxanes ainsi que les PRFC, et la résine époxy. Ce qui a conduit à l'amélioration des caractéristiques physicochimiques et esthétiques du béton alcali-réactif dégradé à cause du (colmatage des fissures, décoloration réduite, ...), d'où la réussite de cette intervention. De ce fait, la démolition des ouvrages attaques chimiquement (en stade avancé) est à écarter mais tout dépend du côté économique (coût) de la réparation. Le modèle de Baghdadi et ses collègues est un modèle numérique qui combine entre la compression simple, la déformation bidirectionnelle ou 3D et le gonflement interne. Ce modèle est fiable en comparant par les résultats expérimentaux pour des cylindres en béton alcali-réactif B AGR à base de matériaux locaux (Algériens), dont on calcule un écart maximal moins de 0,08MPa. [37]

V-7-Durabilité des produits en béton soumis à un environnement agressif vis-à-vis des armatures :

La maîtrise et l'optimisation de la durabilité des structures et des produits en béton, qu'ils soient structurels ou architecturaux, constituent un enjeu majeur pour toute la profession. C'est pourquoi la durabilité occupe de nos jours une position déterminante dans le nouveau contexte normatif européen sur le béton. Pour les produits préfabriqués de structure, les normes de produits renvoient à la norme NF EN 13369 « Règles communes pour les produits préfabriqués en béton » qui elle-même reprend certaines exigences de la norme NF EN 206

1/CN (2012) « Béton Partie 1 :

Spécifications, performances, production et conformité » pour ce qui concerne le matériau béton. Pour les autres produits, les normes harmonisées contiennent à elles seules toutes les spécifications nécessaires. La norme NF EN 206

1 décrit les exigences applicables en France pour la composition et les propriétés des bétons en fonction de différentes classes d'exposition. Ces classes d'exposition traitent du lien qui existe entre les conditions environnementales dans lequel sera situé l'ouvrage et des caractéristiques du matériau qui doivent être respectées pour limiter les risques induit sur la durabilité de la structure en béton armé (risques de corrosion par carbonatation ou par l'action des ions chlorure, risques induits par l'action du gel/dégel, risques liés au contact d'un environnement chimiquement agressif). Les Eurocodes mettent également l'accent sur la durabilité des structures en béton en prenant en compte les propriétés intrinsèques des matériaux utilisés et les conditions environnementales, qu'elles soient d'ordre chimiques ou physiques, à travers la définition d'un état limite de service et des classes d'exposition. Le dimensionnement des enrobages est donc encore basé sur des prescriptions techniques ne faisant référence à aucun modèle de calcul de durabilité, contrairement aux aspects mécaniques où les règles fournissent des modèles de calcul détaillés. Bien que ces règles de dimensionnement permettent la réalisation de structures très durables pour une durée d'utilisation de projet donnée, le potentiel réel des couples « matériau/process » pourraient être davantage pris en compte. La conséquence réside dans une limitation des solutions techniques, ce qui peut constituer un frein à l'innovation. Un moyen d'améliorer cet aspect consiste à fournir aux concepteurs de matériaux non plus des solutions types mais des modèles de durabilité intégrant l'ensemble des paramètres d'optimisation. Qui plus est, les particularités des matériaux modernes et des nouveaux process de fabrication conduisant à la réalisation de bétons plus performants que ceux décrits dans les textes réglementaires ne sont pas suffisamment pris en compte dans les règles de dimensionnement actuelles. D'une manière générale, il y a un intérêt majeur pour les couples « matériaux/process » à asseoir les dispositions normatives sur des approches plus rigoureuses sur le plan des phénomènes. C'est dans ce contexte que s'inscrivent ces travaux de thèse, initiés par le CERIB

(Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton, Epernon) et le LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Toulouse), en collaboration avec le LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbonne). Les objectifs de la thèse consistent à appréhender les principaux mécanismes de dégradation liés à la corrosion des armatures et

à les intégrer dans un modèle prédictif de durabilité. Les mécanismes de dégradation concernés par ces travaux sont :

- la carbonatation en conditions hydriques stables ou non ;
- la pénétration des chlorures en phase saturée et non saturée ;
- le couplage entre les mécanismes de carbonatation et de pénétration des chlorures ;
- la corrosion des armatures

La méthodologie développée doit permettre d'appliquer l'approche probabiliste à la durabilité des structures en béton, notamment des produits préfabriqués. Il s'agit de prendre en considération dans le modèle probabiliste de durabilité les caractéristiques des process industriels associés (traitement thermique, cure) ainsi que les propriétés physico chimiques des bétons traditionnels et nouveaux bétons, réalisés avec des liants à base de ciment CEM I ou autre. L'objectif final de ces travaux réside dans l'élaboration d'un modèle simple et fiable permettant de considérer le couplage de tous les phénomènes importants liés à la durabilité des bétons, de la pénétration des espèces agressives à l'amorçage réelle du phénomène de corrosion des armatures. Une attention particulière est portée sur les critères de dépassivation. Deux critères sont considérés : la chute du pH de la solution interstitielle et une concentration critique en ions chlorure au droit de l'armature. En générale, les textes règlementaires et les recommandations supposent que la corrosion s'initie lorsque les critères de dépassivation sont atteints. Les modèles de durabilité reposent également essentiellement sur la phase de pénétration des espèces agressives et sur les conditions de dépassivation des armatures et ne font généralement pas apparaître l'initiation du processus de corrosion. Pourtant, il y aurait tout intérêt à différencier davantage la dépassivation de l'amorçage réelle de la corrosion. L'amorçage de la corrosion à une vitesse non négligeable est ainsi conditionné par l'un des deux critères de dépassivation et par la présence d'une quantité d'oxygène et d'eau suffisante au voisinage de l'armature. L'initiation de la corrosion pourrait être alors basée sur un critère quantitatif faisant intervenir la quantité de produits corrodés.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre consiste en un état de l'art qui synthétise les différents travaux nationaux et internationaux portant sur la compréhension phénoménologiques des mécanismes, l'utilisation de modèles prédictifs et le recours à une approche probabiliste pour la durabilité des structures en béton armé dans le domaine de la corrosion. Il permet de poser les bases du travail que nous décrivons dans la suite du mémoire. Le second chapitre aborde la problématique sous un angle expérimental et prend en compte non seulement les spécificités de la mise en œuvre du béton (cure, traitement thermique éventuel) ainsi que les propriétés physicochimiques des

bétons traditionnels et des nouveaux bétons réalisés à partir de différents liants. Pour cela, quatre formulations sont étudiées et permettent de quantifier les gains de durabilité de produits exposés à un risque

de corrosion des armatures obtenus en augmentant la compacité du béton, en variant le process de fabrication ou en optimisant les caractéristiques du liant. Le programme développé a un double objectif : d'une part, il a pour ambition d'apporter des éléments de réponse aux interrogations sur les phénomènes qui restent en suspens malgré les nombreux progrès de ces dernières années ; d'autre part, les bétons étudiés font l'objet d'une série de caractérisation qui permet de disposer de l'ensemble des paramètres nécessaires à la modélisation du comportement des matériaux cimentaires dans les différents environnements. La connaissance de ces paramètres permet également d'alimenter la réflexion et d'étayer les hypothèses relatives aux phases d'initiation de la corrosion (pénétration des chlorures et de dioxyde de carbone, dépassivation des armatures puis amorçage de la corrosion), c'est pourquoi les bétons sont caractérisés avant de subir les essais de durabilité.

Enfin, le troisième et dernier chapitre est consacré au développement de la modélisation numérique. Parmi les interactions prises en compte dans la modélisation, on trouve la modification de la porosité et l'augmentation de la teneur en eau des bétons due au phénomène de carbonatation, la diminution de la capacité de fixation des monosulfoaluminates de calcium hydratés et des silicates de calcium hydratés lorsque ces hydrates sont carbonatés, la pénétration du dioxyde de carbone gazeux au sein de la porosité, et le mouvement diffusif et convectif avec la phase liquide des ions carbonate et chlorure qui participent activement à la dépassivation des armatures. Les données du chapitre 2 sont exploitées et permettent de calibrer les résultats donnés par le modèle sur les résultats expérimentaux. Le modèle numérique peut ensuite être couplé à un software et à un algorithme de calcul d'indice de fiabilité qui permet d'appréhender la durée de vie des structures en béton dans un contexte probabiliste.

La maîtrise et l'optimisation de la durabilité des produits en béton et des ouvrages constituent un enjeu particulièrement important pour l'ensemble de la profession. La conception actuelle de la durabilité des ouvrages repose sur des exigences normatives, principalement de type prescriptive, qui reprennent les règles de l'art pour la formulation du béton et le dimensionnement des enrobages en fonction des différentes classes d'exposition. Ces règles de dimensionnement fournissent donc des prescriptions techniques qui, bien que conservatives, ne prennent pas en compte de manière suffisamment rigoureuse tous les phénomènes intervenant dans le processus de corrosion des armatures. Il y a pourtant un intérêt majeur à considérer les performances d'un couple « matériau/process » à travers un modèle de durabilité prenant en compte l'ensemble des phénomènes liés à la corrosion. L'amélioration de la durabilité dès la conception des structures en béton repose également sur la définition d'un état limite précis intégrant toutes les étapes de dégradation, de la pénétration des espèces agressives dans le béton d'enrobage, à la dépassivation puis à l'amorçage réel de la corrosion et à son développement.

C'est dans ce contexte que se sont positionnés ces travaux de thèse. L'objectif des travaux développés était d'une part de contribuer à améliorer la compréhension phénoménologique de l'ensemble des mécanismes de dégradation liés à la corrosion des armatures et d'autre part d'élaborer un modèle permettant de considérer le couplage de tous les phénomènes importants liés à la durabilité des bétons, de la pénétration des espèces agressives à l'amorçage réel du phénomène de corrosion des armatures. Le premier chapitre a permis de faire un état de l'art sur la phénoménologie des mécanismes, l'utilisation de modèles prédictifs et le recours à une approche probabiliste pour la durabilité des structures en béton armé dans le domaine de la corrosion.

La littérature fournit de nombreux travaux sur d'une part, l'étude de la propagation des agents agressifs dans le béton d'enrobage, que ce soit en milieu saturé ou en milieu insaturé, et d'autre part sur la corrosion des armatures. Mais cette synthèse a également mis en avant le manque de données sur le couplage entre la carbonatation et l'action des ions chlorure et le lien entre l'amorçage du processus de corrosion et la propagation de la corrosion dans différentes conditions hydriques. Les textes normatifs et les recommandations supposent que la corrosion s'initie dès lors que les critères de dépassivation sont atteints. De fait, les modèles de durabilité reposent essentiellement sur la phase de pénétration des espèces agressives et sur les conditions de dépassivation des armatures et ne font généralement pas apparaître l'initiation du processus de corrosion. Pourtant les modèles pourraient s'appuyer sur un état limite qui permette d'intégrer à la fois la phase de propagation des espèces agressives et la phase de corrosion pour optimiser encore davantage le potentiel des couples « béton/process » visàvis de la durabilité des structures en béton armé.

Le programme expérimental a permis de quantifier l'influence de la cure, du traitement thermique, de la compacité et de la nature du liant sur les propriétés physicochimiques des matériaux. Le comportement des bétons au regard des différentes conditions environnementales favorisant la dépassivation des armatures a également été étudié. Pour traiter les effets de couplage, un montage expérimental spécifique a été mis au point permettant d'intégrer simultanément ou non :

Corrosion des armatures du béton :

couplage carbonatation/chlorures en présence de cycles hydriques

- la carbonatation accélérée ;
- la diffusion des ions chlorures ;
- une alternance de cycles humidification/séchage de la surface en béton ;
- un suivi continu de la masse des éprouvettes testées ;
- un suivi électrochimique continu du comportement des armatures pour détecter la dépassivation des aciers.

Les résultats expérimentaux permettent de confirmer certains travaux cités dans la littérature, notamment ceux concernant les effets synergiques du couplage entre la carbonatation et les chlorures à travers la

réduction de la capacité de fixation des chlorures par la matrice cimentaire carbonatée. Les résultats montrent également l'importance de prendre en compte l'évolution du taux de saturation du matériau en fonction des conditions environnementales. Les résultats électrochimiques ont mis en évidence des chutes de potentiel d'armature précoces reflétant des modifications chimiques à l'interface acier/béton, notamment lors d'apports d'eau cycliques. Ces modifications électrochimiques de la surface de l'acier ont été assimilées à des dépassivation ponctuelles de l'armature dont les conséquences ne sont pas significatives visàvis de la durabilité. L'exploitation des essais électrochimiques a ainsi permis de mettre en évidence le fait que les essais accélérés comme la carbonatation ou la migration des chlorures qui permettent de caractériser le matériau visàvis de la pénétration des agents agressifs, ne sont pas suffisants lorsqu'on souhaite étudier la durabilité dans son ensemble. Il est en effet nécessaire de prendre en compte une variation de la teneur en eau dans le béton d'enrobage et la disponibilité de l'oxygène au voisinage de l'armature. Ces essais devraient donc intégrer non seulement la phase de pénétration des espèces agressives mais également les variations de teneur en eau dues aux conditions environnementales et les réactions au voisinage des armatures pour appréhender au plus juste les possibilités de corrosion. Les essais mis au point dans le cadre de ces travaux de thèse intègrent ces aspects et pourraient aussi devenir des essais de performance utiles pour l'approche performantielle des bétons : ils permettent de prendre en compte non seulement le potentiel réel d'une formulation de béton visàvis des risques liés à la corrosion des armatures mais également les conditions environnementales de la structure telle que définit dans les textes normatifs. De tels essais pourraient être utilisables dans le cadre d'une approche de type performantielle de la durabilité, qu'elle soit basée sur le respect de valeurs seuils à ne pas dépasser ou sur une comparaison de performance entre un béton à qualifier et un béton de référence

Enfin le chapitre 3 a posé les bases nécessaires à l'élaboration d'un modèle de corrosion intégrant le couplage des principaux phénomènes importants liés à la durabilité des bétons, de la pénétration des espèces agressives à l'amorçage réelle du phénomène de corrosion des armatures conditionnée par :

- la dépassivation des armatures ;
- la présence d'humidité suffisamment élevée au voisinage de l'armature ;
- la présence d'une quantité d'oxygène suffisamment importante au voisinage de l'armature.

Les phénomènes de dépassivation ponctuelle des armatures observés pendant les essais électrochimiques (chapitre 2) nous ont conduits à reconsidérer l'état limite traditionnellement utilisé pour qualifier le comportement d'un béton armé visàvis de la

corrosion. Les textes normatifs et les recommandations supposent que la corrosion s'initie lorsque les critères de dépassivation sont atteints. Pourtant, il y aurait tout intérêt à différencier encore davantage la dépassivation de l'amorçage réel de la corrosion. L'amorçage de la corrosion à une vitesse non négligeable est ainsi conditionné par l'un des deux critères de dépassivation et par la présence d'une quantité d'oxygène et d'eau suffisante au voisinage de l'armature. Un critère quantitatif basé sur une

quantité seuil de produits de corrosion a été proposé comme état limite de corrosion. Ce critère permet de prendre en compte les phénomènes de dépassivation ponctuelles qui pourraient conduire à une initiation de la corrosion à court terme et à des vitesses négligeables.

Une attention particulière a été portée sur les critères de dépassivation. Deux critères ont été considérés : la chute du pH de la solution interstitielle et une concentration critique en ions chlorure au droit de l'armature. Une probabilité de dépassivation a été considérée en fonction de la quantité de chlorures libres au voisinage de l'acier et du pH de la solution interstitielle. Les spécificités du modèle ont été mises en avant :

- le couplage entre la carbonatation et la pénétration des ions chlorure (diminution de la capacité de fixation des chlorures par la matrice cimentaire) ;
- l'influence de la carbonatation sur les propriétés microstructurales et la teneur en eau ;
- la prise en compte du transport convectif des ions carbonate et des ions chlorure.

Le modèle numérique a ensuite été couplé à un algorithme de calcul d'indice de fiabilité. Celui-ci permettra d'appréhender la durée de vie des structures en béton dans un contexte probabiliste.

Ces travaux de thèse ont permis d'aboutir à un modèle intégrant de nombreux phénomènes liés à la corrosion des armatures. Une perspective immédiate à ce travail consisterait à intégrer d'autres paramètres environnementaux qui pourraient influencer l'ensemble de ces mécanismes. Certaines propriétés dépendent en effet de la température que nous avons supposée constante tout au long de ces travaux

Une meilleure prise en compte des spécificités des liants composés d'additions pouzzolaniques pourrait être envisagée en distinguant les CSH pouzzolaniques des CSH traditionnelles. Cet aspect permettrait de considérer le réel potentiel de ce type de béton, notamment les bétons contenant des laitiers de haut fourneau dont les CSH formés pourraient contribuer à la fixation des ions chlorure. En première application, le modèle a pu être utilisé pour des calculs de durée de vie des ouvrages en béton armé. Il pourrait également être utilisé pour optimiser le dimensionnement des enrobages permettre de quantifier les gains de durabilité de produits exposés à un risque de corrosion des armatures en augmentant la compacité du béton, en variant le process de fabrication ou en optimisant les caractéristiques du liant. Enfin, une autre perspective à ces travaux consisterait à intégrer à ce modèle de corrosion les conséquences mécaniques de la corrosion des armatures sur l'intégrité d'une structure ou d'un produit. Pour cela, le critère d'état limite basé sur une épaisseur d'acier corrodée pourrait conduire à proposer plusieurs valeurs seuils en fonction de critères basés sur la « gravité des conséquences ».

On pourrait distinguer les dommages susceptibles de nuire :

- à l'aspect (apparition des premières fissures dues aux produits de corrosion) ;
- à la durabilité (fissuration excessive, éclatement du béton en parement si la chute n'induit pas de mise en danger) ;

→ à la fonction de la structure (problème d'intégrité de la structure, effondrement par perte de section d'acier).

Le premier critère pourrait être atteint après la formation d'une quantité seuil de produits corrodés. Les deux critères suivants pourraient être atteints en considérant un pourcentage limite de perte de section d'armature. Ce travail pourrait faire l'objet d'une étude approfondie. Une perspective associée consisterait à considérer l'influence de la fissuration induite par les produits de corrosion sur des propriétés de transfert dans la zone d'enrobage, cela principalement dans l'optique d'atteindre les ELU de perte d'intégrité de la structure. La prise en compte de la migration des produits de corrosion vers la matrice cimentaire pourrait également être associée à ces perspectives dans la mesure où elle modifie les pressions de gonflement et donc le risque de fissuration de l'enrobage. [38]

CONCLUSION GENERAL

CONCLUSION:

1-Les ouvrages en béton disposent d'un ensemble de textes normatifs, constitué de normes européennes et de recommandations techniques françaises qui sont le fruit des retours d'expérience de multiples chantiers et de travaux d'études et de recherches menées durant ces dernières décennies.

Le nouveau contexte normatif et réglementaire qui encadre l'utilisation du matériau béton comprend :

- des normes de dimensionnement : les Eurocodes ;
- des normes sur les constituants du béton ;
- des normes d'essais sur béton frais et béton durci ;

2- À chacune des classes correspondent des spécifications sur la composition des bétons, sous forme de valeurs limites à respecter.

Chaque classe fait l'objet d'une description des conditions environnementales et est illustrée d'exemples informatifs.

CLASSE XO : aucun risque de corrosion ou d'attaque

CLASSES XC1 à XC4 : corrosion induite par carbonatation

CLASSES XD1 à XD3 : corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine

CLASSES XS1 à XS3 : corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer

CLASSES XF1 à XF4 : attaque gel / dégel avec ou sans agent de déverglaçage

3- Les attaques sous la forme de gonflement sont provoquées par les réactions des matières transportées dans la structure susceptibles de donner naissance à des formations nouvelles très volumineuses. A l'état plastique, les pressions de cristallisation et d'hydratation sont neutres étant donné qu'il y a des possibilités de déformation. Ce n'est qu'après un état de durcissement minimal que les réactions de gonflement peuvent causer des dommages. (C'est pourquoi une eau contenant des sulfates peut tout à fait être appropriée en qualité d'eau de gâchage, bien qu'elle causerait des dommages ultérieurement au béton durci)

CLASSES XA1 à XA3 : attaques chimiques

Références et bibliographies:

[1] : **Anne Jégou**, Territoires, acteurs, enjeux des dynamiques de durabilité urbaine : le cas de la métropole parisienne [archive] (thèse de doctorat de géographie), Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2011 [PDF], p. 35.

Institut européen des hautes études internationales, PlamenaHalacheva, Vers une nouvelle politique de développement durable de l'Union européenne ? Le défi régional [archive], 2006/2007, p. 16.

Collectif Forum pour d'autres indicateurs de richesse (FAIR)« Carte blanche : Au-delà du PIB : un sujet qui mérite débat » [archive], Le Soir, le 24 juin 2009.

(en) Herman Daly, « Institutions for a Steady-State Economy » [« Institutions pour une économie stable »], Steady State Economics, Island Press (en), Washington DC, 1991.

M. Raffinot&EURISCO DIAL, Soutenabilité de la dette des pays pauvres très endettés [archive], Université Paris Dauphine, Cahier de Recherche, 2004.

(en) R. Flood, « Capital Mobility and the Choice of Exchange Rate System », International Economic Review, 1979, n°2, vol. 2, p. 4053416 (résumé [archive]).

[2] : https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Developpement-durable-page-2.html#ref_3
(En a pas trouvé l'auteur dans cette article)

[3] : **PATRICK GUIRAUD** Octobre 2016 Le corpus normatif du béton : un ensemble de textes homogènes et cohérents 16 BIS, boulevard Jean-Jaurès 92110 CLICHY

[4] : **PATRICK GUIRAUD** Décembre 2020 Norme béton NF EN 206 / CN : Classes d'exposition des bétons 16 BIS, boulevard Jean-Jaurès 92110 CLICHY

[5] : **laboratoire** centrale des ponts et chaussées Recommandations provisoires Mars 2010 Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton

[6] : **AZIEZ Mohammed Nadjib** 2017 Durabilité des Matériaux et Durée de Vie des Ouvrages Présentée pour l'obtention du grade de DOCTORAT LMD Université AboubakrBelkaïd– Tlemcen

[7] : **ENPC Marne-la-Vallée** - 23 octobre 2014 Concevoir, construire et gérer des structures durables en béton Anne-Charlotte GASSER Nantes Métropole Ex-DterIdF CEREMA.

[8] : **AZIEZ Mohammed Nadjib** 2017 Durabilité des Matériaux et Durée de Vie des Ouvrages Présentée pour l'obtention du grade de DOCTORAT LMD Université AboubakrBelkaïd– Tlemcen

[9] : **ENPC Marne-la-Vallée** - 23 octobre 2014 Concevoir, construire et gérer des structures durables en béton Anne-Charlotte GASSER Nantes Métropole Ex-DterIdF CEREMA.

[10] : **Soumaya Amina BENSALIR** 2010 Mécanismes d'altérations des matériaux cimentaires soumis aux milieux fortement agressifs Université de Mascara- Algérie - Diplôme d'ingénieur d'état en génie civil option : construction civile et industrielle 2010

https://www.memoireonline.com/10/12/6325/m_Mecanismes-d-alterations-des-materiaux-cimentaires-soumis-aux-milieux-fortement-agressifs26.html

[11] : **ENPC Marne-la-Vallée** - 23 octobre 2014 Concevoir, construire et gérer des structures durables en béton Anne-Charlotte GASSER Nantes Métropole Ex-DterIdF CEREMA.

[12] : **Soumaya Amina BENSALIR** 2010 Mécanismes d'altérations des matériaux cimentaires soumis aux milieux fortement agressifs Université de Mascara- Algérie - Diplôme d'ingénieur d'état en génie civil option : construction civile et industrielle 2010

https://www.memoireonline.com/10/12/6325/m_Mecanismes-d-alterations-des-materiaux-cimentaires-soumis-aux-milieux-fortement-agressifs26.html

[13] : **Carman P.C.** Trans. Inst. Chem. Eng. 1935, London, 15, 150.

[14]: **Dullien F.** (1979). Porous Media - Fluid Transport and Pore Structure. New York, Academic Press.

[15] : **Van Brakel J., Heerthes PM.** - Analysis of diffusion in macroporous media in terms of a porosity, a tortuosity and a constrictivity factor, Journal of Heat Mass Transfer, 1974, 17, 1093- 1103

[16] : **Méthodes recommandées** pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité. Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM Durabilité des bétons, Toulouse, 11-12 décembre 1997.

- [17] : **Underwood E.E.**, 1968. Quantitative stereology. Readin (MA) : Addison-Mesleypublishingcompany.
- [18] : **Scrivener K.L.**, Bentur A., Pratt P.L. - Quantitative characterisation of the transition zone in high-strengthconcrete, Advances in CementResearch. 1988, Vol.1, n°4, 230-237.
- [19] : **Groupe de travail AFGC-RGCU GranDuBé** « Mesure des grandeurs associées à la durabilité des bétons » Modes opératoires recommandés par GranDuBé, 2007, Presses de l'ENPC.
- [20] : **Diamond S., Leeman M.E.** - Pore size distributions in hardenedcementpaste by SEM image analysis. Microstructure of cement-basedsystems/bonding and interfaces in cementitiousmaterials. MRS, 1994, Vol.370.
- [21] : **Baroghel-Bouny V.**, Ammouche A., Hornain H. - Matrices cimentaires - Analyse de la microstructure et propriétés de transfert, Revue Française de Génie Civil, 2001, Volume 5-N°2-3.
- [22] : **Gallé C.** - Effect of drying on cement-basedmaterials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry a comparative studybetweenoven-, vacuum-, and freeze-drying, Cement and ConcreteResearch, 2001, Vol. 31, n°10 , 1467-1477.
- [23] : **Caquot A.** – Le rôle des matériaux dans le béton, In : mémoires de la société des Ingénieurs Civils de France, Juillet-Août 1937, PP. 562-582.
- [24] : **Ollivier J.P.**, Carles-Gibergues A., Hanna B. - Activité pouzzolanique et action de remplissage d'une fumée de silice dans les mortiers de béton de haute résistance, Cement and ConcreteResearch, 1988, 18, 3, 438-448.
- [25] : **Ollivier J.P.**, Carcassès M., Bigas J.P., Truc O. - Diffusion des chlorures dans le béton saturé, Revue Française de Génie Civil, 2002, 6, 2, 227-250.
- [26] : **Yssorche M.P.**, Microfissuration et durabilité des bétons à hautes performances, Thèse de l'INSA de Toulouse, 1995, 188 p
- [27] : **Villain G.**, Baroghel-Bouny V., Kounkou C., Hua C. - Mesure de la perméabilité aux gaz en fonction du taux de saturation des bétons, Revue Française de Génie Civil, 2001, p. 251-268.
- [28] : **Abbas A.**, Carcasses M., Ollivier J.P.- Gaspermeability of concrete in relation to itsdegree of stauration, Materials and Structures, January-February 1999, vol. 32, p.3-8.
- [29] : **van Genuchten M. T.** - A closed-formequation for predicting the hydraulicconductivity of unsaturatedsoils, Soil Science Society of America, 1980, n°44, p. 892-898
- [30] : **C. M. Marle**, « Écoulements monophasiques en milieu poreux », Revue de l'institut français du pétrole, vol. 22, no 10, 1967, p. 1471-1509
- [31] : **A. Bensoussan**, J.-L. Lions et G. Papanicolaou, AsymptoticAnalysis for Periodic Structures, Amsterdam, North-Holland, 1978, 699 p.
- [32] : **OurdiaFedaoui-Akmoussi**, L Molez, S Kaci, R Jauberthie. Étude du comportement mécanique et de durabilité des bétons fibrés dans un milieu agressif. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. fahal-01167611f
- [33] : **SAYAD Youcef**, Comportement des bétons dans les milieux agressifs (cas de Biskra), Université Mohamed Khider – Biskra,algerie
- [34] : **Ferhatitaieb**, Durabilité d'un béton exposé à un milieu Agressive (acide sulfurique) influence du rapport G/S, Département de GENIE CIVIL, Faculté de technologie, Université Mohamed Boudiaf - M'sila,2016,m'sila,algerie
- [35] : **HAMRIT Abdelbasset**, DARFALOU Abderrazaq, Influence du rapport E/C sur la durabilité des ciments et mortier à base de laitier exposés aux milieux agressifs, Département de GENIE CIVIL, Faculté de technologie, Université Mohamed Boudiaf - M'sila,2021, m'sila,algerie
- [36] : **Debihabdelmohcene**, durabilité d'un béton exposé à un milieu aggressive(acide sulfurique), influence de la forme des granulats (concassé-roulés), Département de GENIE CIVIL, Faculté de technologie, Université Mohamed Boudiaf - M'sila,2016, m'sila,algerie
- [37] : **BOUABDALLAH Fouzia**, FERHOUNE Nouredine3, BELOUETTAR Redjem,AGGOUNE Zineb3,LABIDI Nor El Houda ,M HABITA Mohamed Fouzi,Durabilité Des Constructions De Génie Civil En Bétons Et L'impact D'un Environnement Agressif (pH>13), Université des Sciences et de la Technologie Mohamed BOUDIAF, Département de Génie Civil, Oran-Algérie, 03 Avril 2021,oran,algerie

[38] : Jonathan MAI-NHU Patrick ROUGEAU, Durabilité des produits en béton soumis à un environnement agressif vis-à-vis des armatures , CERIB Expertise concrète , MARS 2016